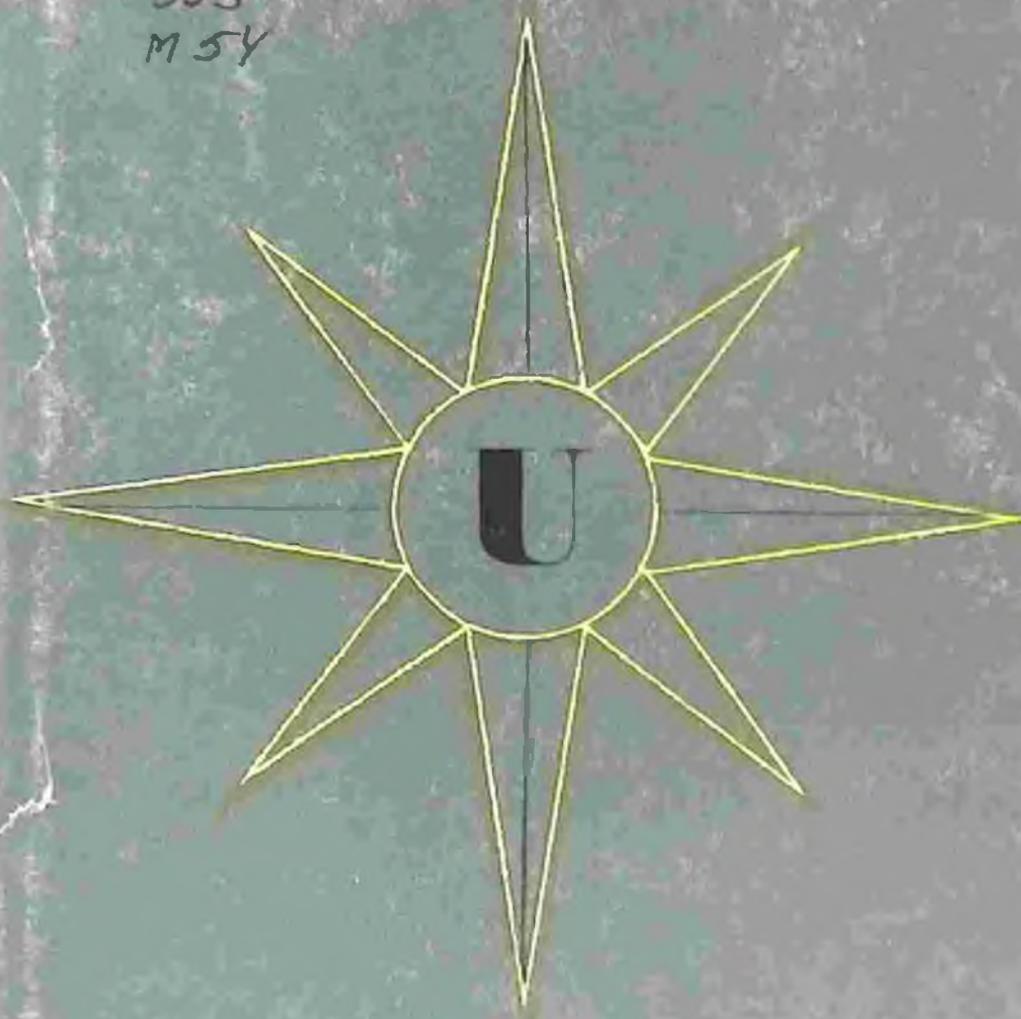


553  
M 54



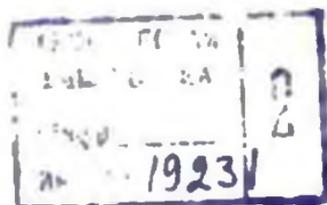
МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

2004

553  
М54

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

**МЕТОДЫ ПОИСКОВ  
УРАНОВЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА» • МОСКВА • 1989

**МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Коллектив авторов

Изд-во «Недра», 1969, стр. 392.

Книга представляет собой вторую часть коллективного труда, составленного под общим руководством В. П. Красникова. Первая часть этой работы, посвященная геологическим предпосылкам поисков, была издана в 1964 г. (В. П. Красников, «Геологические предпосылки поисков урановых месторождений». Атомиздат).

Настоящая книга ознакомит широкие круги работников геологической службы с современными методами поисков месторождений урана с комплексированием этих методов в зависимости от геологических, геоморфологических, биоклиматических и других природных условий.

В книге описаны специфические особенности поисков легкооткрываемых месторождений в обгаженных районах и глубинных методов поисков перекрытых и слепых месторождений. Таблиц 34, иллюстраций 112, библиографии — 141 название.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГЦИЯ**

А. Г. Граммаков, И. Н. Зубрев, А. И. Никопов,  
А. И. Перельман, Д. Я. Суражский (ответственный редактор), Г. П. Тафеев, Ю. В. Шарков

## ПРЕДПОСЛОВИЕ

Настоящая книга представляет собой вторую часть большого коллективного труда, составленного в 1961—1962 гг. группой специалистов, под общим руководством профессора В. И. Красникова. Первая часть этой работы, посвященная геологическим предпосылкам поисков, была издава в 1964 г.\*

Цель книги — ознакомить широкие круги работников геологической службы с современными методами поисков месторождений урана и с комплексированием этих методов в зависимости от геологических, геоморфологических, биоклиматических и других природных условий. Она отличается от других книг, написанных на ту же тему не только дифференцированным подходом к решению методических вопросов, но и впервые предпринимаемой попыткой систематического рассмотрения проблем, связанных с поисками труднооткрываемых месторождений.

Несмотря на то что настоящая работа, написанная большим авторским коллективом, не свободна от некоторых недостатков, связанных с неизбежной разнородностью изложения и недостаточной увязкой отдельных глав и разделов, авторы надеются, что она послужит более эффективному использованию геофизических и геохимических методов при поисках урановых месторождений.

Редактирование книги выполнено А. И. Циконовым, А. Г. Грамаковым, Г. П. Тафеевым (гл. I—VII, X, XI), А. И. Черельманом (гл. VIII), И. Н. Зубревым, Ю. В. Шарковым и Д. Я. Суражским (гл. VIII, IX, XII—XV).

\* В. И. Красников. Геологические предпосылки поисков урановых месторождений. Атомиздат, 1964.

## ВВЕДЕНИЕ

Общая тенденция роста потребности в расщепляющихся материалах, особенно для нужд непрерывно развивающейся атомной энергетики, требует систематического расширения минерально-сырьевой базы урана.

Ведущее место в комплексе геологопоисковых работ по урану как в СССР, так и за рубежом занимают радиометрические и геохимические методы, основанные на измерении естественной радиоактивности горных пород и руд и выявлении первичных и вторичных ореолов рассеяния урана и сопутствующих ему элементов.

Радиометрические и геохимические методы находят все более широкое применение на всех этапах геологопоисковых работ на уран — от рекогносцировок и мелкомасштабных поисков, проводимых с целью оценки урановосности больших площадей, до промышленной оценки выявленных рудопроявлений и месторождений с подсчетом запасов урановых руд. С их помощью в СССР и за рубежом открыта большая часть промышленных месторождений радиоактивных руд.

Разработка и внедрение в производство полевых методов разведочной радиометрии начаты в СССР в 20-х годах текущего столетия. Обобщение работ начального периода становления разведочной радиометрии проведено А. П. Кириковым, П. Н. Тверским, А. Г. Граммаковым, Г. В. Горшковым и Б. С. Айдаркиным (1934). Вплоть до 1955—1957 гг. книга этих авторов была по существу единственным достаточно полным руководством, систематизирующим опыт разработки и применения радиометрических методов при поисках и разведке не только радиоактивных руд, но и других полезных ископаемых.

В настоящее время эта книга в значительной мере устарела и представляет собой библиографическую редкость.

Интенсивная разработка и широкое внедрение методов разведочной радиометрии начались в 40-х годах в связи с резко возросшим интересом к урановому сырью как источнику получения атомной энергии. К этому времени в результате ранее выполненных исследований были заложены основы для дальнейшего развития в СССР радиометрических методов (полевой  $\gamma$ -съемки, эмалационно-радонового и торонного методов,  $\gamma$ -каротажа, лабораторных методов исследований радиоактивности горных пород и руд и др.).

Однако методика и техника этих работ в те годы были несовершенными и базировались в основном на использовании листочковых, штыковых и петельных электрометров с ионизационными камерами.

Вместо с тем уже в начале 30-х годов в СССР были сделаны первые шаги по использованию при  $\gamma$ -каротаже и лабораторных радиометрических измерениях газонаполненных счетчиков — более чувствительных, чем полупроводниковые камеры приемников радиоактивных излучений. В 1946 г. на базе этих счетчиков началась разработка аппаратуры, а затем и теории аэрогамма-метода — наиболее скоростного из всех радиометрических методов, который уже к середине 50-х годов стал ведущим при оценке урановосности больших площадей преимущественного развития открытых и ослабленных ореолов рассеяния радиоактивных элементов. Широкое внедрение этого метода привело в конечном счете к общему повышению эффективности и ускорению процесса поисков урановых руд.

Одновременно создавалась и непрерывно совершенствовалась наземная (лабораторная, полевая, каротажная и автомобильная) радиометрическая аппаратура на газонаполненных счетчиках, а также методика радиометрических работ. В 1946—1947 гг. в СССР был предложен и испытан метод  $\gamma$ -обработки урановых руд в естественном залегании по разностному эффекту, измеряемому с помощью специальных экранов.

Этот метод в настоящее время широко используется шаряду с  $\gamma$ -каротажем для количественной оценки урановых руд и получения исходных данных к подсчету их запасов.

Важным этапом в развитии разведочной радиометрии и ядерной геофизики в целом явилось освоение в начале 50-х годов сцинтилляционных счетчиков, обладающих рядом существенных преимуществ по сравнению с газонаполненными счетчиками.

На базе сцинтилляционных детекторов в дальнейшем была создана сорийная высокочувствительная и более совершенная лабораторная и полевая радиометрическая аппаратура (поисковый радиометр СРН-2, каротажный радиометр ПРКС, эмалометр ЭМ-6 и др.).

При этом с научно-техническим прогрессом в области радиоэлектроники, методов экспериментальной ядерной физики и радиометрического приборостроения, существенно совершенствуются не только приемники излучений, но и усилительно-регистрирующие схемы и другие узлы радиометрической аппаратуры.

В последние годы в СССР разрабатывается и внедряется переносная (пешеходная), автомобильная, каротажная и самолетная гамма-спектрометрическая сплитлизионная аппаратура (аэрогеофизическая станция АСГ-48, полевой радиометр СП-3 и др.), существенно расширяющая возможности  $\gamma$ -метода при оценке аномалий и позволяющая производить раздельные количественные определения концентраций урана (по радию), тория и калия в горных породах и рудах с самолета (вертолета), на земле и в скважинах.

Параллельно с внедрением этой аппаратуры разрабатывается методика  $\gamma$ -спектральной съемки для геолого-геохимического картирования и прогнозирования площадей под поиски урана.

В ходе развития методов разведочной радиометрии определяющее значение при поисках и разведке урана приобрел  $\gamma$ -метод в основных его модификациях: воздушные (самолетные и вертолетные) и наземные (пешеходные и шуровые)  $\gamma$ -съемки и  $\gamma$ -каротаж. Переход к  $\gamma$ -спектрометрическим измерениям еще более усилит ведущую роль  $\gamma$ -метода.

Вместе с тем в определенной мере утратила свое первоначальное значение как самостоятельный поисковый метод эманационная съемка, которая применяется теперь в сравнительно небольших объемах, в основном при детальном исследовании.

Для повышения глубины радиометрических методов поисков на площадях, перекрытых рыхлыми отложениями мощностью до 10—20 м, успешно разрабатывается и внедряется методика глубинных радиометрических поисков. Отличие этой методики состоит в погружении приемника  $\gamma$ -излучения с помощью специально разработанных технических средств (самоходные высокопроизводительные буровые установки типа СУП и др.) до представительного горизонта максимального развития ореолов рассеяния урана. Впервые в практике поисков урана в указанных установках осуществляется непрерывная регистрация  $\gamma$ -излучения горных пород в процессе бурения.

В связи с тем что из большого числа аномалий, выявляемых радиометрическими методами, при дальнейшей проверке горными работами лишь незначительная часть оказывается связанной с концентрированными рудными телами, в последнее время при поисках гидротермальных месторождений урана наряду с радиометрией широко используется изучение ореолов сопутствующих урану элементов (свинца, молибдена, никеля, мышьяка и др.).

Изучение ореолов элементов-спутников в комплексе с геологоструктурными исследованиями позволяет в ряде случаев проводить поиски не выходящих на дневную поверхность урановых рудных тел. Для расшифровки и оценки радиометрических аномалий в последние годы разрабатывается группа новых методов, основанных на изучении ореолов рассеяния радиоактивных и стабильных изотопов семейств урана — радия, тория и актиноурана. К этой группе методов относятся: свинцовый метод, метод изотопных отношений радиоактивных элементов, актиноновый метод. За последние годы

получил научное обоснование и прошел производственную проверку при поисках урана гелловый метод, основанный на выявлении ореолов рассеяния гелия в почвенном воздухе, горных породах и природных водах, омывающих рудные тела. Этот метод в благоприятной для его применения геологической обстановке может оказаться одним из наиболее глубоких в поисковом комплексе на уран.

Однако перечисленные выше методы еще не вышли из стадии научно-исследовательской разработки и не обеспечены серийной аппаратурой, в связи с чем в настоящей работе не дается их описания. Повышению глубины поисков способствует применение в комплексе геологопоисковых работ по урану наряду с глубинными вариантами радиометрических съемок также литохимических, радио-гидрогеологических, газовых и общегеофизических методов.

На этапе выделения перспективных площадей теперь все более широко используются региональные гравиметрические и аэромагнитные карты.

При подготовке площадей под поиски урана для установления литологии подстилающих пород и мощности рыхлых отложений применяется электроразведка на постоянном и переменном токе (профилирование и ВЭЗ) и магниторазведка. Особенно важную роль играют методы общей геофизики при решении задач специализированного геологического картирования и в частности для выявления и прослеживания рудоконтролирующих структур, перекрытых мощным рыхлым покровом. Накопленный в СССР опыт по методике глубоких поисков рудных месторождений обобщен в сборнике статей под редакцией А. Н. Еремеева и А. Н. Соловова (1963).

Изложенные в этой книге отправления положения и методы исследований полностью справедливы и для глубоких поисков радиоактивных руд. Интенсивное развитие и широкое внедрение за последние 20 лет методов разведочной радиометрии в практику геологопоисковых работ по урану уже давно требуют обобщения накопленного опыта и издания монографий, руководств, инструкций и учебников в этой области.

К настоящему времени в СССР и за рубежом существует обширная литература по геологии, минералогии, геохимии, методам поисков, разведки, оценки, эксплуатации и переработки урановых руд и т. д.

В 1955—1956 гг. вышли в свет два издания книги В. И. Баранова «Радиометрия», в которой основное внимание уделено изложению физических основ радиометрических методов, применяемых при лабораторном анализе радиоактивности геологических образований и при полевых съемках.

Одновременно на английском языке вышла книга Найнинджера (Ninninger, 1955) «Минеральное сырье для атомной энергии. Руководство по разведке урана, тория и бериллия»; на немецком языке книга Цешке (Zeschke, 1956) «Поиски урановых и ториевых руд» и во Франции Комиссариатом атомной энергии издана популярная брошюра «Поиски урана. Практическое руководство для всех» (1956).

Однако перечисленные книги зарубежных авторов по своему научно-техническому уровню и форме изложения рассчитаны на широкий круг читателей и не представляют интереса для специалистов-геологов и геофизиков, непосредственно занимающихся поисками и разведкой урановых месторождений.

В 1957 г. вышла книга В. Г. Мелкова и Л. Ч. Пухальского «Поиски месторождений урана», рассчитанная на специалистов-геологов. В этой книге детально освещаются на высоком научном уровне вопросы минералогии урана и радиометрии поисков. Геологическое обоснование геофизических работ и интерпретация аномалий в ней даны недостаточно полно. В этом же году была выпущена монография коллектива авторов под редакцией А. Г. Граммакова, А. И. Никонова и Г. П. Тафеева «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», которая, судя по опубликованным отзывам, до сих пор остается наиболее полной сводкой в этой области.

В 1959 г. В. И. Смирновым опубликован краткий критико-библиографический обзор книг по поискам и разведке месторождений урана, изданных в СССР и за рубежом в 50-х годах.

Обзор состояния методов поисков урана за рубежом по материалам, опубликованным в основном за период 1954—1957 гг., сделал Н. А. Титовой в статье «Организация и методика поисковых работ на уран в капиталистических странах» (1959).

Позднее появились еще четыре фундаментальные работы: Д. Я. Суражского «Методы поисков и разведки месторождений урана» (1960), А. А. Якишина «Поиски и разведка урановых месторождений» (1961), В. И. Красникова «Геологические предпосылки поисков месторождений урана» (1964), Г. Ф. Новикова «Радиоактивные методы разведки» (1965).

Первая из них рассчитана в основном на инженеров-геологов; вторая является учебным пособием для студентов геологической специальности; третью следует рассматривать как тесно связанную с настоящей работой, предвзначенной для широкого круга работников геологической службы, а четвертая служит учебником для студентов-геофизиков радиометрической специализации.

Из числа популярных брошюр, рассчитанных на привлечение к поискам месторождений урана и тория широких слоев населения, следует выделить работу И. С. Ожигинского, П. В. Соколова и Б. Я. Юфа «Как искать урановые руды» (1959).

Одновременно с монографическими трудами, охватывающими весь комплекс методов, применяемых при поисках и разведке урана, или только ведущие радиометрические и геохимические методы, издавались также монографии, руководства и инструкции по отдельным методам, видам работ или отдельным вопросам рассматриваемой проблемы (Юфа, 1958; Овчинников, Иващенко и др., 1962; Якубович, 1960; Бондарев и др., 1964; «Использование ореолов рассеяния урана и элементов-спутников при поисках и разведке гидротермальных урановых месторождений», 1964; «Аэрогамма-спектрометрический метод поисков месторождений урановых руд», 1967).

После 1958 г. в СССР издан ряд сборников и большое количество журнальных статей по вопросам рудной и разведочной радиометрии, в том числе по методам поисков и разведки радиоактивных руд.

Таким образом, за последние 10—15 лет литература по методам поисков и разведки урановых руд существенно пополнилась, однако до сих пор еще нет достаточно полных монографий, охватывающих всю проблему в целом и рассчитанных на специалистов-геологов и геофизиков.

Сопоставление опубликованных в СССР и за рубежом материалов по методам поисков и разведки урановых руд показывает, что в научно-методическом и научно-техническом отношении эти работы в СССР находятся на высоком уровне.

Более того, в разработке, внедрении и дальнейшем усовершенствовании ряда важнейших направлений перспективным является приоритет советских ученых (разработка и применение методов  $\gamma$ -каротаж и  $\gamma$ -опробования для подсчета запасов урана, ториевый, актиноновый и гелиевый методы, литохимические методы поисков и др.).

В создании и развитии радиометрических методов в СССР применительно к задачам поисков и разведки радиоактивных руд наиболее значительную роль сыграли работы В. И. Баранова, Ю. И. Булатевича, Г. В. Горшкова, А. Г. Грамакова, А. Н. Еремеева, А. К. Овчинникова, Л. Ч. Пухальского, Г. С. Смирнова, М. М. Соколова, В. Л. Шапквы, А. Л. Якубовича и многих других.

В развитие геохимических поисков, основанных на изучении полей и ореолов рассеяния радиоактивных и сопутствующих им элементов, наиболее значительный вклад внесли исследования Н. В. Квашневской, В. Г. Мелькова, А. И. Перельмана, А. П. Соловова, Н. Н. Сочевапова, Ю. В. Шаркова и др.



## РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

# МЕТОДЫ



### ГЛАВА I

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОИСКОВЫХ МЕТОДОВ

Современные методы поисков принято делить на пять групп:

1) визуальные методы, основанные на непосредственных наблюдениях прямых и косвенных поисковых признаков полезных ископаемых;

2) геологические методы, основанные на геологическом картировании, изучении условий образования и размещения месторождений и геолого-минералогических исследованиях каменного материала;

3) геофизические методы, в основе которых лежит изучение физических полей с целью решения различных структурно-картировочных задач и выявления аномалий, обусловленных наличием месторождений или сопутствующих им особенностей геологического строения исследуемой площади;

4) геохимические методы, основанные на изучении закономерностей распределения искоемых и сопутствующих им элементов в горных породах, природных водах, растениях и почвенном воздухе;

5) горно-буровые методы, основанные на применении поискового бурения и поисковых горных выработок.

Визуальные методы, несмотря на свои ограниченные геологические возможности, сыграли важную роль в начальный период создания минерально-сырьевой базы урана. С помощью этих методов были открыты почти все месторождения, являвшиеся поставщиками урановых руд до 1945—1950 гг. Визуально была обнаружена урановая минерализация в Яхимове — первом урано-радиевом руднике в мире, так же как и на других месторождениях цветных и редких металлов в Западной Европе, где впоследствии было установлено

промышленное урановое оруденение. Визуально с самолета было открыто широко известное месторождение Эльдorado на берегу Большого Медвежьего Озера в Канаде (по красным полосам обогащенных гематитом ураноносных жил на сером фоне вмещающих гнейсов). По ярко окрашенным вторичным минералам урана на рудных выходах открыто знаменитое месторождение Шинколовбе в Кантаве и многие карботитовые месторождения плато Колорадо. Все известные с довоенного времени урановые месторождения в СССР также открыты визуальными методами.

В настоящее время эти методы в значительной мере утратили поисковое значение, хотя они остаются обязательным элементом полевых геологических исследований и в благоприятной обстановке могут привести к открытию новых месторождений.

Геологические методы поисков следует рассматривать в широком аспекте — как научную основу всех поисковых работ, начиная с выбора благоприятных площадей для поисков и кончая оценкой выявленных аномалий и рудопроявлений. Основным методом геологических исследований при поисках являются геологические съемки, в процессе которых устанавливаются благоприятные сочетания магматогенных, структурных, литолого-фациальных и других факторов, что позволяет соответствующим образом ориентировать поисковые работы и облегчает выявление новых месторождений. Анализ геологической обстановки с выделением перспективных площадей можно производить и по готовым материалам ранее проведенных исследований. Вопросы геологического обоснования поисковых работ на уран рассмотрены в первой части работы (Красников, 1964). Методика геологической интерпретации и оценки выявляемых аномалий освещается ниже при описании отдельных поисковых методов и особенностей их комплексного применения в зависимости от типа поисковых месторождений.

Шлиховые съемки, относящиеся к геолого-минералогическим методам, для поисков собственно урановых месторождений непригодны ввиду физической и химической неустойчивости первичных и вторичных минералов урана. С помощью шлихового метода успешно выявляются комплексные урано-торпьевые месторождения, в частности монацитовые россыпи, а также урансодержащие тантало-ниобиевые и другие редкометалльные месторождения. При поисках собственно урановых месторождений в последнее время вместо шлихового метода применяется аналогичный ему метод уранометрической съемки по потокам рассеяния.

Геофизические методы исследования многочисленны и разнообразны. Для поисков урановых месторождений ведущее значение имеют радиометрические методы, основанные на измерении интенсивности естественных радиоактивных излучений горных пород и руд. Эти методы широко используются для непосредственного обнаружения урановых месторождений. При решении вспомогательных задач, связанных с поисками и разведкой урановых месторождений (геологическое картирование, прослеживание рудоконт-

ролирующих структур, определение мощности рыхлого покрова и т. д.), используются методы общей геофизики (магниторазведка, электроразведка, гравиразведка и др.), аналогично тому как это делается при поисках и разведке других рудных месторождений.

Основными радиометрическими методами являются воздушные, наземные (пешеходные и автомобильные)  $\gamma$ -съемки. При нарушении радиоактивного равновесия в сторону недостатка радия, что характерно, в частности, для почв некоторых районов гумидной зоны, пешеходные поиски производятся путем комбинированных  $\gamma$ - и  $\beta$ -съемок. Поисковые возможности всех перечисленных радиометрических методов ограничиваются выявлением легкооткрываемых месторождений урана.

Аэрогамма-съемка применяется для поисков урановых месторождений на больших площадях, характеризующихся преимущественным развитием открытых ореолов нормальной интенсивности, а также для предварительной оценки перспективности малоисследованных территорий. Основными достоинствами этого метода являются высокая производительность, позволяющая быстро опосковывать большие площади, и высокая эффективность поисков при благоприятной геологической и природной обстановке. К недостаткам метода относятся его малая глубинность, возможность пропуска месторождений с ограниченными размерами ореолов у дневной поверхности.

Наземная гамма-съемка наряду с аэрогамма-съемкой является основным методом поисков радиоактивных руд на площадях категории I (Красников, 1959), характеризующихся развитием открытых ореолов нормальной интенсивности. При повышенной чувствительности приборов и устойчивом низком фоне окружающих пород эти методы применяются, хотя и с несравненно меньшим успехом, на площадях категории II, характеризующихся развитием ослабленных ореолов рассеяния. Наиболее распространенным методом наземных радиометрических поисков являются пешеходные  $\gamma$ -съемки, отличающиеся простотой и портативностью применяемой аппаратуры и возможностью вести работы с любой степенью детальности, включая непрерывное наблюдение за радиоактивностью пород по всему профилю (маршруту) и сплошное обследование изучаемой площади.

При переходе к измерениям в закопашках или шпурах и к так называемым «плужным»  $\gamma$ -съемкам их глубинность, а в последнем случае и производительность несколько повышается.

Плужные и автогамма-съемки практикуются главным образом в степных, лесостепных, полупустынных и предгорных районах, доступных для тракторов и автомобилей повышенной проходимости. В горных и таежных районах возможны лишь рекогносцировочные автогамма-съемки в пределах имеющейся дорожной сети. Низкий порог чувствительности автомобильных  $\gamma$ -радиометров обеспечивает в благоприятных условиях возможность обнаружения слабых аномалий.

Радиометрические методы находят также широкое применение при исследовании поисковых и разведочных скважин ( $\gamma$ -каротаж) в горных выработках ( $\gamma$ -съемки разных видов и масштабов, радиометрическое опробование в забое, вагонетках и т. д.), а также при лабораторных исследованиях каменного материала, водных, растительных и других проб.

Геохимические методы поисков урановых месторождений включают:

1) литохимические методы, основанные на выявлении первичных и вторичных ореолов и потоков рассеяния урана и элементов-спутников, развивающихся вблизи урановых месторождений в литосфере (в коренных породах и рыхлых отложениях);

2) гидрохимические методы, основанные на выявлении ореолов рассеяния месторождений в гидросфере (в подземных водах и открытых водотоках);

3) биогеохимические методы, основанные на выявлении ореолов рассеяния месторождений в растительных и животных организмах биосферы (главным образом в высших растениях);

4) атохимические или газовые методы, основанные на выявлении газовых ореолов месторождений.

К литохимическим методам относятся:

а) поиски по потокам рассеяния в аллювиальных отложениях современной гидросети (метод донных отложений); б) поиски по открытым вторичным ореолам рассеяния в приповерхностной части элювиально-делювиального покрова; в) поиски по первичным ореолам рассеяния в коренных породах.

При глубинных поисках урановых месторождений получило распространение литохимическое опробование на уран и элементы-спутники коры выветривания (погребенные ореолы рассеяния), а на участках, лишенных коры выветривания, аналогичное опробование коренных пород из забоя поисково-картировочных скважин (первичные ореолы).

Важной особенностью металлометрических методов является комплексное изучение ореолов и потоков рассеяния не только по урану, но и по другим элементам (молибден, свинец, мышьяк, никель, ванадий, фосфор и т. д., в зависимости от типа месторождений). Это дает возможность проведения комплексного изучения территории, что особенно важно при глубинных поисках для получения максимальной информации из пробуренных скважин.

Поэтому производство спектральных анализов на элементы, типичные для исследуемой рудной провинции, имеет важное значение, даже если они и не являются элементами-спутниками для данного типа уранового оруденения.

Метод опробования донных отложений применяется в основном на ранних стадиях поисков в районах с хорошо развитой гидросетью.

Гидрохимические поиски урановых месторождений практикуются в довольно широких масштабах, но эффективность их явно недоста-

точка, и вся методика этих работ требует значительных усовершенствований. Основным преимуществом гидрохимического метода является повышенная глубинность, достигающая в благоприятных условиях нескольких сотен метров. Такие условия, в частности, имеют место в горных районах с резко расчлененным рельефом и в пределах древних денудационных с омоложенной гидросетью, прорезающей рыхлый покров и выводящей на поверхность гидрохимические ореолы погребенных месторождений. Метод может быть применен также при поисках слесых и погребенных месторождений с вскрытием ореолов буровыми скважинами. Эта модификация гидрохимического метода до сих пор остается слабо разработанной и требует длительной подготовки скважины перед отбором гидрохимической пробы, что резко ограничивает возможности ее применения.

Биогеохимические методы успешно использовались при поисках слесых карбонатных залежей на плато Колорадо по повышенным содержаниям урана, ванадия и иногда солей в растениях с глубокой корневой системой. Довольно широко эти методы применяются также в северных странах — Финляндии, Швеции, Норвегии, Канаде при поисках различных, преимущественно сульфидных, рудных месторождений под акрапирующими ледниковыми, аллювиальными и другими рыхлыми отложениями мощностью до 10—15 м. Положительные результаты, очевидно, могут быть получены также в зоне пустынь при мощности рыхлого покрова до 20—30 м и во влажных тропиках с мощной корой выветривания. Таким образом, биогеохимические методы должны рассматриваться как один из перспективных способов опосредованного поиска площадей категорий II и III, характеризующихся развитием ослабленных и неглубоко погребенных ореолов рассеяния. В Советском Союзе этот метод применяется в относительно небольших объемах.

Из газовых методов при детальных поисках радиоактивных руд и основном применяется только эмпацционная съемка, основанная на выявлении ореолов рассеяния радона и торона в почвенном воздухе.

Благодаря высокой чувствительности измерений и более значительным размерам газовых ореолов по сравнению с литохимическими, эмпацционная съемка обладает повышенной глубинностью. В благоприятных условиях (при отсутствии в рыхлом покрове экранирующих водонепроницаемых пропластков) даже обычная модификация метода с отбором проб почвенного воздуха на глубине 0,8—1 м дает положительные результаты при мощности рыхлого покрова до 5—7 м.

Определенные перспективы, по-видимому, имеет гелиевый метод поисков урановых месторождений, основанный на выявлении ореолов рассеяния гелия в почвенном воздухе и природных водах, омывающих рудные тела. Эти ореолы теоретически могут быть значительно более устойчивыми, обширными и глубинными (особенно водные) по сравнению с ореолами рассеяния других продуктов радио-

активного распада. Гелиевый метод находится в стадии опытно-производственной проверки.

**Горно-буровые методы поисков.** В последнее время в связи с проблемой глубинных поисков труднооткрываемых месторождений начинают приобретать все большее значение буровые работы. Из вспомогательного средства при поисках они превращаются в самостоятельный поисковый метод, в основе которого лежит систематическое разбуривание геологически благоприятных площадей по сеткам, обеспечивающим выявление слепых и погребенных месторождений разных типов.

Основными видами поискового бурения являются:

1) проходка мелких вертикальных скважин глубиной от нескольких метров до первых десятков метров по рыхлым отложениям на площадях категории II и III (методом задавливания или вибробурения);

2) проходка вертикальных скважин глубиной от нескольких десятков до первых сотен метров по осадочным породам для выявления слепых экзогенных месторождений; это бурение желательно вести без промывки (продувкой сжатым воздухом) с тем, чтобы не осложнять последующие исследования в скважинах, в частности, их гидромеханическое опробование.

Из новых методов, разрабатываемых в последние годы, следует отметить: изотопно-свинцовый метод, основанный на изучении ореолов с аномальным содержанием радиогенного свинца вокруг радиоактивных рудных тел; методы, в основе которых лежит изучение ореолов с аномальным изотопным соотношением радиоактивных элементов ( $\frac{U^{II}}{U^I}$ ,  $\frac{Th X}{Ra}$ ,  $\frac{Ra}{Ms Th_1}$ ,  $\frac{Ac X}{Ra}$  и др.). Однако поисковое значение этих новых методов пока еще не вполне выяснено.

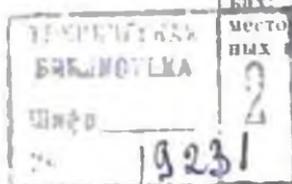
Сводная характеристика рассмотренных поисковых методов дана в табл. 1.

Таблица 1

**Особенности в области применения отдельных методов при поисках урановых месторождений**

Поисковые методы	Основные особенности метода	Области применения метода при поисках урановых месторождений: главные (а), второстепенные (б)
1	2	3
<i>Визуальные</i>	Возможность выявления месторождений только по визуально наблюдаемым поисковым признакам (рудным выходам, макроореолам, видимой рудной минерализации и т. п.)	Геологическое съёмки всех видов и масштабов, попутные наблюдения при радиометрических и геолого-минералогических поисках, обследование аномальных участков, выявленных другими методами

Поисковые методы	Основные особенности метода	Области применения метода при поисках урановых месторождений: главные (а), второстепенные (б)
1	2	3
<i>Геологические</i>	Необходимость наличия определенных представлений об условиях образования и размещения искомого месторождения и предварительного анализа с этих позиций геологической обстановки изучаемых площадей	Обоснование постановки поисковых работ на уран в определенных районах, выбор перспективных площадей, геологический прогноз возможного оруденения. Геологическая интерпретация прямых и косвенных поисковых признаков, выявленных другими методами
<i>Геоблизические</i> Аэросъемка	Максимальная быстрота освоения обширных территорий, в том числе труднодоступных районов (за исключением высокогорных). Сочетание аэромгнитной и аэрофотосъемок с аэроизлучательными наблюдениями. Возможность предварительной детализации и разбраковки выявляемых аномалий с воздуха. Малая глубинность метода, возможность пропуска месторождений и недостаточная надежность перспективной оценки изучаемых территорий, особенно в гумидных условиях.	а. Предварительные поиски в масштабе 1 : 25 000 и мельче в новых районах с преимущественным развитием открытых ореолов нормальной интенсивности б. Детализация перспективных площадей в промышленных рудных районах, недоступных для аэрогамма-поисков, в масштабе 1 : 10 000
Автогамма-съемка	Максимальная производительность по сравнению с другими наземными радиометрическими методами. Ограниченное применение из-за трудной проходимости автомашин. Малая глубинность метода.	а. Предварительные и детальные поиски в масштабе 1 : 25 000—1 : 10 000 в крупных на перспективных площадях категорий I и II, выделяемых по данным аэрогамма-съемок, и в районах с известным урановым оруденением б. Рекогносцировочные поиски в новых районах в пределах имеющейся дорожной сети
Пешийходная съемка	Широкий диапазон условий применения по детальности исследований, доступности изучаемых объектов и т. д. Малая глубинность и сравнительно невысокая производительность метода.	а. Наземные поиски всех масштабов на площадях категории I и частично категории II б. Детализация аномальных участков, выявленных другими методами. Изучение радиоактивности в горных выработках; разведочные работы на месторождениях других полезных ископаемых



Поисковые методы	Основные особенности метода	Области применения метода при поисках урановых месторождений главные (а), второстепенные (б)
1	2	3
<p>γ-Каротаж в бурках и скважинах, проходимых вручную, с помощью механических буров и самоходных буровых установок</p>	<p>Повышенная глубинность, пропорциональная глубине каротируемых бурок (скважин)</p>	<p>а. Глубинные поиски труднооткрываемых месторождений всех типов</p>
<p>Методы общей геофизики</p>	<p>Возможность значительного увеличения глубинности исследований и широкий комплекс применяемых методов</p>	<p>б. Изучение аномалий, выявляемых другими методами (объемная геометризация радиоактивных ореолов в рыхлом покрове для уточнения местонахождения рудных образований)</p>
<p><i>Геохимические</i> Литохимическая съемка а) по потокам рассеяния урана и сопутствующих ему элементов в гидросети</p>	<p>Повышенная глубинность при соответствующем эрозионном расчленении глубoko промываемых структур. Простота и невысокая стоимость работ, возможность быстрого освоения обширных территорий, в том числе в труднодоступных районах. Стойкость геологической интерпретации выявляемых аномалий</p>	<p>Решение структурно-картировочных задач при поисках и разведке урановых месторождений (расчленение геологического разреза по поверхности и на глубину, изучение рельефа кристаллического фундамента, определение мощности рыхлого покрова, выявление и прослеживание зон тектонических нарушений, рудоуправляющих структур, рудоносных горизонтов и т. п.)</p>
<p>б) по открытым вторичным ореолам рассеяния</p>	<p>Использование геохимических критериев для оценки выявляемых аномалий на основе изучения парагенетических ассоциаций элементов в рудах и ореолах урановых месторождений разных типов</p>	<p>Рекогносцировочные исследования и предварительные площадные поиски мелких и средних масштабов в комплексе с геологическим картированием, радиогидрогеологическими, наземными и аэрометрическими съемками</p>
		<p>Метод с использованием элементов-спутников широко применяется при оценке радиометрических, а также электропроводных и магнитных аномалий в случае фиксации последних рудоуправляющих или рудоуправляющих структур</p>

Посконовые методы	Основные особенности метода	Области применения метода при поисках урановых месторождений: главные (а), второстепенные (б)
1	2	3
в) по первичным ореолам	Комплексное изучение ореолов урановых месторождений (объемная геометризация, вещественный состав, зональность)	Поиски слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях, поиски новых, не вскрытых эрозией месторождений всех типов
г) по погребенным ореолам	Комплексное изучение погребенных ореолов	Поиски погребенных месторождений и рудных тел в комплексе с другими методами
Гидрохимическая съемка	Повышенная глубинность при соответствующем расчленении рельефа и наличии глубоко промываемых структур. Трудность геологической интерпретации выщелоченных аномалий и последующего перехода от аномалий к месторождениям	а. Глубинные поиски труднооткрываемых месторождений всех типов б. Мелко- и среднемасштабные съемки в комплексе с другими методами для перспективной оценки новых районов
Биогеохимическая съемка	Повышенная глубинность, определяемая глубиной проникновения в групп корневой системы опробуемых растений и размерами вторичных литохимических и гидрохимических ореолов над рудами. Более высокая трудоемкость и стоимость поисков на единицу площади по сравнению с другими методами	Поиски слепых и погребенных месторождений, залегающих на глубине до 20—30 м от поверхности
Газовые методы а) эманационная съемка	Высокая чувствительность измерений, возможность быстрого определения природы радиоактивности (урановая, ториевая). Ограниченное применение при высоком уровне грунтовых вод, в районах развития вечной мерзлоты и глыбчатых развалов. Небольшая глубинность обычной модификации метода	а. Детальные поиски на площадях категорий I в частицах категорий II с невысоким уровнем грунтовых вод (преимущественно в районах с известным урановым оруденением) б. Изучение аномалий, выявляемых другими методами (определение природы радиоактивности, геометризация ореолов и пр.)

Продолжение табл. 1

Попсовые методы	Основные особенности метода	Области применения метода при поисках урановых месторождений: главные (а), второстепенные (б)
1	2	3
<p>б) гелневая съемка</p> <p><i>Горно-буровые</i></p>	<p>Повышенная глубинность при благоприятных условиях применения</p> <p>Массовое высокопроизводительное бурение поисковых скважин по сеткам, обеспечивающим выявление слепых и погребенных ореолов рассеяния месторождений. Комплексное геологическое, геофизическое и геохимическое исследование скважин</p>	<p>Опытно-производственные глубинные поиски мелких и средних масштабов</p> <p>Глубинные поиски слепых и погребенных месторождений всех типов</p>

Перечисленные в табл. 1 методы применяются как самостоятельно, так и в различных сочетаниях, поскольку в сложных природных условиях поиски и в особенности оценка выявленных аномалий, как правило, не могут быть выполнены одним методом.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ПОИСКОВ

### 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

За последние десятилетия созданы и успешно развиваются такие принципиально новые отрасли геологической науки как поисково-разведочная и руднично-промышленная радиометрия (ядерная геофизика), радиогидрогеология, радиогеохимия, ядерная геохронология и др.

За сравнительно короткий период после Второй мировой войны в связи с резко возросшими потребностями в урановом сырье радиометрические методы значительно продвинулись в своем развитии и играют теперь ведущую роль при поисках и разведке урана.

Наряду с существенным усовершенствованием ранее известных методов на основе использования новейших достижений радиоэлектроники и ядерной физики разработана и внедрена в производство разнообразная более совершенная радиометрическая аппаратура на сцинтилляционных счетчиках и полупроводниках. Создан ряд новых скоростных, более эффективных и обладающих повышенной глубиной методов поисков и количественной оценки уранового оруденения: азрогамма-спектральный метод, автомобильный  $\gamma$ -метод,  $\gamma$ -опробование урановых руд в естественном залегании и шуровое  $\gamma$ -опробование, количественный  $\gamma$ -каротаж подсчета запасов урана, глубинные эманиционные поиски и  $\gamma$ -поиски с применением самоходных буровых установок, пешеходный  $\gamma$ -спектральный метод, методы лабораторного радиометрического спектрального анализа и экспресс-анализа добытых руд (на транспортерах, в вагонетках и других емкостях) и многие другие.

Все радиометрические методы, широко применяемые при поисках и разведке урановых руд, основаны на изучении радиоактивных ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )-излучений, создаваемых рудными выходами и связанными с ними радиоактивными (обломочно-солевыми, водными, газовыми и биогеохимическими) ореолами. В природных условиях ореолы и потоки рассеяния радиоактивных элементов в твердой, жидкой и газообразной фазах в большинстве случаев взаимосвязаны и поэтому излучение, измеряемое на месте залегания пород, обычно обусловлено совокупным действием различных видов ореолов.

По условиям производства работ радиометрические методы разделяются на следующие четыре группы:

- 1) полевые,
- 2) лабораторные,
- 3) методы исследований скважин,

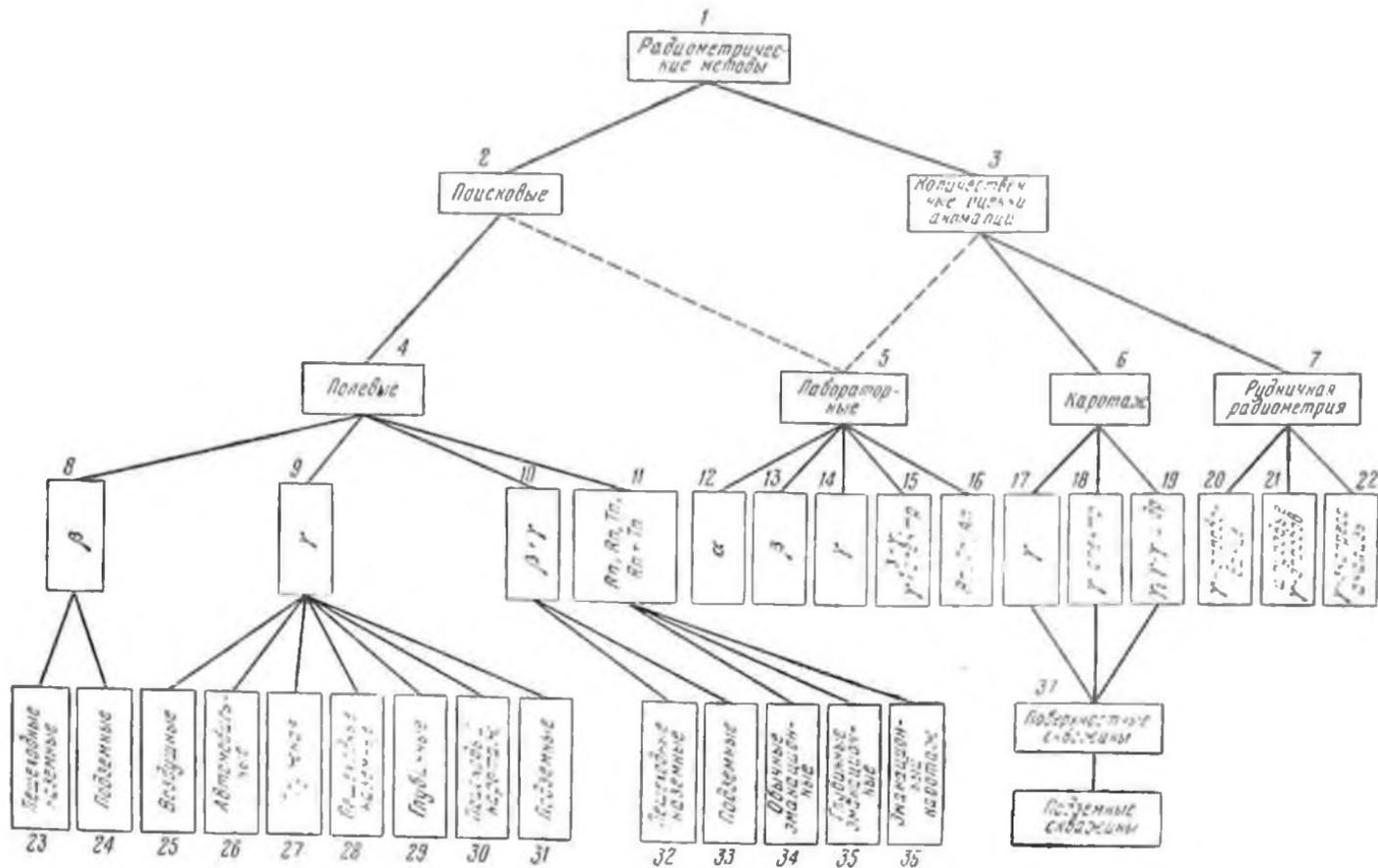


Рис. 1. Схема классификации радиометрических методов и видов работ

Первый геологический ряд — раздел геологических изменений, второй ряд — предметная область, предметный метод; Третий ряд — условия проведения работ; четвертый ряд — используемый тип и течения или измерения величин; пятый ряд — условные наименования методов и способов транспортировки измерительного прибора.

1 — радиометрические методы; 2 — поисковые методы; 3 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 4 — поисковые методы; 5 — аналитические методы; 6 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 7 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 8 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 9 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 10 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 11 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 12 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 13 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 14 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 15 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 16 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 17 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 18 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 19 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 20 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 21 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 22 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 23 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 24 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 25 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 26 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 27 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 28 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 29 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 30 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 31 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 32 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 33 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 34 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 35 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 36 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 37 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения; 38 — методы подсчетной оценки аномалий и уранового оруденения.

4) методы рудничной радиометрии.

По условиям измерений и способу транспортировки измерительного прибора (установки, станции) в процессе наблюдений выделяют следующие виды радиометрических поисков:

- 1) воздушные (аэрометрические);
- 2) наземные — пешеходные и автомобильные;
- 3) подземные (в подземных горных выработках).

В отличие от других видов геофизических исследований радиометрические поиски на поверхности водных бассейнов (морей, озер, рек) не производится вследствие того, что слой воды толщиной около 1—1,5 м в 10—100 раз ослабляет даже наиболее проникающую часть естественного  $\gamma$ -излучения горных пород с энергией до 3 Мэв.

Для наглядности на рис. 1 приведена схема классификации радиометрических методов и видов радиометрических работ, применяемых при поисках и количественной оценке выявляемых аномалий и уранового оруденения, построенная с учетом основных из перечисленных выше признаков.

Как видно из рис. 1, в настоящее время имеется достаточно разносторонний комплекс радиометрических методов, позволяющий осуществлять поиски и разведку урановых месторождений в самых разнообразных условиях (с воздуха, по дневной поверхности и под землей).

Следует, однако, подчеркнуть, что основные из применяемых радиометрических методов и приборов фиксируют суммарный эффект радиоактивного излучения от всех присутствующих в горных породах радиоактивных элементов, в котором преобладает влияние наиболее короткоживущих продуктов распада эмазаций.

Поэтому эти методы по существу являются не прямыми, а косвенными методами поисков и разведки урана по продуктам распада радона. В связи с этим нарушения радиоактивного равновесия в урано-радиевом ряду и присутствие в породах наряду с ураном тория и калия создают известные

трудности для поисковиков и разведчиков, вызывая необходимость усложнения методики радиометрических поисков и применяемой аппаратуры. Разработка прямых и в том числе  $\gamma$ -спектрометрических методов радиометрических поисков урана является весьма актуальной задачей.

## 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ПО РАДИОАКТИВНОСТИ

В природе существует ряд элементов, ядра атомов которых неустойчивы и способны с течением времени самопроизвольно превращаться в ядра атомов других элементов. Процесс превращения сопровождается испусканием особого рода лучей, которые в зависимости от их характера называют  $\alpha$ -,  $\beta$ - или  $\gamma$ -лучами. Это явление получило название радиоактивности.

Помимо естественных радиоактивных элементов, таких, как уран, торий, радий и другие, в настоящее время с помощью ядерных реакций\*, т. е. искусственным путем, могут быть получены радиоактивные изотопы всех химических элементов.

Радиоактивные излучения обладают значительной энергией, вследствие чего прохождение их через вещество вызывает в последнем ряд изменений. Так, под действием радиоактивных лучей происходит ионизация газов, почернение слоя фоточувствительной эмульсии, флуоресценция ряда веществ и некоторые другие явления.

Поглощение радиоактивных излучений сопровождается также выделением тепла\*\*, химическими и биологическими действиями. Ионизирующее действие радиоактивных лучей позволяет с помощью ионизационных камер и счетчиков частиц и фотонов быстро измерять весьма малые концентрации радиоактивных элементов, в которых они обычно встречаются в земной коре.

Ядра радиоактивных элементов могут испытывать следующие виды радиоактивных превращений (распадов).

**А л ь ф а - р а с п а д.** При этом типе распада из ядра выбрасывается  $\alpha$ -частица, представляющая собой ядро атома гелия (с массой 4 и порядковым номером 2). Ядро нового элемента, образовавшегося в результате  $\alpha$ -превращения, имеет порядковый номер на 2 единицы, а массовое число на 4 единицы меньше, чем у ядра исходного элемента. В периодической системе элементов такой элемент смещается на две клетки к началу таблицы.

\* Ядерные реакции — превращения атомных ядер, обусловленные их взаимодействием с элементарными частицами, излучениями или друг с другом.

\*\* Основными источниками радиогеоного тепла в земной коре являются элементы естественных радиоактивных семейств и частично К и Вb (В. И. Баранов, 1956). При поисках радиоактивных руд это явление широкого практического применения пока не получило.

**Бета-распад.** Различают  $\beta$ -распады с испусканием электрона или позитрона. При  $\beta$ -распаде с испусканием электрона один из нейтронов превращается в протон. Из ядра вылетает электрон и нейтральная частица малой массы — нейтрино. Заряд ядра увеличивается на одну единицу, массовое же число не изменяется, так как масса электрона приблизительно в 1800 раз меньше массы протона и нейтрона, и поэтому изменением массы образовавшегося элемента можно в первом приближении пренебречь. Вновь образованный элемент перемещается в периодической системе на одну клетку к концу системы. Закономерности смещения элементов при  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращениях носят название правила сдвига.

Для естественных радиоактивных элементов основное значение имеют  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращения с испусканием электрона. Эти превращения во многих случаях сопровождаются коротковолновым излучением электромагнитной природы, получившим название гамма-лучей.

**К-захват.** При К-захвате электроны вообще не испускаются, а поглощаются ядром из своей собственной К-электронной оболочки. Захват электронов возможен и из других оболочек.

Вместе с тем в горных породах и рудах под действием радиоактивных излучений могут происходить и другие различные превращения элементов, а также может возбуждаться  $\gamma$ -излучение ряда элементов. В природных условиях возможно и спонтанное деление ядер урана и тория. Однако роль этих процессов очень мала по сравнению с распадом естественно радиоактивных элементов.

Экспериментальными и теоретическими исследованиями установлено, что убыль атомов любого простого (отдельно взятого) радиоактивного вещества происходит с течением времени по показательному закону

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где  $N_0$  — число атомов в начальный момент;

$N$  — число атомов спустя время  $t$ ;

$\lambda$  — постоянная распада;

$e$  — основание натуральных логарифмов.

На рис. 2 представлены графики распада и накопления радиоактивного изотопа.

Постоянная распада характеризует скорость этого процесса и имеет размерность времени в минус первой степени, поэтому ее выражают в годах, сутках, часах, минутах или секундах в минус первой степени.

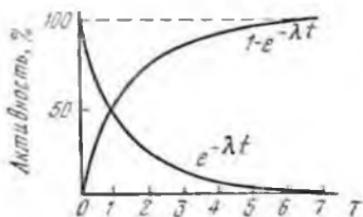


Рис. 2. Экспоненциальное накопление ( $1 - e^{-\lambda t}$ ) и распад ( $e^{-\lambda t}$ ) радиоактивного изотопа

Скорость радиоактивного превращения характеризуется также периодом полураспада  $T$  (промежуток времени, в течение которого распадается половина атомов активного вещества) и средней продолжительностью жизни атомов  $\tau$ , причем

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = 1,443T. \quad (2)$$

Как показал Э. Швейдлер в 1905 г., показательный закон радиоактивного распада является статистическим законом и соблюдается тем точнее, чем большее число атомов подвергается распаду. Вследствие этого для небольших количеств радиоактивного вещества наблюдаются значительные колебания (флюктуации) в числе частиц, испускаемых в одинаковые промежутки времени.

До настоящего времени не было обнаружено таких явлений, которые могли бы существенно повлиять на скорость распада радиоактивных элементов в условиях их существования в земной коре. Поэтому на протяжении физической жизни Земли скорость радиоактивного распада практически можно считать постоянной (Кириков и др., 1934).

При радиоактивных превращениях одни элементы переходят в другие, образуя последовательную цепь превращающихся элементов. Изложение теории радиоактивных превращений дано в работах В. И. Баранова (1956), М. Кюри (1947) и др.

### 3. ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОАКТИВНЫЕ СЕМЕЙСТВА И ЭЛЕМЕНТЫ

К естественно радиоактивным элементам относятся преимущественно тяжелые элементы, превращающиеся путем  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов. Большинство из них является изотопами элементов с порядковыми номерами от 81 (Tl) до 92 (U). Эти элементы образуют три радиоактивных семейства, которые по наименованию наиболее долгоживущего среди них элемента получили название семейств или рядов урана — радия, тория и актиноурана (или актинового ряда).

С момента образования земной коры до настоящего времени могли сохраниться лишь те радиоактивные изотопы, период полураспада которых не менее  $10^9$  лет. Наличие же в земной коре радиоактивных элементов с малыми периодами полураспада объясняется их непрерывным образованием в том или ином радиоактивном ряду. Кроме того, известны многие одиночные естественные радиоактивные изотопы, которые принадлежат элементам, не входящим в радиоактивные семейства.

На рис. 3 приведены изотопы трех радиоактивных рядов и даны характеристики скорости их распада и излучений. В кружках указаны массовые числа и периоды полураспада изотопов, а рядом — их символы, употребляемые наряду с общепринятой системой обозначения изотопов.

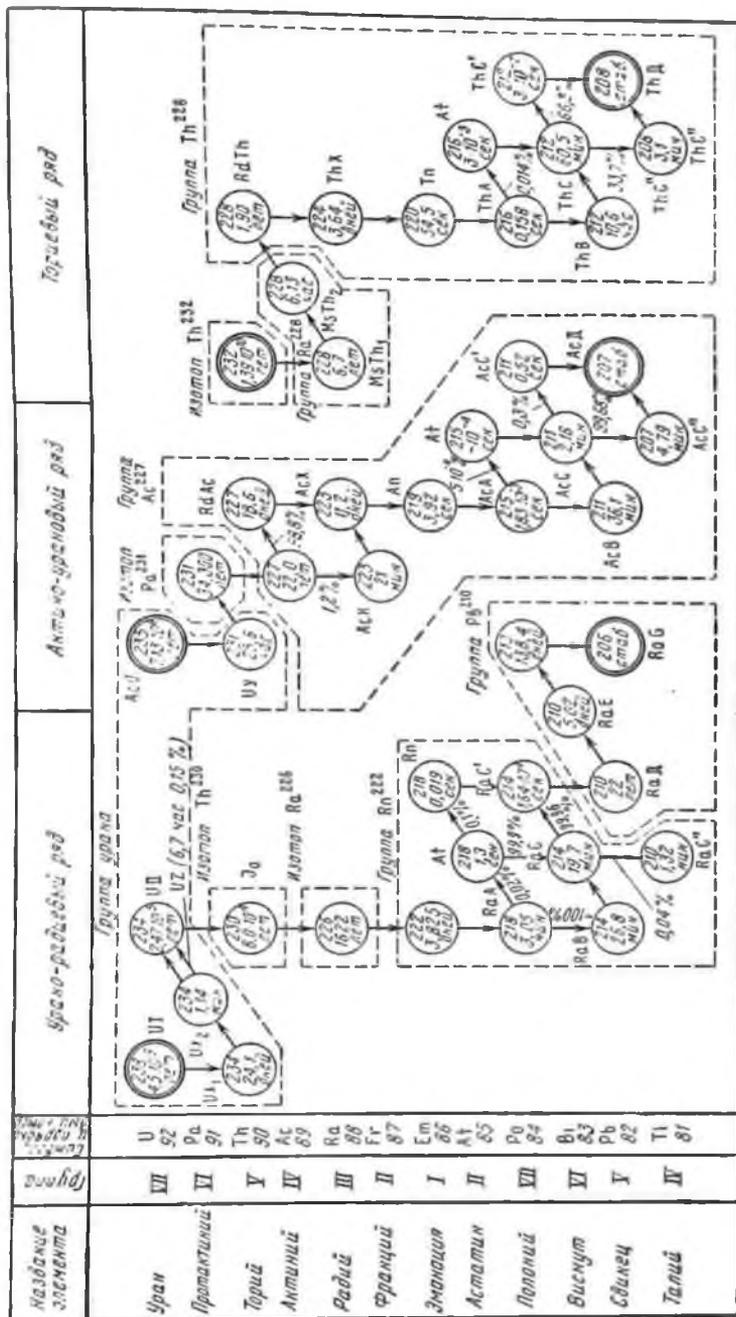


Рис. 3. Естественные радиоактивные ряды и участки возможных длительных нарушений радиоактивного равновесия

Сравнивая между собой радиоактивные семейства, нетрудно заметить ряд общих закономерностей:

1) распад во всех трех рядах заканчивается стабильными изотопами свинца;

2) во всех трех семействах имеется по одному газообразному продукту (эманация), по химическим свойствам относящемуся к благородным газам. Радиоактивные эманации — радон, торон и актинон — имеют различные периоды полураспада и являются интенсивными  $\alpha$ -излучателями, что позволяет легко определять их концентрации в почвенном воздухе и измерять их малые количества;

3) все А-продукты распадаются с испусканием  $\alpha$ -излучения и при их распаде образуются В-продукты, излучающие  $\beta$ -частицы;

4) С-продукты распадаются с испусканием  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц, образуя соответственно радиоактивные С'- и С''-продукты;

5) В- и С-продукты являются основными гамма-излучателями;

6) наибольшей энергией обладают  $\alpha$ -частицы С-продуктов распада.

В естественных условиях уран встречается в виде трех изотопов — уран I (238), уран II (234) и актиноуран (235), причем в естественной смеси имеет место следующее отношение масс трех изотопов урана:

$$U^{238} : U^{235} : U^{234} = 1 : \frac{1}{140} : \frac{1}{17000}.$$

Помимо урана, большое значение имеет радий, обладающий значительно большей активностью. Препараты радия с последующими продуктами распада используются для изготовления эталонных источников  $\gamma$ -лучей.

Торий  $\alpha$ -превращением переходит в  $MsTh_1$ , который с периодом 0,7 года превращается в  $MsTh_2$ . Эти изотопы используются для изготовления технических эталонов  $\gamma$ -излучения.

Из радиоактивных элементов, не входящих в радиоактивные семейства, наибольший интерес представляет калий. Природный калий содержит три изотопа:  ${}_{19}K^{39}$  (93,38%),  ${}_{19}K^{40}$  (0,012%) и  ${}_{19}K^{41}$  (6,61%). Из них только  $K^{40}$  является радиоактивным с периодом полураспада  $T = 1,31 \cdot 10^9$  лет, причем 88%  $K^{40}$  распадается с испусканием  $\beta$ -частиц и 12% — путем К-захвата. В первом случае в результате превращения возникает  $Ca^{40}$ , во втором  $Ar^{40}$ . Оба изотопа стабильны и накапливаются в горных породах, содержащих калий.

По экспериментальным данным различных авторов в зависимости от условий измерений 1 г калия эквивалентен по  $\gamma$ -лучам (0,16—1,35)  $10^{-10}$  г радия. Большие расхождения объясняются тем, что  $\gamma$ -спектр радия значительно сложнее, чем калия. При сравнении концентрированных препаратов  $K^{40}$  и радия получаются более высокие значения  $\gamma$ -эквивалента калия, что объясняется малым влиянием в этих условиях рассеянных лучей.

При измерениях в природных условиях, где эффект рассеянных лучей значителен,  $\gamma$ -эквивалент калия получается меньшим ( $\sim 0,65 \cdot 10^{-10}$  г Ra) \*.

#### 4. РАДИОАКТИВНОЕ РАВНОВЕСИЕ

По мере радиоактивного распада и накопления двух или более генетически связанных радиоактивных элементов (изотопов) при условии, что материнский элемент является более долгоживущим, чем продукты его распада ( $\lambda_1 < \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$ ), между ними по истечении достаточно длительного времени устанавливаются постоянные количественные соотношения или так называемое радиоактивное равновесие. При этом в зависимости от того, насколько сильно различаются периоды полураспада материнского и дочерних изотопов, радиоактивное равновесие может быть устойчивым или неустойчивым.

Устойчивое (вековое или стационарное) радиоактивное равновесие устанавливается при условии, что постоянная распада материнских ядер очень мала по сравнению с постоянными распада последующих членов ряда ( $\lambda_1 \ll \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$ ). Оно характеризуется равенством и постоянством числа распадов в единицу времени для всех присутствующих членов ряда:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots \lambda_n N_n \text{ или } \frac{N_1}{T_1} = \frac{N_2}{T_2} = \dots \frac{N_n}{T_n}, \quad (3)$$

где  $N_1, N_2 \dots N_n$  и  $T_1, T_2 \dots T_n$  обозначают соответственно числа атомов и периоды полураспада радиоактивных элементов, находящихся в состоянии радиоактивного равновесия.

При устойчивом радиоактивном равновесии убыль в числе атомов любого из промежуточных членов ряда вследствие его распада будет полностью компенсироваться образованием его из предшествующего члена ряда.

При неустойчивом равновесии количества распадающихся в единицу времени атомов материнского вещества и последующих его продуктов изменяются со временем, но их отношение сохраняется постоянным (В. И. Баранов, 1956; «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957).

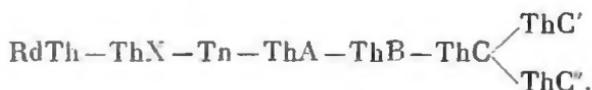
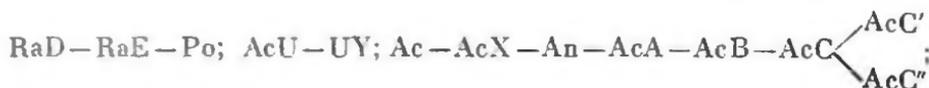
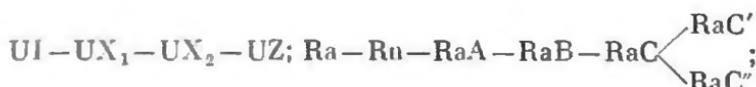
Теоретически полное радиоактивное равновесие может быть достигнуто через бесконечно большой промежуток времени, практически же устойчивое равновесие достигается с точностью до 0,1% по истечении времени  $t = 10 T$ , до 1% при  $t = 7 T$ , до 3% при  $t = 5 T$  и т. д. (где  $T$  — период полураспада наиболее долгоживущего из присутствующих продуктов распада материнского изотопа).

\* По энергии  $\gamma$ -эквивалент природного калия равен  $0,775 \cdot 10^{-10}$  г Ra.

Радиоактивное равновесие принципиально не может иметь места, если материнский изотоп является более короткоживущим, чем дочерние ( $\lambda_1 > \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_n$ ). В этом случае по истечении времени, достаточного для распада материнского изотопа, останется только смесь дочерних изотопов, распадающаяся по сложному экспоненциальному закону, приближающемуся в пределе к кривой распада наиболее долгоживущего из них.

Примером устойчивого равновесия в естественных радиоактивных рядах может служить равновесие, устанавливающееся между родоначальниками рядов (ураном, актиноураном и торием) и всеми последующими продуктами распада в плотных и мало измененных вторичными геологическими процессами радиоактивных минералах, рудах и породах достаточно древнего возраста (несколько сотен тысяч лет и более).

В естественных радиоактивных рядах могут быть выделены следующие группы радиоактивных элементов (изотопов) с относительно быстро (за промежуток времени от нескольких часов до нескольких лет) устанавливающимся равновесием:



Подвижное радиоактивное равновесие наблюдается в тех случаях, когда продукты распада отделены от родоначальников рядов и обладают сопоставимыми периодами полураспада. Так, отделенный от радия радон достигает подвижного радиоактивного равновесия со своими продуктами распада RaA, RaB и RaC приблизительно через 3 ч, а торий с ThA и активной с AcA практически всегда находятся в равновесии, для установления которого достаточно 1—2 сек после отделения эманаций.

Для того чтобы более полно охарактеризовать радиоактивное равновесие в урановом и находящемся с ним в постоянном соотношении актиноурановом рядах и объяснить наблюдаемые нарушения равновесия необходимо помимо концентрации урана ( $U^{238} + U^{235}$ ) в исследуемых геологических образованиях определять также концентрации основных из долгоживущих продуктов его распада —

$\text{Io}$  ( $\text{Th}^{230}$ ),  $\text{Ra}^{226}$ ,  $\text{Rn}^{222}$ ,  $\text{Pb}^{210}$  ( $\text{Ra D}$ ),  $\text{Pa}^{231*}$ , между которыми могут иметь место длительные смещения равновесия.

Систематическое изучение радиоактивного равновесия в геологических образованиях пока еще находится на начальном этапе.

За последние годы установлено, что вследствие известных геохимических различий в поведении урана, радия, тория и других радиоактивных элементов явления смещения радиоактивного равновесия в урановом ряду имеют более широкое распространение, чем это приписывалось ранее (А. Г. Граммаков и др., 1959; Rosholt, 1959).

При этом было показано, что нарушения радиоактивного равновесия могут наблюдаться не только между различными элементами радиоактивного ряда, но и между генетически связанными изотопами одного и того же элемента (например, между  $\text{UI}$  и  $\text{UII}$ ,  $\text{UX}_1$ ,  $\text{I}_0$  и т. п.). Это происходит вследствие менее прочной связи более короткоживущих изотопов с кристаллической решеткой по сравнению с родоначальниками рядов и другими долгоживущими радиоактивными изотопами. В связи с этим в последние годы начата разработка радиохимических и других методов изучения нарушения равновесных изотопных соотношений ( $\text{UII} : \text{UI}$ ,  $\text{I}_0 : \text{UX}_1$ ,  $\text{AcX} : \text{Ra}$  и т. п.) с целью использования этого признака при поисках урана.

В природных условиях наблюдаются самые различные неравновесные соотношения радиоактивных элементов в урановом ряду, среди которых, однако, могут быть выделены следующие характерные и крайние случаи:

- 1) относительное равновесие с небольшой потерей радона;
- 2) недостаток долгоживущих дочерних продуктов ( $\text{I}_0$ ,  $\text{Ra}$ ,  $\text{Pa}$ );
- 3) избыток долгоживущих дочерних продуктов;
- 4) присутствие только изотопов радия или урана.

В природе нет таких резких границ и наряду с перечисленными наблюдается ряд переходных типов смещения равновесия, обусловленных, например, значительной или большой потерей радона, недостатком одних и избытком других долгоживущих изотопов и т. п.

Длительные нарушения радиоактивного равновесия в ториевом ряду встречаются относительно редко в связи с отсутствием в нем таких долгоживущих продуктов распада, как в урановых рядах.

На рис. 3 пунктирной линией выделены группы радиоактивных изотопов с относительно быстро устанавливающимся радиоактивным равновесием и основные долгоживущие изотопы, миграция которых вызывает значительные и длительные нарушения равновесия в радиоактивных рядах.

\* Для наглядного и непосредственного сравнения относительных количеств дочерних радиоактивных элементов в урановых рядах целесообразно выражать их в процентах равновесного урана, для чего активность препаратов, содержащих радиохимически выделенные элементы, сравнивается с активностью эталона из урановой равновесной руды.

Первые два типа нарушения радиоактивного равновесия характеризуются избыточным содержанием урана относительно дочерних продуктов.

Нарушения равновесия подобного типа могут быть объяснены двояко. Во-первых, свободный от продуктов распада уран мог мигрировать к месту его современного нахождения в промежуток времени меньший, чем время, необходимое для достижения состояния, близкого к устойчивому равновесию в урановом ряду, т. е. менее, чем 400 000—800 000 лет тому назад. Во-вторых, могли иметь место процессы преимущественного выщелачивания дочерних продуктов по сравнению с ураном.

Нарушения равновесия переходного типа могут возникать как в результате недавнего отложения урана вместе с другими долгоживущими изотопами из растворов с низким содержанием иония, так и вследствие преимущественного выщелачивания урана и других долгоживущих продуктов его распада по сравнению с протактинием, обладающим большей способностью гидролизываться и осаждаться непосредственно из щелочных растворов. Избыток  $\text{Ra}^{226}$  практически почти при равновесных количествах U, Io и  $\text{Pa}^{226}$  часто отмечается для богатых урановых минералов.

В урановых минералах и рудах нередко отмечается также избыток иония по отношению к урану и радью, что, по-видимому, объясняется плохой растворимостью и малой подвижностью изотопов тория в зоне гипергенеза.

Третий и четвертый типы нарушений равновесия характеризуются избытком радия и других долгоживущих изотопов по отношению к урану. Такого рода нарушения равновесия могут возникать как в результате выщелачивания урана в окислительной обстановке, так и вследствие привноса дочерних продуктов.

Резкий избыток или наличие только изотопов радия наблюдаются в зоне окисления ураново-сульфидных месторождений, а также в отложениях радиоактивных термальных источников в результате сорбции и соосаждения радия с сульфатами бария и стронция, гидроокислами железа и марганца и другими коллоидными образованиями из больших объемов радиевых вод (радийсодержащие лимониты, гокутолит, травертины и т. п.). Гамма-активность таких практически безурановых аномалий, соответствующих, например, окисленным участкам первичного оруденения с остаточной концентрацией урана, не превышающей тысячных долей процента, может достигать нескольких тысяч микрорентген в час\* и более за счет оставшихся на месте количеств радия вместе с ионием.

Как противоположный крайний случай следует отметить существование природных образований типа ураноносных торфов, в которых радий находится в количествах, обычно не превышающих 5—10%

\* См. раздел настоящей главы «Единицы измерений».

от равновесных с ураном. Образования, содержащие значительные количества  $MsTh_1$  без тория, могут возникнуть только в результате совсем недавнего отложения (менее чем 20—30 лет назад) радия 228 ( $MsTh_1$ ) и радия 226, доказательством чего может служить также резкий недостаток в этих отложениях  $Pb^{210}$  ( $RaD$ ).

Поскольку направление и степень нарушения радиоактивного равновесия в основном определяются характером и интенсивностью процессов эпигенетического перераспределения (выноса и привноса) радиоактивных элементов, зависящих от многих региональных и местных факторов, то по мере приближения к дневной поверхности диапазон смещения равновесия увеличивается и максимальные его сдвиги наблюдаются в почвенном слое, поверхностных водах, вторичных урановых минералах и различных молодых природных образованиях, в том числе возникающих в результате современных геохимических (окислительно-восстановительных) процессов, например, в торфяниках, на стенках горных выработок, в рудных отвалах и т. п.

В поисково-разведочной радиометрии нарушения равновесия принято характеризовать коэффициентом радиоактивного равновесия ( $K_{pp}$ ), который для любого объема горной породы и любой пары генетически связанных радиоактивных элементов определяется путем деления отношения фактически содержащихся в данном объеме количеств этих элементов на равновесие их отношение.

В соответствии с этим  $K_{pp}$ , например, между радием и ураном определяется по формуле

$$K_{pp} = \frac{Ra \cdot 100}{U \cdot 3,4 \cdot 10^{-7}} \%, \quad (4)$$

где  $Ra$  и  $U$  — весовые количества (или концентрации) радия и урана, выраженные в одних и тех же единицах;

$3,4 \cdot 10^{-7}$  — равновесное соотношение  $Ra$  и  $U$ .

Примеры расчетов равновесных соотношений радиоактивных изотопов можно найти в ряде работ (В. И. Баранов, 1956; «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957 и др.).

По данным анализа представительных проб (валовых, технологических и объединенных), характеризующих более или менее значительные объемы горнорудной массы, колебания средних значений  $K_{Ra:U}$  редко выходят за пределы 50—150% для большинства известных промышленных типов урановых руд.

Для частных керновых, бороздовых и штупфных проб, характеризующих сравнительно небольшие объемы пород, колебания  $K_{pp}$  падают в более широких пределах — от первых десятков до сотен процентов, а в отдельных случаях от единиц и долей процента до тысяч процентов. Даже в пределах одного рудного пересечения на небольших расстояниях иногда могут наблюдаться резкие изменения величины  $K_{pp}$  (в 3—5 раз и более).

По характеру распределения смещений радиоактивного равновесия условно можно выделить две крайние группы урановых

рудопроявлений (месторождений), связанных между собой <sup>мигра-</sup>образными взаимопереходами:

а) рудопроявления и месторождения с более или менее выраженным нарушением равновесия, охватывающим значительные объемы ураносных пород (в плане и вертикальном разрезе), на фоне которых могут проявляться локальные, иногда довольно резкие отклонения  $K_{pp}$  в обе стороны от среднего его значения или небольшие практически равновесные участки;

б) практически равновесные породы (руды), для которых в частных пробах наблюдаются отклонения в обе стороны от равновесного состояния, компенсирующиеся при переходе к усредненным представительным пробам, и совсем не устанавливается зависимость  $K_{pp}$  от состава, геологической позиции, глубины залегания пород и других геологических факторов.

Для многих урановых рудопроявлений и месторождений, в частности для зоны цементации ураново-сульфидных месторождений, отмечается обратная корреляционная связь между величиной  $K_{pp}$  и концентрацией урана в пробах.

Иными словами, в урансодержащих породах с более низким содержанием урана (вмещающие урановое оруденение породы, подошва, кровля и периферические части рудных тел) часто наблюдается избыток радия, а в более богатых породах и центральных частях рудных тел — недостаток радия по отношению к равновесному с присутствующим ураном количеству.

Указанные общие тенденции в распределении смещений равновесия установлены пока еще на весьма ограниченном аналитическом материале при недостаточно высокой чувствительности и точности измерений концентрации урана и в особенности радия, позия и других радиоактивных изотопов.

Основными задачами изучения радиоактивного равновесия в урановых рудопроявлениях и месторождениях должны являться:

а) выяснение характера и возможных закономерностей (зональности и др.) распределения смещений равновесия в вертикальном разрезе и в плане по площади участков; установлению пределов колебаний и средних значений  $K_{pp}$  для различных типов руд и вмещающих пород по отдельным участкам, выработкам, горизонтам, рудным блокам и пересечениям;

б) расшифровка наблюдаемой картины распределения нарушений равновесия на основе исследований условий миграции радиоактивных элементов в минералах, рудах, вмещающих породах и циркулирующих в них водах в зависимости от геолого-геохимических, радиогидрогеологических и других факторов.

Главной целью детального изучения радиоактивного равновесия является использование полученных данных для повышения достоверности определения содержаний урана радиометрическими методами и разработки более совершенных способов учета влияния этого фактора при интерпретации радиометрических измерений.

В процессе этого изучения составляются сводные вертикальные разрезы, погоризонтные планы и профили изменения  $K_{pp}$  на соответствующей геологической основе, на которых тем или иным способом (изолинии, раскраска, штриховка и другие условные обозначения) выделяются участки и зоны с различными значениями  $K_{pp}$ . Основное внимание при этом следует обращать на тип оруденения, морфологическую и минералогическую характеристику руд и вмещающих пород, характер зоны окисления и радиогидрогеологические условия, которыми в основном и определяются наблюдаемые особенности в распределении нарушений равновесия. В частности, выяснение ориентировки (в плане и в вертикальном разрезе) зон с различным значением  $K_{pp}$  по отношению к ориентировке в пространстве урапоносных структур и рудных тел помогает установить, имеется ли зависимость распределения нарушений равновесия от направления и скорости движения потока подземных вод, морфологии рудных тел, литологии и трещиноватости пород и т. д.

Статистическая обработка данных по изучению радиоактивного равновесия, а также данных внутреннего и внешнего контроля определений  $K_{pp}$  производится по общепринятым схемам с использованием известных приемов математической статистики (Налимов, 1960; Смирнов, 1955; Хальд, 1956) и вычислением коэффициентов корреляции и вероятности для оценки уровня случайных погрешностей и наличия систематических ошибок.

При сопоставлении данных радиометрического и химического (радиохимического) анализа следует иметь в виду, что иногда даже при хорошей их воспроизводимости и отсутствии сдвига равновесия наблюдаются значительные расхождения между ними за счет плохого извлечения или потерь определенных радиоактивных элементов в процессе химической обработки проб. Кроме того, не следует забывать, что для пекондиционных руд и урапоносных пород с содержанием урана до тысячных долей процента ошибки определения концентраций урана и особенно радия возрастают до 30—50% и более.

## 5. РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ИХ СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ВЕЩЕСТВОМ

Излучения радиоактивных изотопов, входящих в радиоактивные ряды, различаются между собой как по своей природе, так и по энергии и интенсивности.

В радиоактивных рядах имеется 44 радиоактивных изотопа, принадлежащих 12 радиоактивным элементам от урана ( $Z = 92$ ) до таллия ( $Z = 81$ ). В урано-радиевом ряду имеется 12  $\alpha$ -излучателей, из них наиболее важными являются следующие восемь:  $U_I$ ,  $U_{II}$ ,  $I_0$ ,  $Ra$ ,  $Rn$ ,  $RaA$ ,  $RaC'$  и  $Po$ .  $\alpha$ -Излучение некоторых других изотопов

не имеет практического значения. В ториевом семействе наиболее важными являются следующие шесть  $\alpha$ -излучателей: Th, Radium, ThX, Th, ThA, ThC'.

RaC и ThC превращаются путем  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов. Однако RaC является  $\beta$ -излучателем, поскольку для него  $\alpha$ -превращение составляет лишь 0,04%, а  $\beta$ -превращение 99,96%. Для ThC  $\alpha$ -превращение составляет 33,7%, а  $\beta$ -превращение 66,3%, поэтому ThC является как  $\alpha$ -, так и  $\beta$ -излучателем.

В актиноурановом ряду имеется семь практически важных  $\alpha$ -излучателей: AcU, Pa, RdAc, AcX, Ap, AcA и AcC'. Однако  $\alpha$ -излучение актино-уранового ряда не превышает 5% от общего  $\alpha$ -излучения урано-радиевого ряда.

К  $\beta$ -излучателям в урано-радиевом ряду относятся UX<sub>1</sub>, UX<sub>2</sub>, RaB, RaC, RaD и RaE. Так как  $\beta$ -излучение RaD и UX<sub>1</sub> обладает малой проникающей способностью и обычными счетчиками не регистрируется, то практически важными  $\beta$ -излучающими изотопами

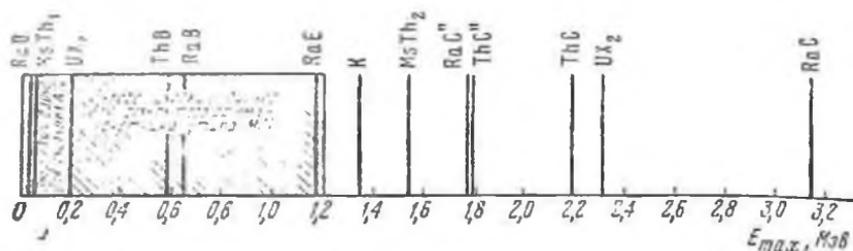


Рис. 4. Спектр максимальных энергий  $\beta$ -излучений природных радиоактивных элементов

являются UX<sub>2</sub>, RaB, RaC и RaE. При измерении алюминиевым счетчиком с толщиной стенок 0,027 г/см<sup>2</sup>  $\beta$ -излучение UX<sub>2</sub> составляет около 50%, Ra (B + C) около 40% и RaE около 10% от общего излучения. Основными  $\beta$ -излучателями в ториевом ряду являются четыре изотопа — MsTh<sub>2</sub>, ThB, ThC и ThC'.

Таким образом, можно считать, что в урано-радиевом и ториевом рядах практически имеется по одинаковому числу  $\beta$ -излучателей.

На рис. 4 приведены значения максимальных энергий  $\beta$ -излучения природных радиоактивных элементов.

$\gamma$ -Излучателями в урано-радиевом ряду в основном являются три изотопа: RaB, RaC и RaC'.  $\gamma$ -Излучение Ra (B + C + C') составляет около 98% от суммарного  $\gamma$ -излучения изотопов всего семейства. На долю  $\gamma$ -излучения урана, находящегося в равновесии с UX<sub>1</sub> и UX<sub>2</sub>, приходится около 2% от  $\gamma$ -излучения такого же количества урана в равновесии со всеми членами ряда.

Эмансирование горных пород приводит к потере радона и, следовательно, Ra (B + C), что может оказывать существенное влияние на результаты определения активности по  $\gamma$ -лучам.

В ториевом ряду к наиболее интенсивным  $\gamma$ -излучателям отно-

сятся  $M\text{Th}_2$  и продукты распада торона ( $\text{ThB} + \text{ThC}$ ). Потери торона вследствие эмансипации оказывают меньшее влияние на  $\gamma$ -излучение горных пород, чем потеря радона.

$\gamma$ -Излучение актино-уранового ряда составляет малую долю от  $\gamma$ -излучения урано-радиевого ряда. По данным Г. В. Горшкова (1959), выход  $\gamma$ -лучей актинового семейства в очень тонком слое урано-радиевой руды составляет около 3% от общего  $\gamma$ -излучения такого слоя. Принимая во внимание, что  $\gamma$ -лучи актинового семейства в среднем значительно мягче  $\gamma$ -лучей урано-радиевого семейства, можно считать, что при радиометрических полевых измерениях  $\gamma$ -излучение актинового семейства природных объектов в большинстве случаев существенного значения не имеет.

По суммарной энергии  $\gamma$ -излучение 1 г тория эквивалентно 0,4 г урана (Горшков, 1959). По данным измерений с медным счетчиком (R. D. Evans, R. O. Evans, 1948), 1 г тория эквивалентен по  $\gamma$ -лучам 0,47 г урана; по измерениям сцинтилляционным счетчиком, экранированным свинцом толщиной 2 мм (Овчинников и др., 1961), — 0,45 г урана.

На рис. 5 представлен энергетический спектр естественных  $\gamma$ -излучателей равновесных рядов урана и тория. По оси ординат здесь отложены квантовый выход ( $n$ ) и энергия  $\gamma$ -квантов ( $E = nh\nu$ ) на распад атома  $UI$ . Если для принятых масштабов  $E$  по численному значению меньше  $n$ , то пунктирная кривая будет короче сплошной, и в этом случае значению  $E$  соответствует нижняя точка.

Соотношение между интенсивностью  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучений уранового и ториевого семейств характеризуется величиной уранового эквивалента, под которым понимают отношение активности того или иного элемента к активности урана, находящегося в равновесии со всеми продуктами его распада. При этом измерения в обоих случаях должны быть выполнены в одинаковых условиях. Следовательно, при измерении насыщенных слоев должно соблюдаться равенство концентраций, при измерении тонких слоев — равенство масс активного вещества (Межиборская и др., 1960).

При прохождении  $\gamma$ -лучей через породы в результате рассеяния лучей происходит изменение спектрального состава излучения и постепенно устанавливается так называемое насыщение, когда при дальнейшем увеличении толщины излучающего слоя интенсивность и спектральный состав выходящего из породы излучения практически не изменяются. Спектр выходящего излучения зависит от состава первичного излучения, вещественного состава горной породы и толщины слоя.

Различия в спектральном составе рассеянного  $\gamma$ -излучения семейств урана и тория при прохождении через породу сглаживаются. Спектральный состав рассеянного горными породами  $\gamma$ -излучения калия также становится подобным  $\gamma$ -излучению элементов этих семейств.

**А л ф а - л у ч и.** Как известно,  $\alpha$ -лучи представляют собой поток матеральных частиц (ядер гелия) с массой  $6,644 \cdot 10^{-24}$  г,

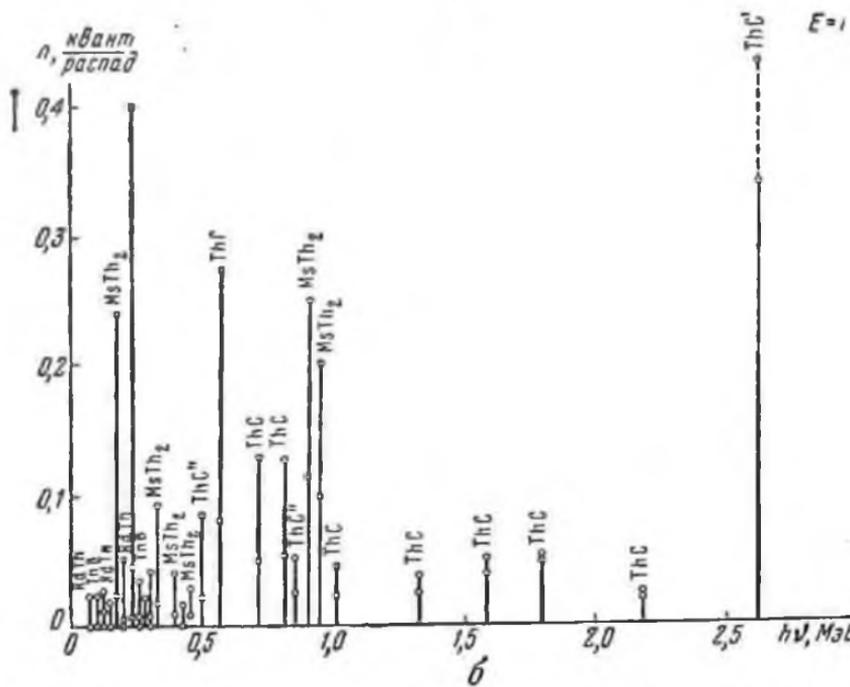
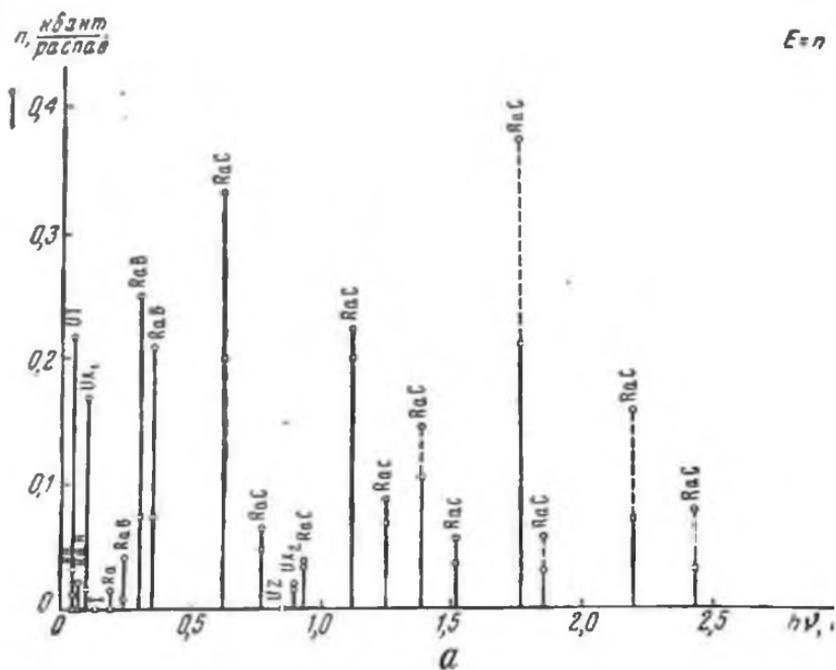


Рис. 5. Энергетический спектр естественных  $\gamma$ -излучателей равновесных рядов (а) и тория (б)

несущих двойной элементарный положительный заряд  $2e$  ( $e = 4,8 \cdot 10^{-10}$  эл. ст. ед. количества электричества). Энергия  $\alpha$ -частиц, испускаемых изотопами, составляющими радиоактивные ряды, заключается в пределах  $3,98-8,78$  Мэв, за исключением энергии длиннопробежных  $\alpha$ -частиц, доходящей до  $10,7$  Мэв.

При прохождении  $\alpha$ -частицы через вещество в результате непрерывных столкновений ее кинетическая энергия постепенно убывает и делится равной средней кинетической энергии молекул данной среды.

Движение  $\alpha$ -частиц происходит прямолинейно. Исследования дальности их пробега ( $R$ ) в газах, производимые, например, путем наблюдения сцинтилляций или другими методами, показали значення, заключающиеся для воздуха в пределах от  $2,5$  до  $8,2$  см (при  $0^\circ \text{C}$  и  $700$  мм Нг).\* С уменьшением давления и увеличением температуры дальность пробега в газах возрастает. Ионизация, создаваемая  $\alpha$ -частицами на всей длине свободного пробега, зависит от энергии частиц и для воздуха заключается в пределах от  $1,15 \cdot 10^5$  (Th) до  $2,54 \cdot 10^5$  (ThC') пар ионов. Полная ионизация, создаваемая  $\alpha$ -частицами, зависит также от природы газа. Удельная ионизация  $\alpha$ -частицы, измеряемая числом пар ионов, образующихся на пути в  $1$  см, постепенно увеличивается с расстоянием от источника и достигает максимальной величины на конце свободного пробега.

Дальность пробега  $\alpha$ -частиц в твердых телах (горных породах) измеряется десятками микронов.

Дальность пробега  $\alpha$ -частиц зависит также от скорости распада радиоактивного элемента. Эта зависимость выражается законом Гейгера — Нэттола, согласно которому логарифм пробега и логарифм постоянной распада связаны линейной зависимостью (рис. 6).

Поскольку  $\alpha$ -лучи являются ядрами гелия, то в породах, рудах и минералах процесс радиоактивного распада сопровождается непрерывным образованием гелия, распределение которого в земной коре следует поэтому рассматривать в связи с ее радиоактивностью.

**Бета-лучи.** Выше указывалось, что  $\beta$ -лучи представляют собой поток электронов или позитронов, выделяемых из ядер

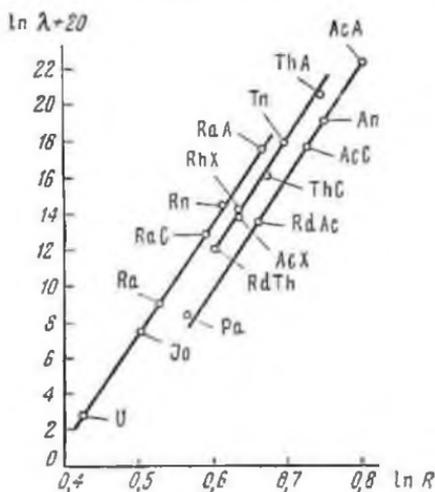


Рис. 6. Закон Гейгера — Нэттола

\* Исключение составляют длиннопробежные частицы.

радиоактивных изотопов в процессе взаимных превращений нейтронов и протонов.  $\beta$ -лучи ядерного происхождения характеризуются непрерывным энергетическим спектром. Средняя энергия  $\beta$ -частиц приблизительно равна  $\frac{1}{3}$  максимальной энергии.

В соответствии с законом сохранения энергии было предположено, что недостающая часть энергии при  $\beta$ -распаде уносится с нейтрино-частицей ничтожной массы, не имеющей заряда. Существование нейтрино впоследствии было подтверждено экспериментально. В среднем около  $\frac{2}{3}$  энергии  $\beta$ -превращения получает нейтрино, и лишь остающаяся  $\frac{1}{3}$  энергии передается электрону или позитрону. Проникающая способность нейтрино не менее чем в миллион раз превосходит проникающую способность  $\gamma$ -лучей. При прохождении  $\beta$ -лучей через вещество их энергия постепенно расходуется на ионизацию и на нагревание, возникающее при торможении  $\beta$ -частиц.

Ионизационные потери пропорциональны концентрации ( $n$ ) электронов в среде. Так как  $n = N\rho \frac{Z}{A}$ , где  $N$  — число Авогадро,  $\rho$  — плотность,  $Z$  — порядковый номер и  $A$  — атомный вес, то в слоях, имеющих одинаковую поверхностную плотность ( $g/cm^2$ ), ионизационные потери пропорциональны отношению  $\frac{Z}{A}$ .

Учитывая, что средний эффективный атомный номер для большинства руд практически постоянен, можно считать, что результаты  $\beta$ -измерений насыщенных (толстых) слоев пропорциональны концентрации активного вещества и не зависят от химического состава руды.

Для  $\beta$ -лучей естественных радиоактивных элементов основное значение имеют ионизационные потери. Траектории  $\beta$ -частиц в веществе (в частности, в газах) не являются прямолинейными, так как происходит непрерывное упругое рассеяние электронов как электронами оболочки, так и ядрами атомов.

Ввиду того что путь  $\beta$ -частиц вследствие многочисленных отклонений не является прямолинейным и полная длина пути в 1,5—4 раза больше толщины слоя, в который проникают  $\beta$ -частицы, понятие о дальности пробега как определенной величине к  $\beta$ -частицам неприменимо, и здесь можно говорить о практическом пробеге частиц, который находят экспериментально по кривым поглощения электронов и  $\beta$ -частиц в веществе путем экстраполяции этих кривых в область величин, меньших естественного фона прибора (Грошев и Шапиро, 1952). Поглощение неоднородных достаточно широких пучков  $\beta$ -лучей имеет характер, близкий к экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (5)$$

где  $I$  — интенсивность после прохождения пучком поглощающего слоя толщиной  $x$ ;

$I_0$  — начальная интенсивность;

$\mu$  — коэффициент поглощения.

Толщину поглощающего фильтра можно выразить не в линейных единицах, а в величинах его поверхностной плотности, т. е. через массу, приходящуюся на квадратный сантиметр поверхности фильтра. В этом случае

$$I = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} m} \quad (6)$$

где  $\frac{\mu}{\rho}$  — массовый коэффициент ослабления,  $\text{см}^2/\text{г}$ ;

$m = \rho x$  — поверхностная плотность,  $\text{г}/\text{см}^2$ .

Массовый коэффициент поглощения для различных веществ является в первом приближении величиной одного и того же порядка, так как поглощение  $\beta$ -лучей приблизительно пропорционально поверхностной плотности поглощающего вещества. Массовый коэффициент поглощения зависит от порядкового номера элемента.

Из формул (5) и (6) может быть определена толщина слоя половинного поглощения

$$d \text{ (см)} = \frac{0,693}{\mu} \text{ и } d \text{ (г/см}^2\text{)} = \frac{0,693}{\mu/\rho}, \quad (7)$$

а также толщина слоя, поглощающего  $\beta$ -излучение в данное число раз.

Наблюдения показывают, что  $\beta$ -лучи естественных радиоактивных элементов в большинстве горных пород проходят толщину слоя, не превышающую 1 см, в то время как в воздухе они практически полностью поглощаются лишь слоем в несколько метров.

При прохождении  $\beta$ -лучей через вещество и рассеянии их от подложки происходит изменение спектрального состава первичного  $\beta$ -излучения.

Если постепенно увеличивать толщину излучающего слоя, то интенсивность  $\beta$ -излучения будет постепенно возрастать, приближаясь к постоянному значению. Слой порошка урановой руды толщиной 1,3  $\text{г}/\text{см}^2$  практически является насыщенным слоем для  $\beta$ -излучения.

**Г а м м а - л у ч и.** Выше указывалось, что  $\gamma$ -лучи представляют собой коротковолновое излучение электромагнитной природы. Поток  $\gamma$ -лучей обладает также и корпускулярными свойствами, т. е. свойствами потока частиц, что находит свое отражение, в частности, в процессах взаимодействия  $\gamma$ -лучей с электронами. Энергия  $\gamma$ -лучей естественных радиоактивных элементов заключается приблизительно в пределах 0,01—3,0 Мэв. При прохождении  $\gamma$ -лучей через вещество происходит их поглощение и рассеяние.

Из многочисленных процессов взаимодействия  $\gamma$ -лучей различных энергий с веществом (Горшков, 1959) наиболее существенное значение при радиометрических поисках имеют фотоэффект и эффект Комптона. Менее существенными являются процесс образования пар, явление ядерного фотоэффекта (реакции  $\gamma, n$ ) и др.

При расчетах поглощения  $\gamma$ -лучей веществом обычно исходят как и в случае  $\gamma$ -излучения, из экспоненциальной зависимости [см формулы (5), (6) и (7)].

При прохождении потока  $\gamma$ -квантов через вещество одни кванты проникают на большее, другие на меньшие расстояния, поэтому можно говорить о среднем пробеге  $\gamma$ -лучей ( $l$ ), причем между  $l$ , коэффициентом поглощения  $\mu$  и слоем половинного поглощения  $d$  существует соотношение  $l = 1/\mu = 1,443 d$ .

Поглощение  $\gamma$ -лучей в породах приблизительно характеризуется графиком рис. 7, на котором изображены кривые поглощения  $\gamma$ -лучей активного слоя неактивной породой с плотностью 1,5—2,0 г/см<sup>3</sup>. Из графика следует, что интенсивность излучения, прошедшего поглощающий слой мощностью 0,5 м, не превышает 1% начальной величины (Мелков и Пухальский, 1957).

При увеличении мощности активного слоя интенсивности излучения, выходящего через его поверхность, возрастает и стремится к предельному значению, соответствующему излучению насыщенного слоя. Слой толщиной около 70—80 г/см<sup>2</sup> (рис. 65) практически можно считать насыщенным для  $\gamma$ -лучей (Граμμαков и др., 1959).

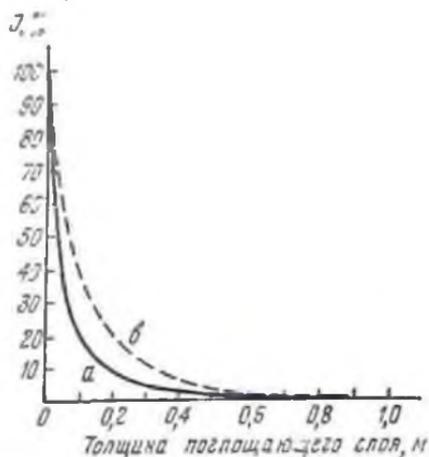


Рис. 7. Поглощение  $\gamma$ -лучей в горных породах  
а — для уранового ряда; б — для ториевого ряда

Таблица 2

Характеристика поглощения широких пучков  $\gamma$ -лучей с энергией 1 и 3 Мэв

Энергия, Мэв	Вещество	Толщина слоя, ослабляющего $\gamma$ -излучение в данное число раз, см		
		в 2 раза	в 10 раз	в 100 раз
1	Воздух	$1,44 \cdot 10^3$	$4,18 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^4$
	Вода	$16,7 \cdot 10^4$	$48,6 \cdot 10^4$	$89,5 \cdot 10^4$
	Бетон	$8,1 \cdot 10^4$	$23,6 \cdot 10^4$	$43,4 \cdot 10^4$
	Железо	$2,49 \cdot 10^4$	$7,22 \cdot 10^4$	$13,31 \cdot 10^4$
	Свинец	$1,40 \cdot 10^4$	$4,23 \cdot 10^4$	$8,11 \cdot 10^4$
3	Воздух	$2,37 \cdot 10^4$	$7,12 \cdot 10^4$	$1,33 \cdot 10^5$
	Вода	$27,6 \cdot 10^4$	$82,8 \cdot 10^4$	$155 \cdot 10^5$
	Бетон	$13,4 \cdot 10^4$	$40,3 \cdot 10^4$	$75,5 \cdot 10^5$
	Железо	$3,61 \cdot 10^4$	$11,11 \cdot 10^4$	$21,0 \cdot 10^5$
	Свинец	$2,15 \cdot 10^4$	$6,88 \cdot 10^4$	$13,27 \cdot 10^5$

В табл. 2 («Справочник по радиометрии для геологов и геофизиков», 1957) приведены данные, характеризующие поглощение широких пучков  $\gamma$ -лучей с энергией 1 и 3 Мэв в различных веществах.

Рассмотрим основные процессы взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом.

**Фотоэффект.** При взаимодействии с атомом  $\gamma$ -квант передает энергию одному из электронов, который выбрасывается за пределы электронной оболочки (рис. 8, б). Энергия, получаемая электроном, равна разности между энергией  $\gamma$ -кванта и энергией, затрачиваемой на ионизацию. Так как работа ионизации обычно очень мала по сравнению с энергией  $\gamma$ -кванта, то приближенно можно считать, что в фотоэффекте вся энергия  $\gamma$ -кванта передается электрону.

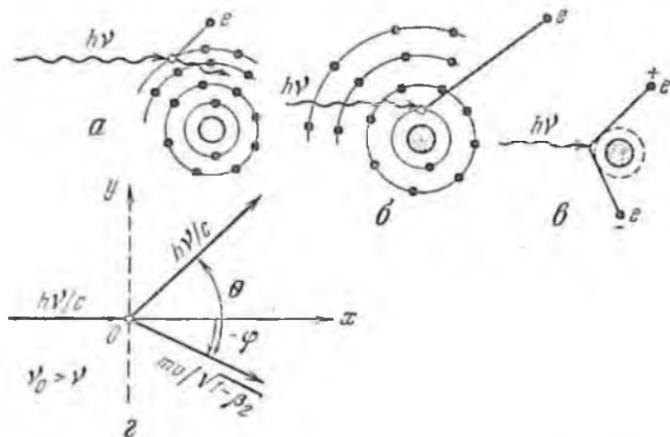


Рис. 8. Схема рассеяния  $\gamma$ -излучения  
а и в — комптоновское, б — фотопоглощение, в — рождение пар

Атом, выбросивший электрон, оказывается возбужденным; при возвращении в нормальное состояние он испускает квант (фотон) характеристического излучения. В некоторых случаях фотоны характеристического излучения могут поглощаться самими атомами и передаваться электронам, превращаясь в кинетическую энергию электронов (электроны Оже).

Следует отметить, что и в тех случаях, когда возбужденные ядра переходят в состояние с меньшей энергией и испускают  $\gamma$ -кванты, энергия последних может передаваться электронам оболочки (так называемая внутренняя конверсия  $\gamma$ -лучей). В этом случае могут возникнуть несколько моноэнергетических групп электронов.

Линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения  $\tau$  очень быстро возрастает с увеличением атомного номера поглотителя  $Z$  и длины волны  $\gamma$ -лучей, вследствие чего при прохождении мягких  $\gamma$ -лучей через среду с большим значением  $Z$  фотоэффект является основным процессом, обуславливающим поглощение  $\gamma$ -лучей.

*Рассеяние  $\gamma$ -квантов на электронах (эффект Комптона).* При рассеянии  $\gamma$ -квантов электронами, или комптоновском рассеянии, часть энергии ( $h\nu$ )  $\gamma$ -кванта передается электрону, который выбивается из электронной оболочки атома под углом  $\varphi$  к направлению движения падающего кванта, а остающаяся часть энергии ( $h\nu'$ ) уносится  $\gamma$ -квантом, рассеянным под углом  $\theta$  к первоначальному направлению (рис. 8, а, в). Из теории следует, что энергия обратно рассеянных  $\gamma$ -квантов будет еще меньше. Таким образом, энергия  $\gamma$ -квантов обратно рассеянного излучения не может превосходить 0,25 Мэв, а энергия  $\gamma$ -квантов, рассеянных под углом  $\theta = 90^\circ$ , всегда меньше 0,51 Мэв. Энергия, передаваемая электрону, определяется разностью энергии падающего и рассеянного  $\gamma$ -квантов. Как показывают опыты, в процессе комптоновского взаимодействия электроны выбрасываются только вперед под углами от 0 до  $90^\circ$ .

Так как в явлении Комптона часть энергии  $\gamma$ -кванта передается электрону (истинное поглощение энергии), а другая ее часть остается у рассеянного фотона, то в соответствии с этим различают два коэффициента поглощения — коэффициент истинного комптоновского поглощения ( $\sigma_a^+$ ), определяемый той частью энергии, которая передается электрону, и коэффициент комптоновского рассеяния ( $\sigma_s^+$ ), характеризующий ту часть энергии, которая остается у рассеянного  $\gamma$ -кванта. Полный коэффициент поглощения, рассчитанный на электрон

$$\sigma^+ = \sigma_a^+ + \sigma_s^+.$$

Формулы для вычисления коэффициентов выводятся на основе квантовой механики и приведены в специальной литературе (Горшков, 1959; «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957).

Линейный коэффициент комптоновского поглощения  $\sigma^*$  пропорционален отношению  $\frac{Z}{A}$ . Для элементов периодической системы с порядковым номером от 2 до 35 это отношение приблизительно равно 1 : 2. Так как основные порообразующие элементы имеют порядковые номера  $Z$ , заключающиеся в этом интервале, то отношение  $\frac{\sigma}{\rho}$ , т. е. массовые коэффициенты поглощения, в первом приближении должны быть одинаковы для элементов указанного интервала. На этом основании во многих случаях для горных пород массовый коэффициент поглощения  $\gamma$ -лучей приблизительно можно считать величиной постоянной.\*\*

\*  $\sigma = \sigma_a + \sigma_s = \frac{\sigma^+ \rho N Z}{A}$ .

\*\* Вследствие изменения спектрального состава  $\gamma$ -излучения при многократном рассеянии значение массового коэффициента с увеличением толщины поглощающего слоя медленно возрастает.

При прохождении  $\gamma$ -лучей естественных радиоактивных элементов через горные породы основным процессом взаимодействия, обуславливающим поглощение  $\gamma$ -лучей, является в большинстве случаев комптоновское рассеяние.

При многократном рассеянии  $\gamma$ -квантов их энергия постепенно уменьшается и, наконец, в процессе фотоэффекта передается электрону.

**Образование пар.** Если энергия  $\gamma$ -кванта больше  $1,022 \text{ Мэв}$  ( $2 m_0 c^2 = 1,022$ , где  $m_0$  — масса покоя электрона,  $c$  — скорость света), то при прохождении  $\gamma$ -лучей через вещество возможно образование пар (рис. 8, в), т. е. превращение  $\gamma$ -кванта в пару электрон — позитрон. Это превращение происходит в поле ядра. Вероятность

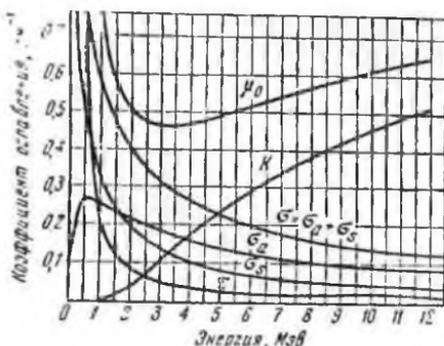


Рис 9. Линейные коэффициенты ослабления  $\gamma$ -лучей в свинце

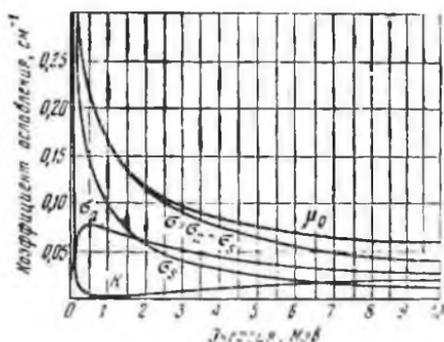


Рис. 10. Линейные коэффициенты ослабления  $\gamma$ -лучей в алюминии

образования пар в поле ядра пропорциональна квадрату заряда ядра  $Z^2$ . Следовательно, образование пар будет особенно существенно при прохождении  $\gamma$ -лучей в веществах, содержащих тяжелые элементы.

Линейный коэффициент поглощения, происходящего вследствие образования пар, обозначается обычно буквой  $k$ . Полное поглощение  $\gamma$ -лучей, учитывая рассмотренные выше процессы, можно характеризовать суммарным коэффициентом ослабления  $\mu$ , определяемым суммой коэффициентов  $\tau$ ,  $\sigma$  и  $k$ ,

$$\mu = \tau + \sigma + k. \quad (8)$$

На рис. 9 и 10 приведены линейные коэффициенты ослабления  $\gamma$ -лучей в свинце и алюминии для рассмотренных выше процессов.

В том случае, когда вещество состоит из легких элементов, для  $\gamma$ -лучей с энергией  $1-2 \text{ Мэв}$  основное значение имеет комптон-эффект ( $\mu \approx \sigma$  и  $\frac{\mu}{\rho} \approx \frac{\mu_1}{\rho_1}$ ) и, следовательно, взяв из специальных таблиц или графиков значение  $\mu$  для алюминия, можно приближенно вычислить  $\mu$  для другого элемента (В. И. Баранов, 1956 г.; «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957).

Массовый коэффициент поглощения  $\gamma$ -лучей в рудах и горных породах является очень важной величиной; рядом авторов получены довольно близкие значения этой величины, а именно: В. Л. Шашкин —  $0,033 \text{ см}^2/\text{г}$ ; Е. Е. Щелковым\* —  $0,032 \text{ см}^2/\text{г}$ ; С. А. Супин («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957) —  $0,03 \text{ см}^2/\text{г}$ ; А. К. Овчинниковым и И. М. Хайковичем (1960) —  $0,033 \text{ см}^2/\text{г}$  для руд с плотностью  $2,5-2,8 \text{ г}/\text{см}^3$ .

*Множественное рассеяние и изменение спектрального состава  $\gamma$ -излучения.* При наличии относительно больших (по массе и объему) радиоактивных источников, например радиоактивных руд и пород, как в естественном залегании, так и в пробах (образцах) в процессе поглощения возникает рассеянное  $\gamma$ -излучение.

Наряду с рассеянными лучами, возникающими в результате комптон-эффекта, могут возникать излучения, обусловленные торможением фотоэлектронов (тормозное излучение), поглощением позитронов в веществе (аннигиляционное излучение) и другими процессами.

Как отмечалось выше, в комптон-эффекте при взаимодействии  $\gamma$ -лучей с электронами энергия  $\gamma$ -квантов распределяется между электроном и рассеянным  $\gamma$ -квантом. Последний может иметь новое (второе) рассеяние, далее третье и т. д. В результате многократного рассеяния энергия  $\gamma$ -кванта значительно уменьшится и, наконец, в процессе фотоэффекта квант передаст всю энергию электрону и прекратит свое существование.

Полный эффект внутри излучающей среды определяется суммой эффектов первичных лучей и однократно-, двукратно-, многократно-рассеянных лучей. Расчет и опыт (Горшков, 1959) показывают, что внутри однородной излучающей среды интенсивность излучения будет примерно в два раза больше, чем вычисленная без учета рассеянных лучей. Например, для мощности дозы  $\gamma$ -излучения ( $P$ ) плоского слоя (в случае радиевого источника) с учетом рассеяния лучей имеем:

$$P = \frac{3\pi K_{\gamma} q}{\mu}, \quad (9)$$

где  $K_{\gamma}$  — гамма-постоянная радия;

$q$  — концентрация активного вещества в слое;

$\mu$  — коэффициент поглощения в веществе слоя.

Соответственно для тел, видимых из точки наблюдения под телесным углом  $\Omega$ , с учетом рассеянного излучения

$$P = \frac{\alpha K_{\gamma} q \Omega}{\mu}, \quad (10)$$

где  $1,3 \leq \alpha \leq 1,5^{**}$

\* Устное сообщение.

\*\* Следует иметь в виду, что вследствие различной спектральной чувствительности счетчиков результаты измерений получаются разные.

При прохождении  $\gamma$ -лучей через неактивную среду в последней также происходит многократное рассеяние  $\gamma$ -квантов.

Численные расчеты показывают, что отношение интенсивности первичного пучка  $\gamma$ -лучей к суммарной интенсивности первичных и рассеянных лучей уменьшается с увеличением толщины поглотителя и для больших значений толщины это отношение составляет только несколько процентов.

Таким образом, при прохождении через поглощающий слой монохроматическое  $\gamma$ -излучение преобразуется. В процессе рассеяния в нем возникает сплошной спектр многократно рассеянных  $\gamma$ -квантов, который накладывается на линейный спектр монохроматического излучения.

*Обратное рассеяние (рассеянные лучи входа).* Если рассеянное излучение образует с направлением падающего пучка углы  $\theta$ , заключающиеся в пределах между  $90^\circ$  и  $180^\circ$ , то такое излучение называют обратным рассеянным (вторичным). Вероятность обратного рассеяния убывает при возрастании энергии  $\gamma$ -квантов.

Таким образом,  $\gamma$ -кванты рассеянных лучей входа вылетают из слоя через ту же поверхность, на которую падает первичный пучок.  $\gamma$ -Кванты лучей выхода ( $90^\circ \geq \theta \geq 0^\circ$ ) вылетают из поглощающего слоя через ту же поверхность, через которую выходит из слоя первичное излучение.

Обратно рассеянное излучение имеет различную энергию и интенсивность в зависимости от угла рассеяния, причем рассеянное излучение выхода интенсивнее и жестче рассеянных  $\gamma$ -лучей входа. С возрастанием толщины поглощающего плоского слоя, на который падает первичный пучок  $\gamma$ -лучей, рассеянное  $\gamma$ -излучение выхода и входа возрастает. Первое переходит при некоторой толщине слоя через максимум и затем снова падает, последнее достигает определенного насыщенного значения, после чего с увеличением толщины слоя остается постоянным. Рассеянное излучение, рассчитанное на один электрон, возрастает с увеличением атомного номера вещества поглотителя и жесткости первичного пучка.

Рассеянию  $\gamma$ -лучей посвящено много исследований, подробные обзоры которых имеются в работах В. С. Галшвева и др. (1957), Г. В. Горшкова (1959), Н. Ф. Нелица (1960) и др.

Применение сцинтилляционных приборов позволяет исследовать с достаточной точностью энергетический состав спектров  $\gamma$ -излучения руд и горных пород (Грамаков и др., 1959). Различают спектры интегральные и дифференциальные. Для получения интегральных спектров прибор настраивается каждый раз так, что он измеряет лишь те импульсы ( $\gamma$ -кванты), амплитуда (энергия) которых превосходит установленную величину. Для получения дифференциальных амплитудных спектров  $\gamma$ -спектрометр настраивается таким образом, чтобы отмечать лишь те импульсы, энергия которых заключена в небольшом интервале вблизи некоторого определенного значения.

Следует, однако, иметь в виду, что аппаратный спектр не является истинным спектром, так как чувствительность приборов

к  $\gamma$ -квантам различных энергий различна. На искажение спектра может влиять и ряд других факторов. Получение истинных спектров по аппаратурным является важной, пока еще неразрешенной задачей.

В ряде исследований (Галишев, Огневецкий, Орлов, 1957 и др.) было показано, что в амплитудных спектрах рассеянного  $\gamma$ -излучения наблюдается максимум в области малых энергий. При этом наибольшее различие в спектральном распределении рассеянного  $\gamma$ -излучения, представляющее практический интерес, наблюдается

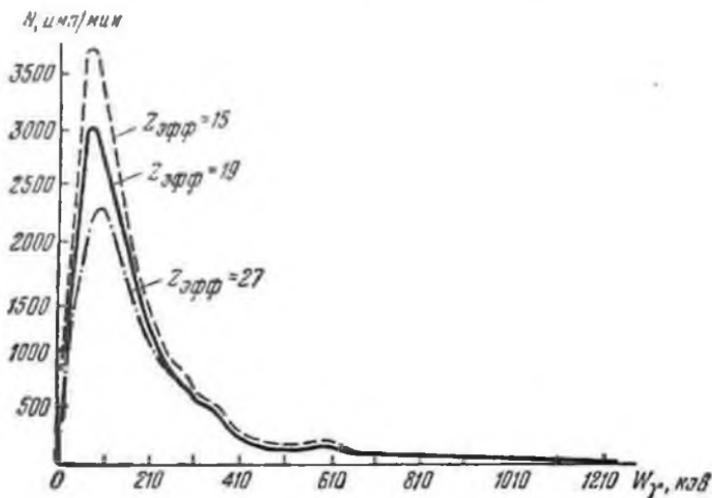


Рис. 11. Дифференциальный спектр равновесной урановой руды, полученный при измерениях в центре моделей больших размеров в форме дисков, имеющих линейные размеры, соответствующие насыщенным (для  $\gamma$ -лучей) пластам

в средах, содержащих примеси тяжелых элементов, что может быть использовано при комплексном радиометрическом опробовании (каротаж) радиоактивных руд на эти элементы.

На рис. 11 приведены дифференциальные спектры равновесной урановой руды, полученные при измерениях в центре дисковых моделей, имеющих линейные размеры, соответствующие насыщенным (для  $\gamma$ -лучей) пластам. Дифференциальные спектры приведены к одинаковому содержанию урана. При измерениях счетчик помещался внутри железных цилиндрической трубы, проходящей по оси модели, с толщиной стенок 0,85 мм. Из рассмотрения графиков дифференциальных спектров следует, что величина наблюдаемых в мягкой области максимумов зависит от эффективного атомного номера породы.

Учет рассеянного излучения представляет большие трудности. Простой показательный закон поглощения применим лишь к узким пучкам. В этом случае каждый рассеянный  $\gamma$ -квант выбывает из

пучка. В поисково-разведочной радиометрии обычно измеряется интенсивность широких пучков. В этом случае в приемник излучения будут частично попадать и рассеянные кванты. Поэтому ослабление излучения, определяемое по результатам измерений, будет происходить медленнее, и простой показательный закон поглощения с коэффициентом  $\mu$  для узкого пучка (т. е. с полным коэффициентом поглощения) не будет соблюдаться.

Таким образом, вычисление величины  $I$  по формуле (5) будет приводить к заниженным значениям. Однако и в этом случае в первом приближении также можно пользоваться для учета поглощения показательным законом, вводя в формулу вместо полного коэффициента поглощения  $\mu_0^*$  так называемый эффективный коэффициент поглощения.

Для сплошной среды коэффициент поглощения в соответствии с результатами опытов можно принять равным  $\mu_0 - \sigma_s$ . Следовательно, эффективный коэффициент поглощения будет заключаться в пределах  $\mu_0 - \sigma_s \leq \mu_{\text{эфф}} \leq \mu$ .

Эффективный коэффициент ослабления находится опытным путем. Величина его зависит от спектральной чувствительности счетчика и условий измерений. Если путем экранирования исключить влияние наиболее мягкой части спектра и рассеянных  $\gamma$ -лучей, то, как показывают опыты, эффективный коэффициент поглощения в первом приближении не зависит от расстояния, что определяет приложимость к расчетам показательного закона поглощения.

Другой способ учета рассеянного излучения состоит в том, что результат, полученный на основе применения показательного закона с полным коэффициентом поглощения, умножается на множитель, величина которого зависит от толщины поглотителя, энергии лучей и других условий измерения.

Этот множитель называется фактором нарастания, обозначается буквой  $B$  ( $B > 1$ ) и характеризует отношение суммарной интенсивности нерассеянных и рассеянных  $\gamma$ -квантов на данной глубине  $x$  к интенсивности нерассеянных  $\gamma$ -квантов на той же глубине (Горшков, 1959; Нелипа, 1960).

## 6. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И РАДИОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Методам измерений и описанию применяемой при поисках урана радиометрической аппаратуры посвящена специальная литература (Кириков и др., 1934; Мелков и Пухальский, 1957; Прайс, 1960;

\* В легких материалах для  $\gamma$ -лучей естественных радиоактивных элементов, как указывалось выше, основное значение имеет комpton-эффект, поэтому для них  $\mu_0 \approx \sigma$ .

Суражский, 1960; Якубович, 1956, 1960 и др.), поэтому здесь приводятся лишь основные сведения по этому вопросу.

Все известные методы обнаружения и измерения радиоактивных излучений основаны в конечном счете на ионизирующем действии последних в вызываемых ими физических и химических изменениях вещества.

Разнообразные приборы, применяемые для обнаружения и измерения радиоактивности геологических образований, обусловленной содержанием в них естественно-радиоактивных элементов или заражением их искусственно-радиоактивными элементами, измеряют величины либо практически пропорциональные интенсивности, плотности потока и мощности дозы излучения\*, либо связанные с ними более сложной зависимостью. Эти величины, характеризующие радиоактивные излучения при определенных условиях измерений, пропорциональны концентрации радиоактивных элементов в объемных (распределенных) источниках и могут служить мерой ионизирующего действия излучений. В зависимости от измеряемой физической величины, характеризующей излучение, различают следующие группы приборов.

1. Радиометры — приборы, в основу которых положена регистрация величин, практически пропорциональных или связанных более сложной зависимостью с интенсивностью, плотностью потока и мощностью дозы радиоактивного излучения.

2. Спектрометры (радиометры — анализаторы) — приборы для регистрации тех же величин в определенных интервалах энергии частиц и квантов радиоактивных излучений.

3. Эманометры — приборы для измерения концентрации эманаций.

Указанные группы приборов, кроме того, разделяются по виду регистрируемого излучения ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), условиям использования (полевые, лабораторные, каротажные, рудничные), условиям измерений (стационарные, самолетные, автомобильные, пешеходные) и по технической характеристике или метрическим свойствам (точность, чувствительность, инерционность, пределы измерений, габариты и вес, способ регистрации измеряемой величины и т. д.).

Все типы радиометров строятся по общей схеме и большинство их состоит из следующих основных узлов или блоков:

1) приемник (датчик, детектор или индикатор) излучения;

\* Интенсивность ионизирующего излучения ( $I$ ) — количество энергии, переносимой излучением за 1 сек через 1 см<sup>2</sup> поверхности, перпендикулярной к направлению потока излучения.

Плотность потока излучения — число частиц или квантов, проходящих за 1 сек через 1 см<sup>2</sup> той же поверхности.

Доза рентгеновского или  $\gamma$ -излучения ( $D$ ) является мерой излучения, основанной на его ионизирующей способности.

Мощность дозы ( $P$ ) — доза, отнесенная к единице времени.

2) усилительно-регистрающая схема, выполняющая функции усиления, формирования (нормализации) и преобразования входного сигнала (импульса);

3) регистратор (индикатор) выходного сигнала;

4) узел питания радиосхемы и источник высокого напряжения, подаваемого на приемник излучения.

Датчики радиометров в большинстве случаев делаются выносными и размещаются в специальных гильзах или кассетах, соединяющихся с пультом управления и блоком питания с помощью гибких шлангов.

В качестве приемников излучения в радиометрической поисково-разведочной аппаратуре используются главным образом газоразрядные и сцинтилляционные счетчики (Фюнфер, Нейерт, 1961). Ионизационные камеры применяются в основном для полевых и лабораторных эманиационных измерений и экспресс-анализов богатых руд, а фотопленки и фотопластинки, чувствительные к соответствующим излучениям, — для радиографических исследований и дозиметрического контроля.

Ионизационные интегральные камеры измеряют средний суммарный ионизационный ток насыщения, создаваемый в ионизационной камере значительным количеством частиц, а импульсные приборы регистрируют электрические импульсы, вызванные отдельными частицами или квантами излучения, попавшими в рабочий объем счетчика или счетно-импульсной камеры (сборание ионов в области усиления ионизационного тока).

Ионизационные приборы. Обычно эти приборы состоят из ионизационной камеры с большой постоянной времени ( $RC$ ) и устройства для измерения напряжения (ионизационного тока). Это устройство должно обладать достаточно большим внутренним сопротивлением для снижения влияния токов утечки на создаваемый излучением в камере весьма слабый ионизационный ток (порядка  $10^{-9}$ — $10^{-16}$  а), не подающийся измерению гальванометрами.

Измерение ионизационных токов производится косвенными методами с помощью электрометров и электроскопов: по падению напряжения на высокоомном сопротивлении; по скорости заряда или разряда известной емкости; методом компенсации. Для прямого измерения ионизационных токов могут быть использованы наряду с электрометрами и электрометрические лампы (например, в ламповых эманометрах).

Для регистрации сильно ионизирующих  $\alpha$ -частиц на фоне  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения применяются в основном счетно-импульсные ионизационные камеры в сочетании с мощным усилителем и дискриминатором импульсов, обладающие малой постоянной времени по сравнению с интегральными камерами.

Газоразрядные счетчики. Устройство газоразрядных счетчиков принципиально мало чем отличается от устройства ионизационных камер. Как и ионизационная камера, счетчик обычно представляет собой своеобразный цилиндрический конденсатор, наполненный газом и заряженный до напряжения источника питания.

При низких напряжениях на электродах он работает как ионизационная камера. При дальнейшем увеличении напряжения электроны, образованные в результате первичного действия радиации на счетчик и попавшие в его чувствительный объем, разгоняются электрическим полем и приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации газа и возникновения так называемого лавинного разряда, создающего электрический импульс, воспринимаемый усилительно-регистрирующей электронной схемой.

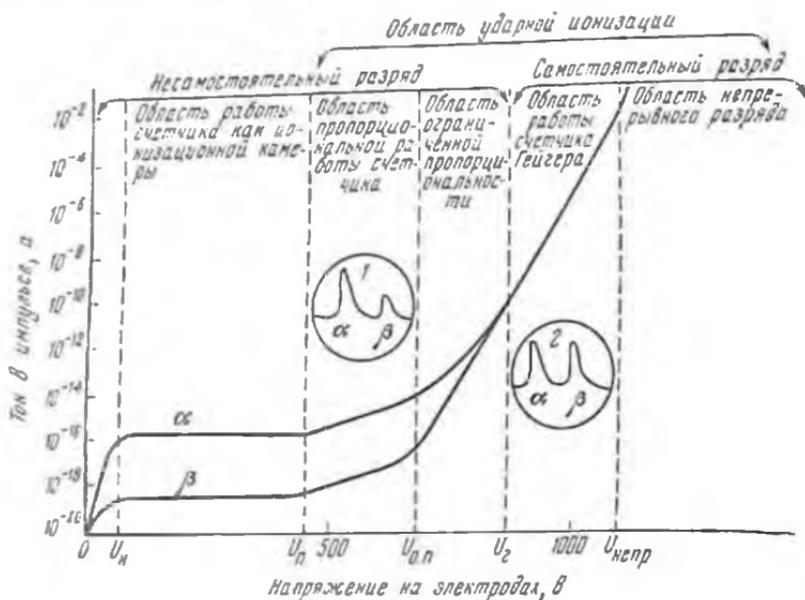


Рис. 12. Зависимость величины импульса тока в газоразрядном счетчике от приложенного напряжения

На рис. 12 показана вольт-амперная характеристика газоразрядного счетчика, т. е. зависимость величины импульса тока от режима работы (напряжения) счетчика, на которой выделены участки с кривой различной крутизны, указывающие на различный характер процесса возникновения разрядных импульсов для определенных интервалов напряжения.

Поскольку все газоразрядные счетчики работают в области ионизации столкновением, то они за счет газового усиления значительно превосходят ионизационные камеры по своей чувствительности к излучениям.

В зависимости от режима работы счетчика амплитуда возникающего в нем импульса может быть пропорциональной или может не зависеть от величины первичной ионизации. В первом случае счетчик называется пропорциональным и служит преимущественно для определения природы ядерных частиц, а во втором — счетчиком

Гейгера — Мюллера, который широко применяется в поисково-разведочной радиометрической аппаратуре.

Для гашения разряда в счетчиках используют два основных способа:

- 1) применение гасящих радиотехнических схем (несамогасящиеся счетчики);
- 2) заполнение счетчиков подобранными смесями газов (самогасящиеся счетчики).

В настоящее время используются почти исключительно самогасящиеся счетчики, обладающие рядом преимуществ перед несогасящимися (быстрота действия, простота схемы включения и др.).

По назначению различают счетчики  $\alpha$ -частиц,  $\beta$ -частиц,  $\gamma$ -квантов, рентгеновских лучей и нейтронов, а по конструкции — цилиндрические, торцовые (рис. 13) и  $4\pi$ -счетчики (радиоактивный препарат располагается в центре рабочего объема счетчика).

Основными характеристиками счетчиков, зависящими от их конструкции, материала электродов, состава и давления наполняющих их газов и технологии (чистоты) изготовления, являются: максимальная скорость счета или разрешающая способность («мертвое» время  $t_m$ , или время нечувствительности счетчика к следующему импульсу), счетная характеристика, эффективность, чувствительность.

Разрешающая способность импульсных радиометрических приборов определяется в основном разрешающей способностью газовых и электромеханических счетчиков и инерционностью измерительных (счетных) схем.

Наибольшей инерционностью из этих трех элементов обладают электромеханические счетчики, лучшие типы которых способны отсчитывать без заметного просчета только до 600 статистически распределенных во времени импульсов в минуту ( $t_m = 10^{-2}$  сек). Поэтому в более совершенных приборах между газовым и электромеханическим счетчиком включают специальные электронные, практически безинерционные, пересчетные схемы, позволяющие подавать на электромеханический счетчик только импульсы, кратные установленному коэффициенту пересчета.

Эффективность счетчика, обычно выражаемая в процентах, характеризует его способность реагировать на то или иное излучение и численно равна отношению числа зарегистрированных (вызвавших импульсы) частиц к общему числу частиц, попавших в счетчик за один и тот же промежуток времени. Для регистрации  $\alpha$ - и мягкого  $\beta$ -излучения в стенках счетчиков делаются слюдяные окошки соответствующей толщины.

Эффективность газоразрядных счетчиков определяется в основном материалом и толщиной стенок катода, составом и давлением газового наполнителя счетчика.

Поскольку газоразрядные  $\gamma$ -счетчики регистрируют фотоэлектроны, вырванные из катода  $\gamma$ -квантами, а вероятность этого процесса мала, то эффективность их очень низкая — порядка 1—2%.

Для  $\alpha$ - и  $\beta$ -счетчиков эффективность значительно выше (десятки процентов) и ограничивается только поглощением частиц в стенках счетчиков.

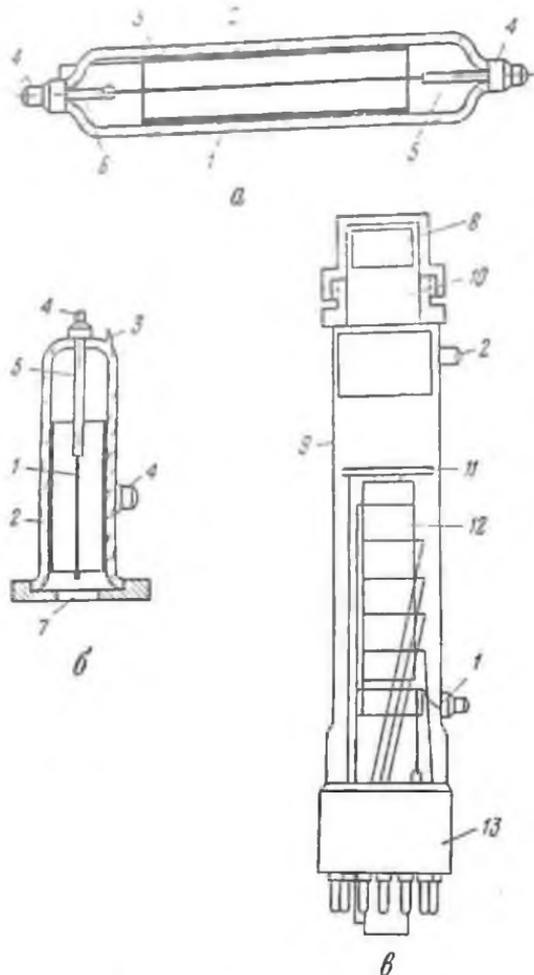


Рис. 13. Схематическое устройство счетчиков  
 а — цилиндрический в стеклянном баллоне; б — торцовый; в — сдвигательный  
 1 — анод; 2 — катод (металлическое покрытие); 3 — стеклянный баллон; 4 — контакт; 5 — стеклянная трубка; 6 — индикатор; 7 — слюдяное окошко; 8 — кристаллофосфор; 9 — фотоумножитель; 10 — светопровод; 11 — фокусирующая диафрагма; 12 — эмиттеры (дiodы); 13 — цоколь фотоумножителя

Зависимость эффективности газоразрядных  $\gamma$ -счетчиков с катодами из наиболее употребительных материалов от энергии квантов (для катодов оптимальной толщины) изображена на рис. 14, а.

На рис. 14, б показана та же зависимость для газоразрядных счетчиков различных типов, выпускаемых отечественной промышленностью (Бовин, 1960).

Как видно из рис. 14, для регистрации мягкого  $\gamma$ -излучения ( $E < 0,5$  Мэв) более выгодно применять счетчики с катодами из

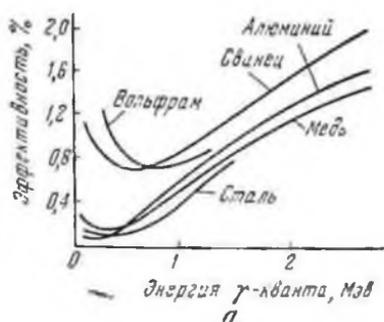
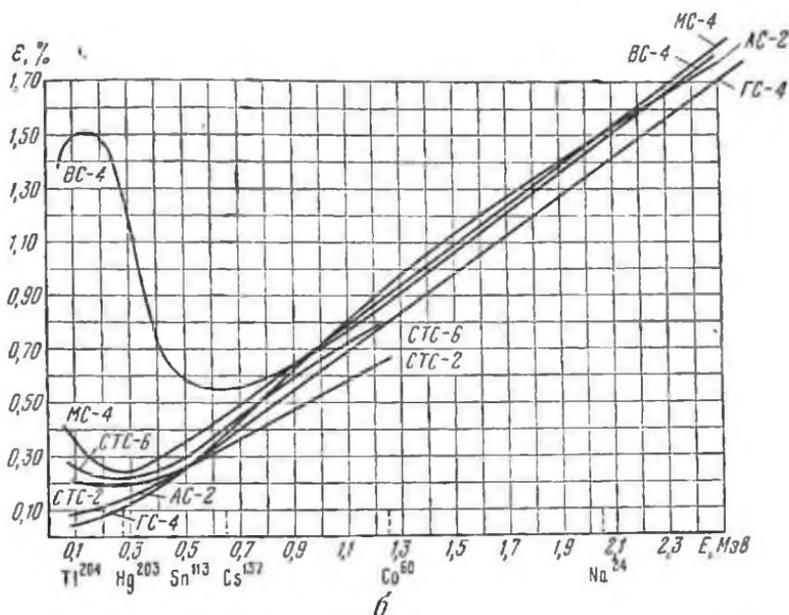


Рис. 14. Зависимость эффективности газоразрядных счетчиков с катодами из различных материалов (а) и различных типов (б) от энергии квантов



тяжелых металлов (например, типа ВС), для жестких лучей материал катода меньше сказывается на эффективности счетчика.

В полевых радиометрах счетчики, как правило, помещаются в алюминиевые или стальные (железные) гильзы толщиной 1—3 мм. Применение гильз, как и специальных экранов вокруг счетчиков от мягкого  $\gamma$ -излучения, заметно снижает эффективность счетчиков,

особенно в области малых энергий, что приводит к некоторому выравниванию их спектральных характеристик.

Интегральная чувствительность счетчиков типа ВС к нефильтрованному  $\gamma$ -излучению благодаря высокому коэффициенту поглощения  $\gamma$ -излучения вольфрамом приблизительно в два-три раза выше, чем у счетчиков типа МС и СТС.

Счетной характеристикой называется график зависимости скорости счета от напряжения на электродах счетчика, получаемый экспериментально при измерении одного и того же постоянного источника излучения в стандартных неизменяющихся в ходе измерений условиях. Знание счетной характеристики необходимо для установления нормального режима работы счетчиков (в пределах первой трети плато — приблизительно горизонтального рабочего участка графика, в котором скорость счета почти не зависит от напряжения). Наклон плато выражается как относительное увеличение числа отсчетов в процентах, рассчитанное на 1 в увеличения напряжения на счетчике.

Счетчики с наклоном плато выше 0,15% на 1 в считаются непригодными для работы. В хорошо работающих счетчиках наклон не превышает 0,03% на 1 в. Ширина плато может достигать нескольких сотен вольт и во должна быть менее 50—100 в. Рабочее напряжение счетчика зависит от состава (и давления) самогасящихся газовых смесей, которыми их наполняют. В зависимости от этого различают высоковольтные счетчики, заполненные аргоном или неоном с примесями многоатомных газов (паров этилового спирта и др.) и требующие для своей работы напряжения в пределах 700—1600 в (счетчики серии МС, ГС, ВС, АС с медными, графитовыми, вольфрамовыми и алюминиевыми катодами) и низковольтные счетчики, заполненные неоном с добавкой аргона и одного из галогенов (до 5% хлора или брома), для питания которых достаточно 360—400 в (счетчики серии СТС и СГС с катодом из стали и проводящего стекла). Недостатками высоковольтных счетчиков являются высокое рабочее напряжение и малый срок службы, а преимуществами — небольшой наклон плато счетной характеристики и более высокая, чем у галогеновых счетчиков, разрешающая способность.

Сцинтилляционные счетчики. К негазоразрядным счетчикам относятся малогабаритные полупроводниковые и сцинтилляционные счетчики, из которых при геологических исследованиях получили распространение пока только вторые. Визуальный счет сцинтилляций, т. е. вспышек света, возникающих в некоторых веществах ( $ZnS$  и др.), называемых фосфорами, под воздействием радиоактивных излучений, использовался еще в начальный период после открытия радиоактивности (спинтарископ). На новой основе в сочетании с фотоэлектронными умножителями (ФЭУ) сцинтилляторы стали широко внедряться в геологоразведочную практику начиная с 50-х годов.

Основными достоинствами сцинтилляционных счетчиков по сравнению с газоразрядными являются: высокая чувствительность

и эффективность ко всем видам ядерных излучений; большая разрешающая способность ( $\sim 10^{-8} - 10^{-9}$  сек); способность различать частицы и кванты по энергии и измерять ее (амплитуда импульса пропорциональна ионизирующей способности частицы); относительная величина фона в сцинтилляционных  $\gamma$ -счетчиках ниже, чем в газоразрядных, за счет меньшей чувствительности первых к космическим лучам.

Сцинтилляционный счетчик (см. рис. 13, а) состоит из двух основных элементов: сцинтиллятора, в котором под действием ядерных излучений возникают вспышки света, и фотоумножителя, преобразующего последние в электрические импульсы и одновременно усиливающего их в миллионы раз и больше. Таким образом, фотоумножитель соединяет в себе функции фотоэлемента и электронного усилителя, основанного на явлении вторичной электронной эмиссии. В современных фотоумножителях для сцинтилляционных счетчиков используются главным образом сурьмяно-цезиевые фотокатоды, обладающие максимальным квантовым (световым) выходом.

Успешная работа сцинтилляционных счетчиков во многом определяется качеством и стабильностью работы ФЭУ и сцинтилляторов. В качестве сцинтилляторов при геологических исследованиях в настоящее время применяются в основном неорганические кристаллы (активированный таллом йодистый патрий, активированный серебром серпистый цинк и др.), пластмассовые и жидкостные фосфоры.

Недостатками кристаллов йодистого патрия являются их гигроскопичность и быстрое ухудшение оптических свойств поверхности под воздействием атмосферной влажности, для защиты от которой их помещают в герметические контейнеры, сильно поглощающие  $\beta$ - и полностью  $\alpha$ -излучение. Современные сцинтилляционные счетчики обладают и другими недостатками (наличие шумов, температурная зависимость, разброс параметров фотоумножителей, относительная дороговизна кристалло-фосфоров и сложность конструкции прибора), которые, однако, вполне компенсируются, особенно при скоростных поисках, указанными выше их существенными преимуществами.

Эффективность сцинтилляционных счетчиков ( $\epsilon$ ) зависит не только от энергии регистрируемого излучения, но и от размеров, плотности (среднего атомного номера) фосфора, геометрии измерений, характера пучка, уровня дискриминации входного сигнала, режима работы фотоумножителя и других факторов.

При этом в отличие от газоразрядных счетчиков для кристаллов небольших размеров (не обеспечивающих полного поглощения  $\gamma$ -лучей) зависимость эффективности неэкранированных сцинтилляционных счетчиков от энергии  $\gamma$ -излучения имеет обратный ход, т. е. их эффективность асимптотически снижается с увеличением энергии квантов.

На рис. 15 приведены расчетные и экспериментальные спектральные характеристики сцинтилляционных счетчиков NaI (Тl) различных размеров в интервале энергий  $\gamma$ -излучения до 1,5 Мэв, при

облучении их с торца параллельным широким пучком (кривые 1 и 2, рис. 15, а) и расходящимся пучком от точечного источника, находящегося на расстоянии 10 см от поверхности кристалла (кривые 3 и 4, рис. 15, а) или при расположении точечного источника излучения сбоку кристалла, экранированного цилиндрическими фильтрами из различных материалов (рис. 15, б). Как и в случае газоразрядных счетчиков, применение экранов и гильз из различных материалов снижает эффективность сцинтилляционных счетчиков, особенно в мягкой части спектра  $\gamma$ -излучения. Аналогично экранированию, но еще в большей степени, влияет на эффективность сцинтиллятора дискриминация входного сигнала.

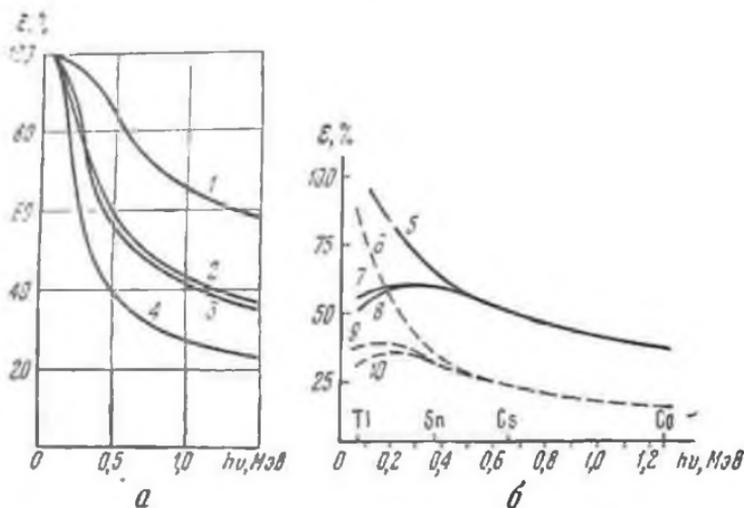


Рис. 15. Расчетные (а) и экспериментальные (б) спектральные характеристики сцинтилляционных счетчиков различных размеров (по В. П. Бовину, 1960)

1 и 3 —  $50 \times 20$  мм без фильтра, 2 и 4 —  $15 (30) \times 20$  мм без фильтра, 5 —  $40 \times 50$  мм без фильтра; 6 —  $20 \times 20$  мм без фильтра, 7 —  $40 \times 50$  мм со свинцовым (0,2 мм) фильтром; 8 — то же, с фильтром алюминия (3 мм) и свинца (0,2 мм); 9 —  $20 \times 20$  мм с фильтром из алюминия (3 мм) и свинца (0,2 мм); 10 — то же, со свинцовым фильтром (0,27 мм)

Усилительно-регистрирующие (счетные) схемы. В зависимости от назначения приборов регистраторы (индикаторы) выходного сигнала в радиометрической поисково-разведочной аппаратуре могут быть слуховыми (звуковыми), визуальными (стрелочными и, в частности, электромеханическими), автоматическими с самописцами или комбинированными, допускающими, например, прием импульсов по телефону, электромеханический счетчик и стрелочный индикатор. При этом в импульсных приборах применяются счетные устройства двух типов: измерители счета, т. е. полного числа импульсов, поступивших на вход устройства за все время наблюдения (например, счетные установки типа Б), и измерители скорости счета (интенсиметры), т. е. среднего числа импульсов, поступивших на вход счетного устройства в единицу времени.

В измерителях скорости счета между усилителем импульсов и стрелочными индикаторами (самописцами) всегда включается так называемый интегрирующий контур (суммирующая и усредняющая измеряемый эффект по времени схема), который создает на выходе напряжение (ток), пропорциональное среднему числу импульсов в единицу времени, поступающему на вход счетного устройства.

Измерительная схема в таких устройствах представляет собой ламповый измерительный прибор постоянного тока с щитовым прибором на выходе, шкала которого может быть проградуирована в импульсах в единицу времени.

Для определения энергии частиц в сцинтилляционных радиометрах применяются амплитудные дискриминаторы, главной частью которых является спусковая схема с регулируемым порогом. Выход ее соединен со счетным устройством, регистрирующим лишь те импульсы, амплитуда которых превосходит установленный порог. Производя счет числа импульсов в зависимости от порогового напряжения, получают данные для графического построения интегрального амплитудного спектра.

Сцинтилляционные приборы, включающие амплитудный анализатор, называются сцинтилляционными спектрометрами. С их помощью получают дифференциальные амплитудные спектры (см. рис. 11), по которым более точно, чем по интегральным спектрам, определяют энергетический состав излучений.

При работе со сцинтилляционными радиометрами важное значение имеет правильный выбор начального порога дискриминации импульсов, от величины которого, определяемой минимальной энергией уверенно регистрируемых  $\gamma$ -квантов, зависит стабильность работы и чувствительность радиометра (гл. X, раздел 2).

Для расширения интервала, изменения точности и постоянной времени (инерционности) измерений пользуются переключателями диапазонов. Соотношения между соседними диапазонами обычно принимаются равными 1 : 5 или 1 : 10.

Автоматическая регистрация измерений (самописцы, фоторегистраторы и т. п.) необходима при исследовании радиоактивных излучений в движении (аэро- и автоскопи, каротаж).

Электромеханические счетчики с пересчетными схемами и без них применяются в лабораторных и полевых радиометрических приборах, предназначенных для количественных измерений.

В портативных (карманных и др.) поисковых радиометрах чаще всего используются слуховые, световые и стрелочные индикаторы (телефон и неоновая лампочка, фиксирующие каждый импульс характерным щелчком или вспышкой света, микроамперметр и т. п.).

Питание радиометрической аппаратуры осуществляется от сухих гальванических батарей и аккумуляторов, специальных малогабаритных ламповых генераторов и преобразователей (в полевых приборах, требующих автономного питания) и промышленной сети переменного тока (стационарные лабораторные установки и др.).

Стабилизация напряжения обеспечивается с помощью феррорезонансных трансформаторов, газовых и электропных стабилизаторов.

Основным назначением входных и выходных каскадов радиометрических приборов является формирование сигналов по величине, форме и длительности для обеспечения четкой работы пересчетных схем интегрирующих ячеек и показывающих приборов (без накладки импульсов друг на друга и других помех).

Схемы совпадений и антисовпадений импульсов применяются в наиболее сложных радиометрах (с направлением приемом излучения, исключением космического и другого внешнего фона и т. п.).

**Статистические погрешности, чувствительность и фон радиометров.** Существенными характеристиками радиометрических приборов являются их точность, чувствительность, так называемый порог уверенного отсчета (пороговая чувствительность) и фон.

Если принять необходимые меры для исключения возможных систематических ошибок, то точность измерений радиометрами определяется главным образом флюктуациями прибора, обусловленными статистическим характером радиоактивных излучений.

Абсолютная статистическая ошибка отдельного наблюдения скорости счета будет пропорциональна квадратному корню из средней скорости счета и обратно пропорциональна квадратному корню из продолжительности наблюдения.

Согласно теории радиоактивных флюктуаций при малом времени наблюдений по сравнению с периодом полураспада абсолютная средняя квадратичная ошибка единичного измерения (стандартное отклонение) в импульсном методе измерений выражается формулой

$$\sigma = \sqrt{N}, \quad (11)$$

где  $N$  — число зарегистрированных статистически распределенных во времени частиц (импульсов).

Отсюда относительная средняя квадратичная погрешность отдельного измерения ( $\delta N$ ) определится из выражения:

$$\delta N = \frac{\sigma}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (12)$$

Часто вместо средних квадратичных пользуются так называемыми вероятными ошибками, соответственно равными  $0,67\sigma$  и  $0,67\delta$  \*.

Если счетная схема регистрирует не отдельные импульсы, а суммарное их количество с отсчетами на стрелочном приборе, т. е. имеет интегрирующий контур с постоянной времени, равной  $RC$ , то отно-

\* Ошибки больше и меньше этих величин равновероятны.

сительная средняя квадратичная погрешность отдельного измерения в этом случае определяется из выражения

$$\delta A = \frac{1}{\sqrt{2}ARC}, \quad (13)$$

где  $A$  — скорость счета.

Аналогичной формулой выражается и относительное колебание положения пидекса прибора при измерении позитронного тока методом постоянного отклонения.

В большинстве случаев при измерениях радиоактивности результат получается как разность между показаниями прибора в присутствии измеряемого излучения  $N_1$  и без него —  $N_2$  (фон). В этом случае согласно теории ошибок стандартное отклонение единичного измерения выражается формулой

$$\sigma = \sqrt{N_1 + N_2}, \quad (14)$$

а относительная погрешность формулой

$$\delta = \frac{\sqrt{N_1 + N_2}}{N_1 - N_2}, \quad (15)$$

т. е. ошибка отдельного измерения увеличивается с возрастанием фона.

Порогом (пределом) чувствительности для радиометров принято считать такую величину регистрируемой ими активности, которая уверенно превышает (в 3—4 раза) стандартное отклонение фона.

Чувствительность радиометров ( $\eta$ ) обычно выражается числом импульсов в минуту, приходящемся на 1 мкp/ч или на единицу концентрации радиоактивного элемента (например, на 0,01% рапповесного урана) в линейной части эталонировочной характеристики. Для снижения порога чувствительности необходимо повышать чувствительность прибора, увеличивать число отсчитываемых импульсов (или время наблюдений) и уменьшать фон.

Как видно из данных табл. 4, чувствительность серийных радиометров, применяемых в настоящее время при поисках урана, изменяется в широких пределах — от 0,5 до 150 имп/сек на 1 мкp/ч, причем наиболее чувствительными из них являются самолетные приборы, которые одновременно обладают и наименьшим порогом чувствительности.

Среди полевых переносных, каротажных и лабораторных радиометров наибольшей чувствительностью обладают сцинтилляционные приборы, а также радиометры со счетчиками типа ВС.

Одним из часто используемых в радиометрах способов повышения чувствительности является увеличение чувствительной поверхности (количества) датчиков излучений. Предел чувствительности радиометров определяется величиной присущего им фона, т. е. величиной показаний при отсутствии воздействия измеряемого излучения.

При измерениях радиоактивности геологических образований показания радиометров всегда складываются из эффекта пелледеуемого излучения и фона, обусловленного следующими источниками:

- 1) космическим излучением (космический фон — КФ);
- 2) остаточным радиоактивным загрязнением материалов, из которых изготовляются счетные трубки и гильзы радиометров, и наличием ложных импульсов или саморазрядов в счетчиках (собственный или остаточный фон прибора);
- 3) примесями радиоактивных элементов, присутствующими в окружающей прибор атмосфере и предметах\*.

Суммарную величину космического и остаточного фона называют натуральным фоном (НФ) прибора.

Остаточный фон является практически постоянной величиной и для радиометров с газоразрядными счетчиками обычно не превышает 2—3 мкр/ч. Космическая составляющая НФ для этих радиометров на уровне моря составляет, примерно, такую же величину и возрастает с увеличением высоты примерно на 1,5 мкр/ч на каждый километр, что необходимо учитывать при аэрогаммасъемках и наземных радиометрических исследованиях в высокогорных районах с резко расчлененным рельефом. Для радиометров на сцинтилляционных счетчиках НФ обычно не превышает 2 мкр/ч.

При одних и тех же или близких размерах чувствительной поверхности катодов счетчики с вольфрамовым катодом вследствие более высокой чувствительности к мягкому излучению имеют в среднем в 1,5—2,0 раза более высокий фон, чем счетчики с медным катодом, и в то же время отличаются относительно большим разбросом по этому параметру.

При измерениях радиоактивности пород на земной поверхности учитывается полный натуральный фон. При измерениях в глубоких горных выработках и буровых скважинах можно пренебречь космическим фоном (КФ) в связи с его резким ослаблением.

При эталонировании радиометров и измерениях радиоактивности керна в величину фона, кроме космического и остаточного, включается также так называемый нормальный радиоактивный фон, обусловленный радиоактивностью окружающих прибор горных пород с кларковым содержанием радиоактивных элементов\*\*.

Учет (вычитание) фона необходим при количественных измерениях радиоактивности, особенно в тех случаях, когда измеряемый эффект излучения близок к фоновой скорости счета.

Для определения НФ  $\gamma$ -радиометров применяют следующие способы:

- \* Влиянием излучений от радиоактивных элементов, содержащихся в атмосфере, по сравнению с влиянием космического и остаточного фона обычно можно пренебречь.
- \*\* О нормальной радиоактивности пород в связи с выделением нормального и аномального поля  $\gamma$  и  $\beta$ -активности см. в гл. V, разделе 2.

1) измерения на поверхности водных бассейнов над слоем неактивной воды толщиной 2—3 м и при достаточном ( $>50$  м) удалении от берегов;

2) метод частичного поглощения  $\gamma$ -излучения, при котором используется тот факт, что в свинцовых цилиндрических фильтрах толщиной 2—3 см значительно поглощается  $\gamma$ -излучение пород и практически не поглощается жесткое космическое излучение;

3) измерения на самолетах на различной высоте (500—1500 м) с построением графика изменения фона с высотой. Экстраполяция прямолинейной конечной части такого графика к поверхности земли дает значение НФ (см. рис. 20).

При невозможности определения НФ радиометра одним из перечисленных способов за величину НФ принимается минимальное значение активности, зафиксированное на практически неактивных породах (чистые известняки, каменная соль без примесей калия, кварцевый песок и т. п.).

Приближенное определение остаточного фона может быть выполнено путем исключения КФ из НФ, для чего гильзу радиометра погружают в воду на глубину более 10 м или производят измерения в глубоких горных выработках на неактивных породах. Если геометрия измерений в процессе полевых  $\gamma$ -съемок не выдерживается постоянной вследствие изменений рельефа поверхности земли (например, при переходе от измерений на относительно плоской поверхности к измерениям в выемках или у отвесных скал), то необходимо учитывать, что показания радиометров пропорциональны телесному углу, под которым излучающий объект виден из центра детектора радиометра (см. формулу 10).

Факторы, влияющие на показания радиометров, и принципы их эталонирования. При измерении радиоактивности горных пород показания радиометров, выраженные в делениях шкалы индикаторного прибора или в импульсах в минуту, в общем случае зависят не только от концентрации и характера распределения радиоактивных элементов в породах, но и от индивидуальных свойств прибора (тип, чувствительность и спектральная характеристика датчика с гильзой), свойств излучающего объекта (спектральный состав излучения) и геометрии измерений.

В свою очередь при заданных концентрации и характере распределения радиоактивных элементов и неизменной геометрии измерений спектральный состав регистрируемого радиометром излучения определяется размерами и элементным составом (эффективным атомным номером) излучающего объекта, материалом (атомным номером) и толщиной катода счетчика и т. п. При этом в зависимости от спектральной чувствительности счетчиков, материала и толщины стенок гильзы радиометры могут регистрировать не только первичное, но частично и рассеянное породами  $\gamma$ -излучение. Энергия первичных  $\gamma$ -лучей, испускаемых естественными радиоактивными элементами, находится в пределах от 0,05 до 3 Мэв. Преобладающая часть рассеянного  $\gamma$ -излучения, возникающего при взаимодействии

первичных лучей с веществом окружающей источник среды, по своей энергии обычно не превосходит 300—400 кэв, причем интенсивность рассеянного излучения увеличивается с уменьшением энергии рассеянных квантов.

Защитные гильзы газоразрядные счетчики с катодами из легких элементов регистрируют в основном жесткое (более 0,5 Мэв) первичное  $\gamma$ -излучение, а сцинтилляционные счетчики в обычных для них гильзах без дополнительных экранов — в основном мягкое (рассеянное и первичное)  $\gamma$ -излучение (менее 0,5 Мэв).

Следует еще раз подчеркнуть, что в сцинтилляционных радиометрах средняя частота поступления импульсов на выходе фотоумножителя пропорциональна плотности потока излучения, попадающего на фотокатод, а амплитуда импульсов пропорциональна энергии квантов или частиц.

Газоразрядные счетчики с катодами из тяжелых элементов (например, типа ВС) по энергии воспринимаемого  $\gamma$ -излучения занимают промежуточное положение между указанными двумя типами счетчиков.

Таким образом, вследствие существенных различий в спектральной характеристике применяемых датчиков показания разнотипных радиометров, выраженные в делениях шкалы прибора или в импульсах в минуту, не могут быть сопоставлены или использованы для каких-либо количественных определений и построений, связанных с взаимной увязкой показаний различных приборов.

Для получения сопоставимых результатов измерений, не зависящих от индивидуальных свойств приборов, шкалы радиометров необходимо градуировать (эталонировать), т. е. определять цену деления шкалы каждого из них в общепринятых единицах мощности дозы  $\gamma$ -излучения (микрорентгенах в час или в эквивалентных микрорентгенах в час) с помощью эталонных источников  $\gamma$ -излучения при измерении известных величин интенсивности  $\gamma$ -излучения. Вместе с тем следует иметь в виду, что выражение результатов измерений  $\gamma$ -радиометрами в единицах мощности дозы является условным, поскольку радиометры не измеряют истинной интенсивности или мощности физической дозы  $\gamma$ -излучения.

Такая условность вполне допустима в тех случаях, когда эффективность счетчиков (или производимая излучением понизация) пропорциональна энергии  $\gamma$ -излучения. В частности, для газоразрядных счетчиков с катодами из легких элементов, защищенных железными гильзами толщиной 3—4 мм, в диапазоне энергий  $\gamma$ -излучения от 0,5 до 2,0 Мэв такая пропорциональность сохраняется с допустимой для практических целей точностью (см. рис. 14). Для счетчиков с катодами из тяжелых элементов и особенно для сцинтилляционных счетчиков в связи с их повышенной чувствительностью к мягкому  $\gamma$ -излучению дело обстоит сложнее (см. рис. 14 и 15).

Градуировка и выражение результатов измерений счетчиками с катодами из тяжелых элементов в единицах мощности дозы имеет физический смысл только при условии исключения влияния на

измеряемый эффект рассеянного  $\gamma$ -излучения путем дополнительного экранирования этих счетчиков. В связи с особенностями спектральной чувствительности сцинтилляционных счетчиков, выражение их показаний в микрорентгенах в час имеет еще более условный характер.

Как установлено опытом, показания однотипных сцинтилляционных радиометров, проградуированных с исключением влияния рассеянного излучения, по имеющим различную настройку (различную пороговую дискриминацию импульсов), не могут быть сопоставлены и увязаны между собой. Увязка результатов измерений газоразрядными и сцинтилляционными радиометрами возможна лишь при условии дополнительного экранирования сцинтилляционных счетчиков свинцом толщиной 1—2 мм.

Вполне сопоставимыми могут быть показания таких радиометров, которые регистрируют только жесткое  $\gamma$ -излучение и проградуированы эталонами с близким к исследуемому составом спектра.

Для характеристики радиоактивных веществ по создаваемой ими дозе  $\gamma$ -излучения используются так называемой  $\gamma$ -постоянной ( $K_\gamma$ ), которая показывает, какую дозу  $\gamma$ -излучения создает точечный источник радиоактивного изотопа активностью 1 мкюри на расстоянии 1 см за 1 ч.

Экспериментально установлено, что для радия в равновесии с продуктами его распада, заключенного в платиновый фильтр толщиной 0,5 мм,  $\gamma$ -постоянная равна 8,4 р/ч. Мощность дозы, создаваемая некоторым количеством радия  $a$  на расстоянии  $r$  от источника, например 1 юри радия (в платиновом фильтре толщиной 0,5 мм) на расстоянии 1 м от него, вычисляется по формуле

$$P = K_\gamma \frac{a}{r} = 8,4 \frac{10^3}{100^2} = 0,84 \text{ р/ч.} \quad (16)$$

Поглощенная доза при измерении радиометрами в конечном счете будет определяться свойствами излучения (интенсивность и спектральный состав), измерительного прибора (спектральная чувствительность) и поглощающих сред, находящихся между источником и приемником излучения.

В соответствии с изложенным выше эталонирование радиометров с газоразрядными счетчиками, защищенными металлическими гильзами с толщиной стенок, достаточной для поглощения рассеянного  $\gamma$ -излучения, производится без дополнительного их экранирования с помощью точечных радиевых эталонов, излучение которых при этих условиях по своему спектральному составу близко к  $\gamma$ -излучению горных пород (Баранов, 1956; «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957).

Сцинтилляционные радиометры также эталонируются с помощью точечных радиевых эталонов, но с обязательным дополнительным экранированием гильзы радиометра снизу свинцом толщиной 4—5 мм (получилиндрический экран) для устранения влияния рассеянного поверхностью земли  $\gamma$ -излучения эталона.

Графически выраженная зависимость показаний прибора от интенсивности  $\gamma$ -излучения называется эталонировочной характеристикой радиометра. Эталонировочные характеристики первых, наиболее чувствительных диапазонов измерений обычно линейны, а для последних диапазонов, на которых начинают сказываться просчеты импульсов счетной схемой, концы эталонировочных характеристик загибаются к оси абсцисс. Таким образом, просчет импульсов учитывается с помощью эталонировочного графика. Более подробные указания по эталонированию радиометров даны в главах, посвященных отдельным радиометрическим методам. При поисках, когда главной задачей является выявление и локализация рудных радиометрических аномалий, предпочтительно использовать наиболее чувствительные полевые радиометры, регистрирующие вряду с жестким и мягкое  $\gamma$ -излучение, а также, если возможно, и жесткое  $\beta$ -излучение, несмотря на то что показания таких радиометров не будут строго пропорциональны концентрации радиоактивных элементов в горных породах. Более точная количественная оценка выявленных при поисках радиометрических аномалий и установление соответствующих им концентраций радиоактивных элементов являются специальной задачей, выполняемой с помощью радиометрического опробования на месте залегания пород с применением дополнительных экранов или путем радиометрического и радиохимического анализа отбираемых проб (см. гл. X).

Для количественной интерпретации данных  $\gamma$ -измерений ( $\gamma$ -картаж, радиометрическое опробование и др.) важную роль играет величина так называемого пересчетного коэффициента, связывающего показания радиометров (в  $\text{мкр}/\text{ч}$ ) с концентрацией радиоактивных элементов в горной породе.

Величина пересчетного коэффициента, выражаемого в микро-рентгенах в час на  $0,01\%$  равновесного урана, зависит от типа и материала катода счетчика, материала и толщины стенок гильзы радиометра, вещественного состава пород ( $Z_{\text{эф}}$ ) и геометрии измерений. Поэтому, пользуясь темп или иными значениями пересчетного коэффициента, необходимо учитывать условия, для которых они получены.

Экспериментальные значения пересчетного коэффициента при измерении газоразрядными счетчиками с различной спектральной характеристикой на поверхности полубесконечного (2 $\pi$ -геометрия) и внутри бесконечного (4 $\pi$ -геометрия) пластов равновесных и неэманящих урановых руд силикатного состава с равномерно распределенным радиоактивным веществом (при различной толщине гильз) приведены в табл. 3 (Грамаков, Пашкин, Ширлева, 1959).

Как видно из данных табл. 3, более высокими значениями пересчетных коэффициентов характеризуются счетчики типа ВС, отличающиеся повышенной чувствительностью к мягкому  $\gamma$ -излучению. Отношения пересчетных коэффициентов бесконечного и полубесконечного пластов для этих счетчиков лежат в пределах 2—3, достигая максимальных значений за счет влияния рассеянного излучения.

Таблица 3

Пересчетные коэффициенты в микрорентгенах в час на 0,01% U для различных счетчиков

Толщина гильз	Тип счетчика	Бесконечный пласт	Полубесконечный пласт	Отношение коэффициентов бесконечного и полубесконечного пластов
1 мм Al	MC	144	56	2,57
	BC	234	79	2,96
1 мм Fe + 3 мм Pb	MC	74	39	1,90
	BC	77	37	2,08

В практике  $\gamma$ -каротажа на урановых месторождениях пересчетный коэффициент принимается равным 115 мкр/ч на 0,01% равновесного урана (см. гл. X, 4). Понятно, что в случае отсутствия равновесия между ураном и радием или наличия в породе наряду с ураном также

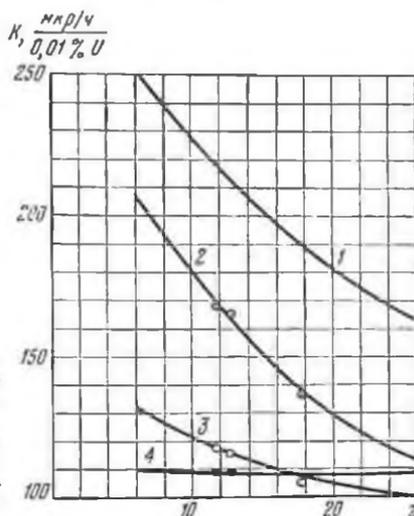


Рис. 16. Зависимость пересчетного коэффициента от атомного номера среды с содержанием урана 0,1%

Типы счетчиков: 1 — NaJ (Ti), 40 × 50 мм; 2 — BC-4; 3 — MC-4; 4 — NaJ (Ti), 30 × 15 мм (2 — 3 — в железном корпусе толщиной 3 мм, 4 — в свинцовой оболочке толщиной 2 мм)

тория и калия количественные расчеты с помощью пересчетного коэффициента фактически дадут концентрацию радия или суммарную концентрацию всех присутствующих  $\gamma$ -излучателей в эквиваленте равновесного урана, а не собственно концентрацию урана. Влияние тория и калия-40 по  $\gamma$ -лучам оценивается с учетом урановых эквивалентов плп путем измерений на месте залегания пород специальными радиометрами — анализаторами.

На рис. 16 показана экспериментальная зависимость пересчетного коэффициента от Z для счетчиков типа MC, BC и сцинтилляционных

счетчиков при различной толщине стенок железных гильз в диапазоне изменения  $Z$  от 6 до 26 (по А. К. Овчинникову и др., 1962). Как видно из рис. 16, в указанном диапазоне изменения  $Z$  при экранировании газоразрядных счетчиков типа МС железом толщиной 3 мм пересчетный коэффициент практически мало будет зависеть от вещественного состава пород. Для сцинтилляционных радиометров достаточно дополнительного свинцового экрана толщиной 2,0—2,5 мм.

**Применяемая аппаратура.** Геологическая эффективность и производительность поисков в значительной мере определяется оснащением поисковых партий современной радиометрической аппаратурой.

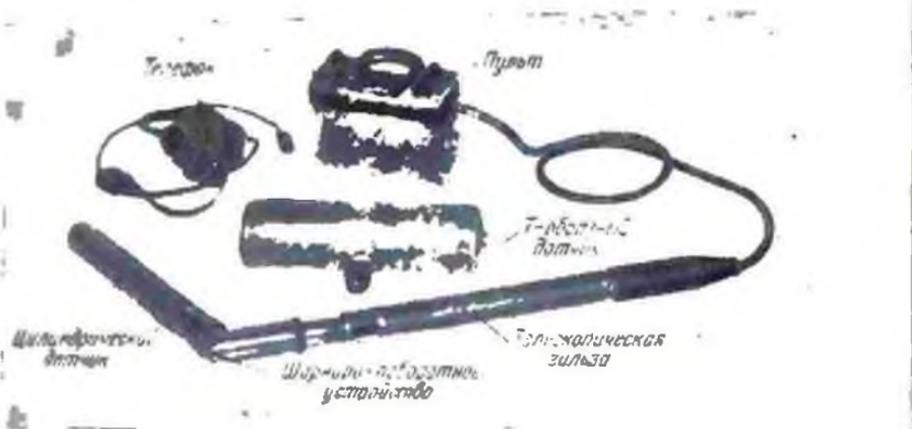


Рис. 17. Общий вид сцинтилляционного переносного полевого у-спектрометра СП-3

Экспедиционные (полевые) условия эксплуатации радиометрической аппаратуры при поисках урановых руд предъявляют повышенные требования к ее портативности, надежности, стабильности в работе и экономичности по потребляемой мощности электроэнергии. Отечественной промышленностью выпускается разнообразная по назначению специализированная и комбинированная (универсальная) радиометрическая и дозиметрическая аппаратура.

Технические характеристики основных типов радиометров и эманометров, применяемых в настоящее время при поисках урановых руд, даны в сводной табл. 4 для переносных полевых, самолетных, автомобильных, каротажных радиометров и эманометров. На рис. 17, 18, 19 показаны общие виды некоторых из перечисленных в табл. 4 радиометров и эманометров.

Как видно из данных табл. 4, в настоящее время при наземных поисках применяются портативные и экономичные радиометры преимущественно со сцинтилляционными счетчиками с порогом чувствительности в несколько микрорентген в час, радиотехнические схемы которых часто целиком выполнены на полупроводниках.

Пульты и выносные гильзы радиометров, в которых размещаются приемники излучения, обычно делаются герметичными, а в отдельных случаях и без пекрообразующих и воспламеняющих элементов, в связи с чем возможно применение таких радиометров как в условиях дождливой погоды, так и в подземных выработках, в том числе опасных по взрыву газа и пыли, а также при погружении гильзы радиометра в воду.

В большинстве случаев с помощью переносных полевых радиометров измерения могут производиться как по  $\gamma$ -, так и по  $\beta$ - или

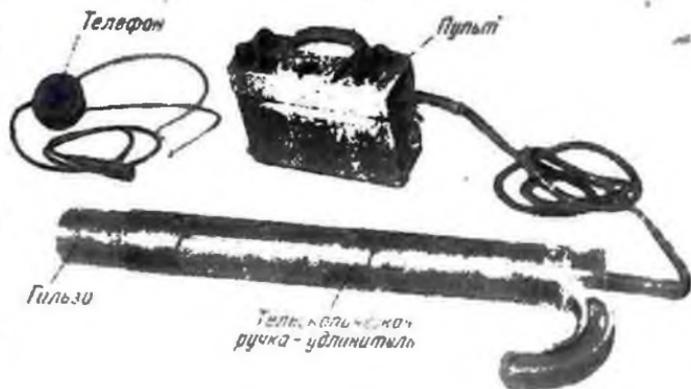


Рис. 18. Общий вид поискового радиометра СРП-2 («Кристалл»)

суммарному  $\gamma + \beta$ -излучению, что является важным при поисках урановых рудопроявлений со значительным смещением радиоактивного равновесия в сторону недостатка радия и его продуктов распада по отношению к урану.

Для обеспечения возможности обследования труднодоступных мест и удобства в работе гильзы радиометров соединяются с пультами 1,5—2,0-метровыми гибкими шлангами, имеют телескопические устройства или приспособления для удлинителей рукояток и шарнирно-поворотные устройства для головки гильзы, в которой размещается приемник излучения. Эмаметры монтируются на раздвижных переносных треногах.

Малогабаритные (карманные и др.) радиометры со звуковой и световой визуальной индикацией скорости счета применяются только для предварительного чисто качественного выделения радиометрических аномалий, а для более точных поисковых радиометрических съемок используются радиометры с интегральными (стрелочными) и импульсными индикаторами, отличающиеся более высокой чувствительностью, стабильностью и линейностью счетных

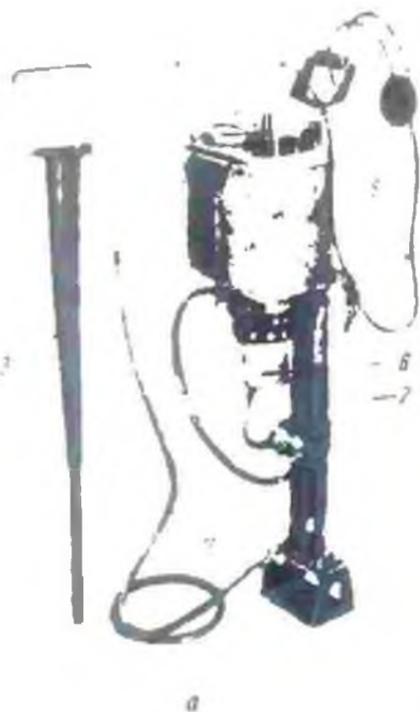


Рис. 19. Общий вид сцинтилляционного омапметра ЗМ-6

а — полевой вариант; б — лабораторный вариант для измерения  $\alpha$ -активности пористых проб  
 1 — пульт; 2 — насос; 3 — приборотборник; 4 — соединительные трубки; 5 — телефон; 6 — эманационная камера; 7 — осушитель; 8 — ручка замка для соединения насоса с пультом; 9 — тарелочка для проб; 10 — насадка для проб; 11 — подставка; 12 — светопровод; 13 — люминофор; 14 — электромагнитный счетчик (ЭМС)



характеристик в широком диапазоне измеряемых активностей. Применение сцинтилляционной, особенно  $\gamma$ -спектрометрической аппаратуры расширяет возможности радиометрических поисков урана. В частности, сцинтилляционная интегральная аппаратура существенно увеличивает производительность измерений, облегчает выделение тонких активных пропластков и усиливает дифференциацию диаграмм радиоактивного каротажа и опробования, повышает относительную величину амплитуды радиометрических аномалий (по отношению к нормальному фону), а  $\gamma$ -спектрометрическая сцинтилляционная аппаратура, кроме того, позволяет осуществлять раздельные количественные определения концентраций  $U$  ( $Ra$ ),  $Th$  и  $K$  в горных породах и рудах на месте их залегания.

Подробное описание конструкций, радиотехнических схем и правил эксплуатации радиометров и эманометров для геологоразведочного применения можно найти в заводских инструкциях к ним.

**Единицы измерений** \*. Мерой активности любого количества радиоактивного изотопа служит число происходящих в нем в единицу времени актов радиоактивного распада.

В качестве единицы радиоактивности принята единица, называемая *кюри*. *Кюри*-активность такого количества радиоактивного вещества, в котором в 1 сек происходит  $3,700 \cdot 10^{10}$  актов распада \*\*. 1 *кюри* приблизительно (с точностью до 2%) соответствует 1 г радия  $Pa$ , следовательно, находящимся с ним в равновесии количествам каждого из его продуктов распада.

Наряду с основной единицей *кюри* употребляются также более мелкие производные от нее единицы: милликюри (*мкюри* =  $10^{-3}$  *кюри*), микрокюри (*мккюри* =  $10^{-6}$  *кюри*) и т. д.

Удельная активность и концентрация радиоактивных элементов выражается соответственно в *кюри* (для радона и искусственных радиоактивных элементов) или в граммах (для урана, радия и тория) на единицу веса или объема ( $л, см^3$ ) исследуемого вещества. Для концентрации радона в жидкостях и газах принята специальная единица — *эман*, равная  $10^{-10}$  *кюри* на 1 л.

Единицей дозы рентгеновского и  $\gamma$ -излучений является рентген ( $R$ ). При поглощении дозы излучения, равной 1  $R$ , в 1  $см^3$  воздуха (0,001293 г) при 0° С и нормальном давлении образуется электрический заряд в 1 эл.-ст. ед.

Одному рентгену соответствует ионизация, равная около  $2,08 \times 10^9$  пар ионов на 0,001293 г воздуха ( $1,61 \cdot 10^{12}$  пар ионов на 1 г

\* В соответствии с действующим ГОСТ 8848—63 «Единицы радиоактивности и ионизирующих излучений» применение приводимых здесь единиц, отвечающих предшествующему ГОСТ 8848—58 и широко распространенных в практике разведочной радиометрии по настоящее время, допускается в качестве внесистемных.

\*\* Согласно определению единица «кюри» должна применяться только для характеристики  $\alpha$ - и  $\beta$ -активности радиоактивных изотопов.

Тип и название прибора	Регистрируемое излучение	Тип индикатора излучения	Тип регистрирующего устройства	Предел измерений, $\mu\text{кр}/\text{ч}$	Чувствительность или порог уверенного отчета <sup>1</sup>
1	2	3	4	5	6
<b>Переносные полевые радиометры</b>					
СРП-2 («Кристалл»), сцинтилляционный поисковый радиометр <sup>2</sup>	$\gamma, \beta$	Монокристалл NaJ(Tl) + ФЭУ-35	Стрелочный прибор и телефон	1250 Поддиапазоны: 1 50 11 250 111 1250 <sup>3</sup> $\tau = 2$ и $5$ сек	Порог чувствительности: 1,5—2,2 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ (при уровне фона 8—10 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ и с постоянной времени $\tau = 5$ сек)
РПП-1 («Рупор»), поисковый радиометр <sup>4</sup>	$\beta, \gamma$	4 счетчика СТС-8 (Т-образный датчик); счетчик СТС-6 или СТС-8 (цилиндрический датчик)	То же	1000 5000	Порог чувствительности: 3—5 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ (при уровне $\gamma$ -фона 10 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ )
ПГР («Застава»), поисковый $\beta, \gamma$ -радиометр	$\beta, \gamma$	Гамма датчик—4 счетчика СТС-8; $\beta$ -датчик—4 счетчика СТС-6	То же	1000 Поддиапазоны: 1 50 11 200 111 1000 Б-100 (для $\beta$ -лучей). Время полного установления стрелки прибора на всех поддиапазонах — не более 40 сек	Порог чувствительности: 3 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ (при фоне 20 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ и одномоментном наблюдении)
СП-3, поисковый	$\gamma$	Монокристалл	При малых ско-	Максимальная	скорость счета

одиоканальный сцинтилляционный радиометр — анализатор

ростях счета — электромеханический счетчик. При высоких скоростях — интенсиметр с микроамперметром

10 000  $\text{имп}/\text{сек}$ . Измеряемый интервал энергий  $\gamma$ -излучения — от 0,3 до 3,0 Мэв (разделен на 60 ступеней). Разрешающее время — не более 10  $\mu\text{сек}$ . Пределы измерения концентраций: урана — от кларковых до 0,5%; тория — от кларковых до 1,0%; калия — от кларковых до 100%

### Самолетные и автомобильные радиометры

АРС-2, самолетный сцинтилляционный двухканальный радиометр со счетно-решающей схемой АПВ для автоматического введения поправки за высоту полета<sup>5</sup>

$\gamma$

Блок кристаллов NaJ(Tl) + ФЭУ-49

Автоматическая непрерывная запись двумя перописущими самописцами

Канал общего счета: 1.11 (200  $\text{имп}/\text{сек}$ )  
11.22 (4000  $\text{имп}/\text{сек}$ )  
 $\tau_1 = 0,75 \pm 0,1$  сек  
 $\tau_2 = 1,5 \pm 0,1$  сек  
Канал разделения: 30  
 $\tau = 2,5 \pm 0,1$  сек

Чувствительность не менее 180  $\text{имп}/\text{сек}$  на 1  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  (по радиовому эталону)  
Чувствительность не менее 3  $\text{имп}/\text{сек}$  на 1  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  при коэффициенте разделения  $\eta = 2$  (по радиовому эталону)

АСГ-46, комплексная аэрогеофизическая ( $\gamma$ -магнитная) станция с радиометром АРС-2 и магнитометром АМФ-21

$\gamma$ -излучение и напряженность магнитного поля Земли

Феррозондовый самоориентирующийся магнитометр

Гамма-измерения:  
то же, что у радиометра АРС-2  
Магнитные измерения:  
Автоматическая непрерывная запись самописцем гальванометром  
Основные пределы измерения:  
 $\pm 200 \gamma$  при постоянной 5  $\gamma/\text{м.м}$  и  $\pm 1000 \gamma$  при постоянной 25  $\gamma/\text{м.м}$ .  
Пределы измерения могут быть расширены до  $\pm 6600$  и  $\pm 11 000 \gamma$  автоматическим ступенчатым компенсатором

Порог чувствительности не более 5  $\gamma$ .  
Начальная компенсация магнитного поля осуществляется в пределах 30 000—70 000  $\gamma$ .  
Постоянное время записи:  
 $\tau_1 = 1,5 \pm 0,1$  сек;  
 $\tau_2 = 0,75 \pm 0,1$  сек

Тип и название прибора	Регистрируемое излучение	Тип приемника излучения	Тип регистрирующего устройства	Пределы измерений, $\mu\text{кр}/\text{ч}$	Чувствительность или порог уверенного отчета <sup>1</sup>
1	2	3	4	5	6
<p>АСГ-48, комплексная (<math>\gamma</math>-магнитная) аэрогеофизическая станция, включающая:</p> <p>1) четырехканальный <math>\gamma</math>-спектрометр с аналоговым счетно-решающим устройством для автоматической раздельной регистрации концентраций;</p> <p>2) типовой аэромагнитометр АМФ-21;</p> <p>3) курсограф для автоматической записи трассы полета;</p> <p>4) высотомер для записи пестипной высоты полета</p> <p>РА-69, автомобильный радиометр</p>	<p><math>\gamma</math>-излучение и направление полного вектора напряженности магнитного поля земли</p>	<p>Пластмассовой сцинтиллятор — моноблок из полистирола со сцинтилирующими (<i>n</i>-терфенил) и смещающими (ПОПОП) добавками + два ФЭУ-49</p>	<p>Гамма-спектрометрические измерения</p> <p>Семиканальный двухзарядный перописующий регистратор (7 перописующих миллиамперметров)</p> <p>Магнитные измерения то же, что и у прибора АСГ-46</p> <p>Автоматическая непрерывная за-</p>	<p>Пределы измерений концентраций:  <math>U(\text{Ra}) 1 - 70 \cdot 10^{-4}\%</math>;  <math>\text{Th} - 1,5 - 140 \cdot 10^{-4}\%</math>;  <math>\text{K} - 0,4 - 42\%</math></p> <p>40          Поддиапазоны;</p>	<p>Чувствительность, интегрального (ОК) канала — 500 <i>имп/сек</i> на 1 <math>\mu\text{кр}/\text{ч}</math> (по радионому эталону № 10)</p> <p>Чувствительность не менее 65 <i>имп/сек</i></p>
<p>АГС-3, автомобильный сцинтилляционный <math>\gamma</math>-спектрометр со счетно-решающим устройством для раздельной (непрерывной или эквивалентной) регистрации концентраций</p>	<p><math>\gamma</math></p>	<p>в каждой)</p> <p>Монокристалл <math>\text{NaJ}(\text{Tl}) + \text{ФЭУ-49}</math></p>	<p>пись одним самописцем</p> <p>Четырехканальный перописующий регистратор (4 перописующих миллиамперметра)</p>	<p>1 20          II 40</p> <p>Пределы измерений концентраций:  <math>U(\text{Ra}) - 0,8 - 600 \times 10^{-4}\%</math>;  <math>\text{Th} - 1,0 - 1200 \cdot 10^{-4}\%</math>;  <math>\text{K} - 0,3 - 100\%</math></p>	<p>на 1 <math>\mu\text{кр}/\text{ч}</math>. Порог чувствительности (при <math>\tau = 2,5 \text{ сек}</math>) 0,6 <math>\mu\text{кр}/\text{ч}</math></p> <p>Чувствительность интегрального (ОК) канала — 130 <i>имп/сек</i> на 1 <math>\mu\text{кр}/\text{ч}</math> (по радионому эталону № 10)</p>

## Каротажные радиометры

<p>КРТ («Рица»), тяжелый каротажный радиометр для <math>\gamma</math>-каротажа буровых скважин до глубины 1000 м</p>	<p><math>\gamma</math></p>	<p>МС-9 (МС-19) и МС-16 (по вмещающим породам); МС-13 или МС-14 (по рудной зоне)</p>	<p>Автоматическая непрерывная запись самописцем гальванометром; стрелочный прибор, ЭМС и телефон</p>	<p>20 000          Поддиапазоны:          I 100 (МС-9)          II 250 (МС-9)          III 2000 (МС-14)          IV 10 000 } МС-13          V 20 000</p>	<p>Порог чувствительности: 7,2 <math>\mu\text{кр}/\text{ч}</math> (со счетчиком МС-9), <math>\tau = 5</math> и 20 <i>сек</i> (I—IV поддиапазоны); <math>\tau = 3,5</math> и 12 <i>сек</i> (V поддиапазон)</p>
<p>КРЛ-М, легкий каротажный радиометр для <math>\gamma</math>-каротажа вертикальных, горизонтальных, наклонных и восстающих скважин (поверхностного и подземного бурения) до глубины 120 м и глубинных шуров)</p>	<p><math>\gamma</math></p>	<p>МС-14 или МС-13</p>	<p>Стрелочный прибор, ЭМС и телефон</p>	<p>10 000          Поддиапазоны:          I 100          II 500          III 2000          IV 10 000 (МС-14)          25 000 (МС-13)          400—600 (ЭМС)</p>	<p>Порог чувствительности — 10 <math>\mu\text{кр}/\text{ч}</math>; <math>\tau = 5, 10, 15</math> и 20 <i>сек</i></p>

Тип и название прибора	Регистрируемое излучение	Тип приемника излучения	Тип регистрирующего устройства	Предел измерений, $\mu\text{кр}/\text{ч}$	Чувствительность или порог уверенного отчета <sup>1</sup>
1	2	3	4	5	6
ПРК-2 («Виток-2»), переносный сцинтилляционный радиометр для автоматического каротажа рудных скважин диаметром от 46 мм и более и глубиной до 150 м <sup>7</sup>	$\gamma$	NaJ(Tl) + ФЭУ-676	Самописец П360 или П361	10 000 Поддиапазоны: I 100 II 250 III 1000 IV 2500 V 10 000	Порог чувствительности 4 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ . Чувствительность 0,5 $\mu\text{мл}/\text{сек}$ на 1 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ при $\tau = 5 \text{ сек}$ и фоне, равном 10 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ для экранированного сцинтиллятора. Без фильтра порог чувствительности 2,5 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ $\tau = 2$ и 5 $\text{сек}$
РАРК, разборная аппаратура для $\gamma$ -, $\gamma$ - $\gamma$ - и нейтронного $\gamma$ -каротажа скважин глубиной до 1000 м (применяется при массовых поисках урана) <sup>8</sup>	$\gamma$	2 счетчика ВС-9 или 2 счетчика МС-9	ЭМС и полуавтоматическая или автоматическая непрерывная запись (в зависимости от типа каротажной станции, с которой применяется панель прибора РАРК)	600 Поддиапазоны: I 40 II 75 III 150 IV 300 V 600	Чувствительность канала ГК 1 1 $\mu\text{мл}/\text{сек}$ на 1 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ ; $\tau = 6, 12, 18$ и 24 $\text{сек}$
КУ-59, радиометр каротажной установки для $\gamma$ -измерений в процессе проходки скважин самоходным буровым агрегатом	$\gamma$	Цилиндрический кристаллофосфор размером 27 x 25 мм + ФЭУ - 35	Автоматическая непрерывная регистрация интенсивности излучения самописцем СК-100М с синхронным	$\gamma$ -измерения: 10 000 Поддиапазоны: I 20 ( $\tau = 5$ и 10 $\text{сек}$ ) II 100 III 500 IV 2500 } ( $\tau = 2,5$ и 5 $\text{сек}$ )	Порог чувствительности (при фоне 5 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ ) — 1,2—1,4 $\mu\text{кр}/\text{ч}$ ; Чувствительность 2,7 $\mu\text{мл}/\text{сек}$ на 1 $\mu\text{кр}/\text{ч}$

СУГП-10 до глубины 25 м (с отбором проб грунта, воды или газа с забоя скважин)

приводом ленты и стрелочный прибор

V 10 000  
( $\tau = 2$  и 2,5  $\text{сек}$ )

Лабораторные радиометры

РАЛ-1, высокочувствительный лабораторный  $\alpha$ -радиометр для радиометрического анализа порошковых проб и эманационных измерений в условиях полевых и стационарных лабораторий

$\alpha$

Люминофор ZnS(Ag) и эмаляционная камера, покрытая изнутри сцинтиллирующим светосоставом К-9, в сочетании с ФЭУ-49

ЭМС с пересчетом 1:10

До нескольких процентов равновесного урана и до  $10^{-8}$  кюри при эманационных измерениях

При измерениях радиоактивности порошковых проб: чувствительность 14 000  $\mu\text{мл}/\text{мин}$  на 1% равновесного урана; порог чувствительности (при времени измерения  $t = 10 \text{ мин}$ )  $2 \cdot 10^{-4}\%$  равновесного урана. Собственный фон 4  $\mu\text{мл}/\text{мин}$ . При эманационных измерениях: чувствительность 5  $\mu\text{мл}/\text{сек}$  на  $10^{10}$  кюри; порог чувствительности  $\sim 4 \cdot 10^{13}$  кюри. Собственный фон 1  $\mu\text{мл}/\text{мин}$

Б-2, лабораторный радиометр для радиометрического анализа порошковых проб<sup>9</sup>

$\beta, \gamma$

Цилиндрические газоразрядные  $\beta$ - и  $\gamma$ -счетчики различных типов (однокольные или двухкольные или торцовые)

ЭМС с пересчетом: 1:1, 1:4, 1:16 и 1:64

Максимальная скорость счета 6400  $\mu\text{мл}/\text{сек}$

Порог чувствительности: 0,001% равновесного урана

ЛСУ-5к («Лаура»), лабораторная сцинтилляционная пятиканальная установка

$\beta, \gamma$

Приемник  $\gamma$ -излучения монокристалл NaJ(Tl)

ЭМС с пересчетом: 1:2, 1:10,

Максимальная импульсная нагрузка

Пороги чувствительности определенных радиоактивных

Тип и название прибора	Регистрируемое излучение	Тип приемника излучения	Тип регистрирующего устройства	Предел измерений, $\text{мкр/ч}$	Чувствительность или порог ушеронного отчета <sup>1</sup>
1	2	3	4	5	6
для радиометрического анализа горных пород и руд		Приемник $\beta$ -излучения — сцинтиллирующий слой этильбена	1:100. Интенсиметр со стрелочным прибором	по входу установки 10 000 $\text{имп/сек}$	элементов (при массе не более 350 г и эквивалентности 60 $\text{мин}$ ) U — $5,5 \cdot 10^{-4}\%$ ; Ra — $1,5 \cdot 10^{-4}\%$ (в эквиваленте урана); Th — $3,0 \cdot 10^{-4}\%$ ; K — 0,6%
<b>Полевые эманометры</b>					
СГ-11, переносный полевой полизационный эманометр для определения концентраций радона и торона в пробах почвенного воздуха при полевой эманационной съемке	а	Полизационная (эманационная) камера	Визуальная индикация по скорости движения нити электрометра	От 0,1 до 5000 $\text{эман}$	Чувствительность: 0,3—0,4 $\text{эман}$ на одно деление шкалы микроскопа и минуту (при вольтовой наиболее употребительной чувствительности электрометра ~ 20 $\text{дел/ч}$ ). Вольтовая чувствительность регулируется в пределах 5—60 $\text{дел/в}$
ЭМ-6 (полевой вариант), портативный сцинтилляционный эманометр для определения концентрации эманаций в пробах почвенного (атмосферного) воздуха при полевой эманационной съемке <sup>10</sup>	а	Сцинтилляционная (эманационная) камера, внутренняя поверхность которой покрыта светосоставом K-9 + ФЭМ-35	Стрелочный измеритель скорости счета	1250 $\text{эман}$ Поддиапазоны I 50 II 250 III 1250 $\tau = 4,5 \text{ сек}$	Чувствительность 1 $\text{имп/сек}$ на 1 $\text{эман}$ (при 3 $\text{мин}$ накопления продуктов распада радона в камере)

сферного) воздуха при полевой эманационной съемке<sup>10</sup>

#### Примечания.

- Для радиометров по отношению к  $\gamma$ -излучению радиового точечного источника.
- Для каротажа мелких скважин (глубиной до 25 м) с пультом прибора СРП-2 используется сцинтилляционный каротажный датчик (NaI(Tl) + ФЭУ-31) типа СРП-2К с наружным диаметром зондирующей гильзы 34 мм. Пульт прибора СРП-2 в сочетании со специально изготовленным гильзой диаметром 26 мм (с использованием деталей, размещенных в гильзах радиометров СРП-2), применяется для шпуровой  $\gamma$ -съемки и каротажа мелких скважин малого диаметра.
- С помощью внутреннего регулятора данный диапазон может быть расширен до 2500  $\text{мкр/ч}$ .
- Рудничный вариант прибора РПР (со сменными счетчиками и диапазонами измерений до 5000, 25 000 и 75 000  $\text{мкр/ч}$ ) РГН («Фон») — радиометр направленного приема  $\gamma$ -излучения компенсационного типа для  $\gamma$ -пробования рудных отвалов, складочного материала и урановых руд в естественном залегании при наличии высокого и постоянного фона  $\gamma$ -излучения.
- Вертолетный вариант радиометра АРС-2 имеет марку РВС-1 и несколько отличается от приборов АРС-2 своей конструкцией, приспособленной для эксплуатации на вертолете МИ-1, и отсутствием схемы АПВ. Вертолетный вариант прибора АРС-3, также размещаемый на вертолете МИ-1, имеет марку ВГС-3 и отличается от АРС лишь конструктивно.
- С 1965 г. в станции АСГ-48 после выпуска опытной серии введена система контроля стабильности усиления (СКСУ). Существенно повышающая надежность получаемой информации и производительность аэрогамма-спектрометрической съемки.
- С 1967 г. радиометр «Виток-2» оснащается смешным скважинным прибором «Алмаз-4», позволяющим проводить  $\gamma$ -каротаж скважин алмазного бурения диаметром от 36 мм и глубиной до 300 м.
- Для целей массовых поисков может использоваться портативная аппаратура типа «Гамма-59» (на газоразрядных счетчиках), предназначенная для радиоактивного каротажа нефтяных, газовых, рудных и угольных скважин.
- Сдвоенная установка типа Б со специальным датчиком в свинцовом домике (две группы счетчиков МС-6, по 4 шт. в каждой, защищая экранирована от  $\gamma$ -излучения) известна под названием многосчетчиковой лабораторной установки, имеющей одинаковые с установкой Б-2 чувствительность и другие характеристики. Для лабораторных измерений радиоактивности порошковых проб по  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучению служит также декадно-счетная установка ДП-100 с блоком газового счетчика (СТС-61, СТС-5, МСТ-1) в защитном свинцовом домике. Максимальная активность, измеряемая этой установкой без просчета, равна 10 000  $\text{имп/сек}$ .
- Лабораторный вариант прибора ЭМ-6 служит для измерения  $\alpha$ -активности порошковых проб (чувствительность — 1500  $\text{имп/мин}$  на 1% равновесного урана). Наряду с полевым вариантом сцинтилляционного эманометра ЭМ-6 применяется портативный полизационный эманометр ЭМ-2 с визуальной индикацией по скорости движения нити электрометра. Верхний предел измерений для этого прибора составляет 1000  $\text{эман}$  (с поддиапазонами: I—100 и II—1000). Чувствительность соответственно равна:

для первого поддиапазона  $\frac{2 \text{ эман}}{\text{дел/мин}}$ , для второго  $\frac{20 \text{ эман}}{\text{дел/мин}}$ .

воздуха) и поглощение энергии воздухом  $0,11 \text{ эрг/см}^3$  ( $87,7 \text{ эрг/г}$ ) или  $6,86 \cdot 10^4 \text{ Мэв/см}^3$  ( $5,3 \cdot 10^7 \text{ Мэв/г}$ ).

За единицу интенсивности радиоактивного излучения принят (ГОСТ 8848—53) ватт на квадратный метр ( $\text{вт/м}^2$ ). Специального названия эта единица не имеет.

В поисково-разведочной радиометрии в качестве практической единицы для измеряемых  $\gamma$ -радиометрами величины условно принята производная единица мощности дозы\* — микрорентген в час ( $\text{мкр/ч}$ ).

Для выражения результатов полевых измерений радиометрами по  $\beta$ -излучению принята условная практическая единица — эквивалентный микрорентген в час, отвечающая такой мощности дозы  $\beta$ - или ( $\beta + \gamma$ )-излучения, при которой его воздействие на датчик радиометра эквивалентно действию  $\gamma$ -излучения интенсивностью в  $1 \text{ мкр/ч}$ .

Несмотря на условность этой единицы, выражение результатов  $\beta$ - и ( $\beta + \gamma$ )-съемок в эквивалентных микрорентгенах в час позволяет получать сопоставимые данные при измерениях одновидными градуированными радиометрами, пригодные для целей выявления и локализации пород с аномальной радиоактивностью и геологического картирования.

\* Мощность дозы — доза, отнесенная к единице времени.



## АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Аэрорадиометрический метод является ведущим в комплексе аэрогеофизических поисковых работ на уран. Этот метод заключается в выявлении самолетными радиометрами аномалий  $\gamma$ -излучения горных пород с последующей проверкой их перспективности наземными работами. За последние десятилетия аэрорадиометрической съемкой открыты многие промышленные месторождения урана. Метод позволил заново оценить геологическую перспективность отдельных регионов Советского Союза для постановки детальных наземных поисков урановых руд.

В последнее время с появлением аэрогамма-спектрометрии стало возможным раздельное определение в полете содержания радиоактивных элементов — урана (по радию), тория и калия в горных породах и рудных зонах, в связи с чем метод приобретает большое значение при геологическом прогнозировании. Анализ карт распределения радиоактивных элементов по площади аэропоисков, проводимый с учетом геологических, аэромагнитных и других материалов, открывает новые возможности для металлогенических прогнозов и поисков слабо проявленных на поверхности урановых руд («Аэрогамма-спектрометрический метод поисков месторождений урановых руд», 1967).

В настоящее время аэрогеофизические методы широко вошли в практику геологопоисковых работ не только на уран, но и на многие полезные ископаемые, в том числе на нефть и газ.

### 1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОИСКОВ УРАНА МЕТОДОМ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Размещение урановых месторождений в земной коре связано с различными металлогеническими эпохами и определяется приуроченностью их к многообразным геологическим структурам и комплексам пород: кислым эффузивам, малым интрузиям преимущественно кислого и среднего состава, жильным комплексам, куполам, штокам, разломам, зонам дробления, сопряжениям и пересечениям разрывных структур, контактам пород, ураноносным горизонтам и пластам. Выделение этих структур имеет важное значение при определении перспективности радиометрических аномалий, и поэтому комплексирование аэрорадиометрического метода с аэромагнитным существенно расширяет возможности геологической интерпретации и оценки перспективности  $\gamma$ -аномалий.

Аэрометод является наиболее эффективным при использовании его в районах со сложными формами рельефа и сухим климатом, с удовлетворительной облачностью и наличием широких первичных механических и солевых ореолов. В этих условиях достаточно хорошо выявляются месторождения урановых руд различного генетического типа и некоторых других полезных ископаемых (тории, редких земель, полиметаллов, фосфоритов). Результативность аэропоисков во многом зависит от накопленных для данного региона геологических критериев, которые используются при интерпретации выявленных  $\gamma$ -аномалий.

В районах с плохой облачностью, развитой корой выветривания и обильными атмосферными осадками, способствующими выщелачиванию и интенсивному рассеянию урана, с заболоченностью, густой лесистостью и сложнорасчлененным горным рельефом аэропоисковые работы менее эффективны. Особенно это проявляется в районах с плохой геологической изученностью и приводит к выделению для наземной проверки многочисленных так называемых породных аномалий, трудноотличимых по форме записи от рудных аномалий. Проверка большого числа нерудных аномалий отвлекает много сил, времени, средств, снижает производительность и приводит к удорожанию аэропоисковых работ.

Эффективность поисков урановых руд аэрометодом, помимо геологических предпосылок, зависит от выбора оптимальных условий для индикации  $\gamma$ -аномалий в полете, которые определяются параметрами самолетной радиометрической аппаратуры, методикой учета мешающих факторов, способами количественной интерпретации рудных аномалий и т. п. (Блох, 1957; Блох, 1962; Германов и др., 1960).

Остановимся на вопросе о влиянии на аэrorадиометрические измерения радиоактивного фона вмещающих пород, осложняющего интерпретацию результатов съемок. Вмещающие породы могут рассматриваться как бесконечный по пространству и на глубину слой с равномерно распределенным в нем содержанием радиоактивных элементов. Для горных пород со средней плотностью  $\rho \sim 2,0 \text{ г/см}^3$  почти 97% всего  $\gamma$ -излучения создается слоем мощностью 30 см (см. рис. 65).

С увеличением высоты расположения измерительного прибора над бесконечно простирающимся слоем горных пород интенсивность  $\gamma$ -поля  $I_h$  убывает по закону

$$I_h = I_0 \Phi(\mu h), \quad (17)$$

где  $I_0$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения на поверхности горных пород;  
 $\mu$  — эффективный коэффициент поглощения  $\gamma$ -излучения в воздухе (на уровне моря  $\mu = 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ );  
 $\Phi(\mu h)$  — табличная функция Кинга.

Кривая убывания интенсивности  $\gamma$ -поля с высотой является одной из основных закономерностей, которая учитывается при пере-

счете значений интенсивности  $\gamma$ -поля вмещающих пород к уровню земной поверхности. Эта закономерность, выражаемая формулой (17), хорошо подтверждается экспериментальными измерениями затухания  $\gamma$ -поля над участками с равномерно распределенной радиоактивностью. На рис. 20 приведены расчетные и экспериментальные кривые высотной зависимости, так называемые «высотные кривые», полученные при полетах с приборами АРС-1 и АСГМ-25.

Зарегистрированное на высоте полета значение интенсивности  $\gamma$ -поля следует рассматривать как образованное двумя составляющими:  $I_h$ , соответствующей интенсивности  $\gamma$ -излучения земной

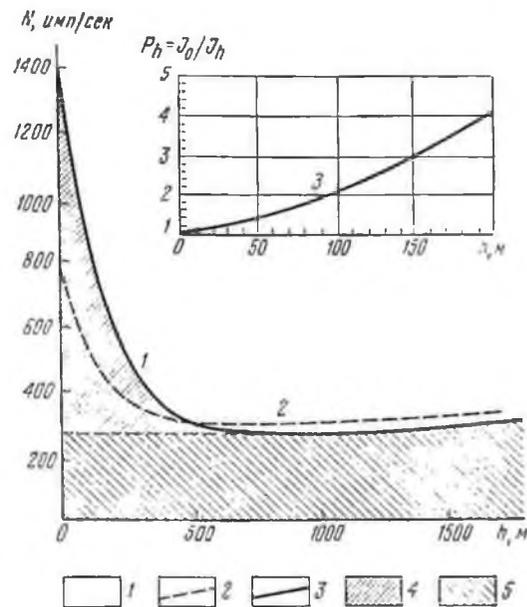


Рис. 20. Экспериментальные высотные кривые и график коэффициентов приведения  $P_h$  для бесконечной излучающей плоскости  
 1 — высотная кривая, полученная при измерениях с прибором АРС-1; 2 — высотная кривая, полученная при измерениях с прибором АСГМ-25; 3 — расчетный график коэффициентов приведения  $P_h$ ; 4 —  $\gamma$ -излучение земли; 5 — остаточный фон прибора

поверхности на данной высоте полета, и  $I_{ост}$ , обусловленной радиоактивной загрязненностью самолета, радиометра и действием космического излучения, образующих в сумме остаточный радиоактивный фон прибора.

В реальных условиях полета, даже в случае не очень сложного рельефа, неизбежно появление ложных, так называемых «рельефных»  $\gamma$ -аномалий, связанных с изменениями истинной высоты полета относительно поверхности земли. Поэтому одним из обязательных условий аэrorадиометрических измерений является одновременная непрерывная запись истинной высоты полета для учета ее изменений по маршруту. Для введения поправок за высоту полета из зарегистрированной величины поля  $I_T$  вычитается остаточный фон прибора  $I_{ост}$ ,

а ртшци умножается на коэффициент приведения  $P_h = \frac{1}{\Phi(h)}$ ,  
т. е.

$$I_0 = (I_\gamma - I_{\text{сст}}) P_h, \quad (18)$$

где  $P_h$  — коэффициент приведения, который может быть вычислен как отношение  $\frac{I_0}{I_h}$  по экспериментальной высотной кривой.

В современных самолетных  $\gamma$ -радиометрах введение поправок за высоту полета осуществляется автоматически специальными счетно-решающими схемами (АПВ), что значительно упрощает построение карт радиоактивности горных пород.

Метод пересчета значений интенсивности  $\gamma$ -поля к уровню земли по коэффициенту  $P_h$  справедлив для случая бесконечно простирающихся горных пород с постоянным содержанием в них радиоактивных элементов.

При высоте полетов до 75 м действующей площадью, создающей  $90^\circ$   $\gamma$ -излучения бесконечного слоя, является площадь радиусом  $R = 250$  м (табл. 5), и, следовательно, метод приведения по коэффициенту  $P_h$  может быть распространен и на конечные площади.

Таблица 5

*Действующий радиус площади излучения  
в зависимости от высоты полета*

$h, \text{ м}$	10	30	50	70	100	150
$R, \text{ м}$	60	120	170	215	280	360

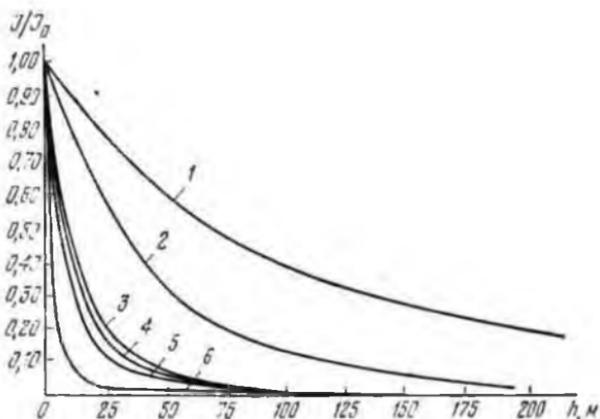
Необходимо отметить, что учет высоты полета не компенсирует искажений, вносимых изменением рельефа местности. При аэро-радиометрической съемке в районах с расчлененным рельефом ложные положительные аномалии будут регистрироваться над долиной, а отрицательные — над возвышенностью, если пользоваться коэффициентами пересчета  $P_h$ , вычисленными для плоскости. Поэтому для снижения влияния рельефа рассчитаны поправочные коэффициенты к  $P_h$ . При полетах с обтеканием рельефа разница в коэффициентах  $P_h$  существенно уменьшается.

Если для учета влияния  $\gamma$ -излучения вмещающих пород установлены относительно простые закономерности, то при учете зависимости изменения  $\gamma$ -поля с высотой над рудопроявлениями и месторождениями урана дело обстоит значительно сложнее. Как правило, геометрические размеры выходов урановых руд или ореолов в поверхностных рыхлых отложениях значительно меньше указанных в табл. 5, для которых еще справедливо уравнение (17).

На графиках рис. 21 приведены относительные изменения с высотой максимальных значений интенсивности  $\gamma$ -поля над центрами рудопроявлений различных размеров с равномерным содержанием радиоактивных элементов. Для сопоставления дано изменение с высотой интенсивности  $\gamma$ -поля над вмещающими породами (нормальное  $\gamma$ -поле). Из приведенных данных отчетливо видно быстрое убывание интенсивности  $\gamma$ -поля с высотой и над малыми по размерам выходами рудных тел и в стороне от них. Для малых по площади рудных выходов, когда линейные размеры их не превышают  $1/3$  высоты полета, можно считать, что  $\gamma$ -поле уменьшается обратно пропорционально квадрату высоты полета. Интенсивность аномалий (величина приращения аномального пика над радиоактивным фоном

Рис. 21. Графики относительного изменения интенсивности гамма-излучения в зависимости от высоты над центрами активных участков различной площади  $S$

1 — 1 км<sup>2</sup> (1000 × 1000 м) («бесконечная площадь»);  
 2 — 0,02 км<sup>2</sup> (100 × 200 м); 3 — 0,012 км<sup>2</sup> ( $H_0 = 19,5$  м); 4 — 0,0012 км<sup>2</sup> (20 × 60 м);  
 5 — 0,0012 км<sup>2</sup> (10 × 120 м); 6 — 0,0001 км<sup>2</sup> ( $l \approx 20$  м)



вмещающих пород) на данной высоте полета приблизительно пропорциональна произведению взаимной интенсивности  $\gamma$ -поля  $I_0$  рудного выхода на площадь  $S$  последнего

$$I_h = \frac{I_0 S e^{-\gamma h}}{2\gamma h^2} \quad (19)$$

Если учесть при этом, что поверхностная радиоактивность выходов рудопроявлений может быть неравномерна вследствие процессов выщелачивания и выноса радиоактивных элементов, то даже на небольшой высоте полета интенсивность  $\gamma$ -поля рудных аномалий будет очень мала. Для примера на рис. 22 представлено распределение интенсивности  $\gamma$ -поля над рудопроявлением урана.

Опыт подтверждается, что в большинстве случаев при поисках урановых руд с самолета приходится иметь дело с регистрацией малых по интенсивности и очень небольших по протяженности (100—300 м на высоте полета)  $\gamma$ -аномалий. Сложность выявления аэроаномалий усугубляется переменным радиоактивным фоном вмещающих пород, колебания которого при смене пород могут в несколько раз превышать уровень  $\gamma$ -поля самих рудных аномалий. Поэтому

для улучшения условий фиксации рудных аномалий необходимо проводить полеты на минимально возможных высотах и по сгущенной сети поисковых маршрутов. Однако снижение высоты полетов ограничивается требованиями их безопасности, а сгущение сети всегда выполнимо технически и не оправдывается экономическими соображениями.

Условия регистрации рудных выходов с различными радиусами интенсивности в зависимости от высоты полета и смещения маршрута от центра аномалии приведены в табл. 6. В ней даны значения,

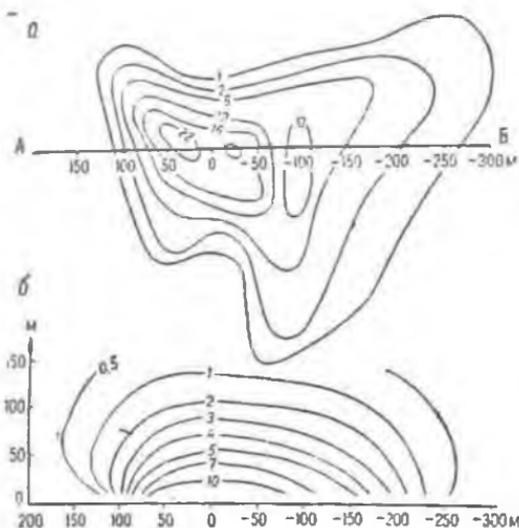


Рис. 22. Распределение интенсивности  $\gamma$ -поля (в  $\text{мкр/г}$ ) над урановым рудопроявлением

а — план аномального участка (в изолиниях интенсивности  $\gamma$ -поля); б — распределение  $\gamma$ -поля в вертикальной плоскости по линии АВ

относящиеся к центру рудной зоны, минимальной наземной радиоактивности, необходимой для создания на высоте полета  $\gamma$ -аномалии интенсивностью выше  $0,8 \text{ мкр/ч}$ , уверенно фиксируемой скитиляционным аэrorадиометром типа АРС-1 на фоне статистических флуктуаций прибора.

Таблица 6

Минимальная радиоактивность в центре рудных выходов (в  $\text{мкр/ч}$ ), определяющая возможность регистрации их в воздухе

Радиус выхода рудопроявлений $R$ , м	Высота полета 40 м			Высота полета 80 м		
	Смещение маршрутов, м					
	0	50	100	0	50	100
20	24	112	640	116	210	600
50	5	17	86	14	24	64
100	2	5	16	5	7	15

\* Радиус рудной зоны, в пределах которой содержание урана падает от центра к периферии по закону Гаусса до значений в 50 раз меньше, чем в центре.

Количественные методы интерпретации с целью оценки перспективности зарегистрированных в полете аномалий сводятся к решению обратной задачи — определению наземных размеров рудных выходов, максимальной интенсивности на поверхности и определению природы активности рудопроявления. Линейные размеры и интенсивность выхода рудного тела не могут быть определены однозначно без некоторых предварительных допущений, а именно: 1) самолет пролетает над центром и вкрест простирания рудопроявления; 2) рудный выход имеет форму бесконечно простирающейся (более 300 м) плиты с мощностью  $b$  или форму штокерка с радиусом сечения  $R$  и 3) распределение радиоактивных элементов в приповерхностном слое равномерное или закономерно изменяющееся, например, по кривой Гаусса.

На практике применяются несколько методов решения обратной задачи. Один из них основан на определении вертикального градиента аномального  $\gamma$ -поля по данным измерений на двух выбранных высотах. По теоретическим представлениям этот метод решения должен быть наиболее точным, но практически чрезвычайно трудно осуществить

полеты на двух высотах в одной вертикальной плоскости, проходящей через центр участка. Даже незначительные отклонения полетов от заданной плоскости приводят к большим ошибкам в пересчете поля аномалий к уровню земли и определениях размеров рудных выходов.

Другой метод основан на вычислении площади  $S$ , ограниченной на графике записью аномального поля и линией нормального  $\gamma$ -поля (рис. 23, заштрихованная площадь). Для случая полета на высоте вкрест бесконечно простирающегося рудного тела мощностью  $b$  можно найти произведение

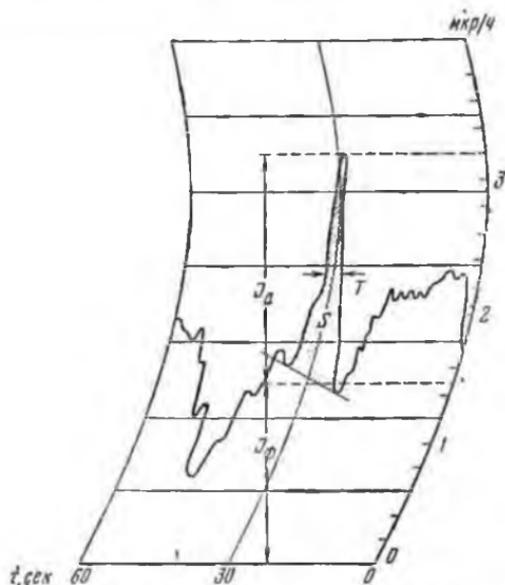


Рис. 23. Пример вычисления площади  $S$ , ограниченной аномальной кривой и линией нормального фона  $\gamma$ -поля

$I_a$  — интенсивность аномалии;  $T\phi$  — нормальный фон;  $T$  — ширина аномалии на половине высоты аномального пика

$$I_0 b = \frac{K S}{\Phi(\mu h)}, \quad (20)$$

которое эквивалентно линейному запасу радиоактивных элементов (Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии, т. 6, 1958).

В последние годы пашел широкое применение метод пересчета аномалий  $\gamma$ -поля, основанный на определении параметра  $T$  — ширины записи аномального пика на половине его максимальной высоты (Матвеев, 1962). Для рудных выходов с ограниченным простиранием и неравномерным распределением радиоактивности по поверхности (по кривой Гаусса) коэффициенты пересчета  $\frac{P_a}{P_h} = f(hT)$  и радиус рудопроявления  $R = \Phi(hT)$  представлены на рис. 24 и 25. Определив по записи аномалии параметр  $T$  (в секундах или метрах) и пользуясь приведенными на рисунках 24 и 25 графиками, находят максимальное значение интенсивности  $\gamma$ -поля на поверхности земли на выражении  $I_{\text{отмх}} = I_a P_a$  и радиус  $R$  сечения выхода рудного тела. В случае вытянутой формы выхода рудопроявления рассчитанная подобным путем наземная интенсивность окажется завышенной в 1,5—2 раза. Из опыта работ следует, что ошибки определения наземной интенсивности  $\gamma$ -поля и размеров рудопроявлений по методу  $T$  составляют в среднем 50—70% по отношению к наземным данным и только в отдельных случаях достигают 200—300%. Несмотря на некоторую ограниченность методов определения параметров рудопроявлений по записи аномалий в полете, результаты пересчета оказывают существенную помощь в правильной ориентации работ по наземной проверке  $\gamma$ -аномалий, направляя ее на поиски определенных по размерам и интенсивности зон с повышенной радиоактивностью.

Количественный пересчет  $\gamma$ -аномалий является первым этапом интерпретации, за которым следует определение природы радиоактивности выявленных аномалий, т. е. разделение их на урано-радиевые, ториевые или смешанные. Разделение аномалий по природе активности производится методом аэрогамма-спектрометрии и основано на различии энергетических спектров  $\gamma$ -излучения равновесного урана, тория и калия главным образом в жесткой части спектра в области энергий свыше 1,0 Мэв\* (Матвеев, Смирнов, Филимопов, 1962).

Для относительного разделения аномалий с воздуха на урановые или ториевые в сцинтилляционных  $\gamma$ -радиометрах помимо поискового канала общего счета (ОК), который регистрирует все  $\gamma$ -кванты с мягкими, средними и жесткими энергиями, имеется второй канал записи — канал разделения (РК), регистрирующий жесткие  $\gamma$ -кванты с энергиями свыше 2—2,5 Мэв (аэрорадиометр — анализатор АРС-1 или АСГ-38ж). Определение природы аномалий производится по спектральным коэффициентам  $f = \frac{\Delta N_{\text{ок}}}{\Delta N_{\text{рк}}}$ , где  $\Delta N_{\text{ок}}$  и  $\Delta N_{\text{рк}}$  представляют собой максимальные приращения амплитуд

\* См. гл. II, раздел 5.

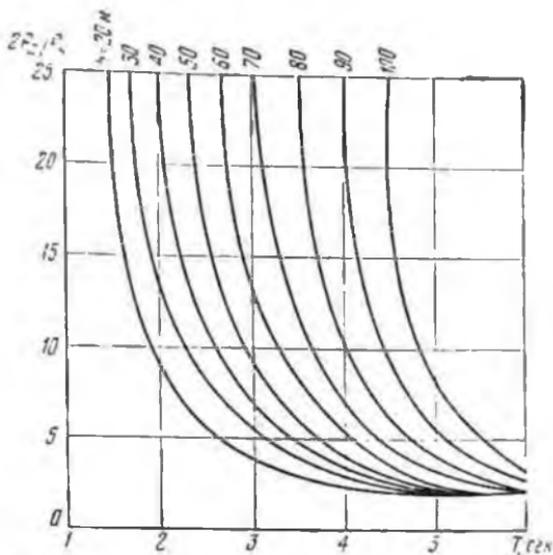


Рис. 24. Расчетные графики коэффициентов приведения локальных  $\gamma$ -полей в зависимости от параметра  $T$  для разных высот

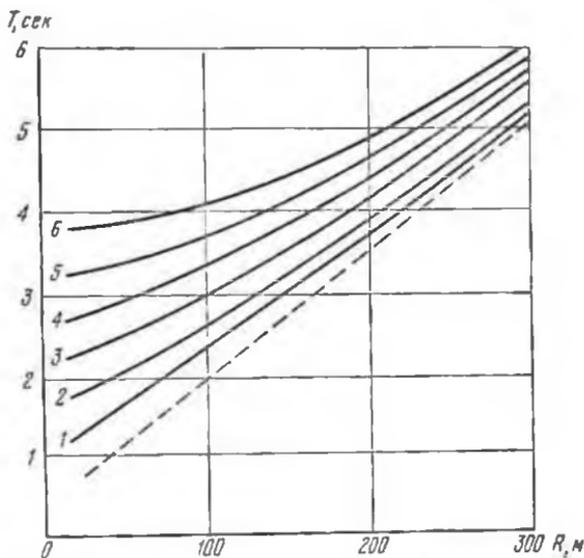


Рис. 25. Зависимость параметра  $T$  от радиуса  $R$  аномального участка для различных высот полета  $h$ .  
 1 —  $h = 20$  м; 2 —  $h = 40$  м; 3 —  $h = 60$  м; 4 —  $h = 80$  м;  
 5 —  $h = 100$  м; 6 —  $h = 120$  м.

$\gamma$ -аномалий над фоновыми вмещающими породами по общему и разделительному каналам. Вычисленные по  $\gamma$ -аномалиям спектральные коэффициенты  $f_a$  сравниваются с полученными над известными рудопроявлениями урана и тория. (Для урановых аномалий  $f_a = 80-150$ , для ториевых  $f_a = 30-40$ ). В практических условиях обычно пользуются сравнением спектральных коэффициентов аномалии со спектральными коэффициентами  $f_{\text{Т}}^U$  и  $f_{\text{Т}}^{\text{Th}}$  для двух рудных образцов, представляющих собой небольшие по объему запаянные коробки с урановой или ториевой рудой. С помощью таких рудных образцов производится настройка радиометра-анализатора и выбирается оптимальный порог дискриминации по каналу РК, при котором величина коэффициента разделения  $\eta = f_{\text{Т}}^U : f_{\text{Т}}^{\text{Th}}$  находится в пределах 2-3.

Условия рассеяния  $\gamma$ -квантов для рудных образцов и выходов рудопроявлений на дневную поверхность существенно различны, и поэтому спектры их  $\gamma$ -излучения в мягкой и средней частях неодинаковы. В связи с этим приходится вводить дополнительный эмпирический коэффициент связи между спектральным коэффициентом для  $\gamma$ -аномалии над рудопроявлением и спектральным коэффициентом рудных образцов  $f_a = k f_{\text{Т}}$ .

Чувствительность канала РК сцинтилляционной аппаратуры в десятки раз меньше, чем канала ОК для фиксации аномалий. Поэтому статистические флуктуации спектрального коэффициента  $f_a$  велики, и надежное разделение  $\gamma$ -аномалий на урановые ( $\text{Th} : \text{U} < 0,1$ ), смешанные ( $\text{Th} : \text{U} \approx 1$ ) и ториевые ( $\text{Th} : \text{U} > 10$ ), например, прибором АРС-1, возможно только для аэрогамма-аномалий интенсивностью выше 6-7  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  на высоте полета, для прибора АСГ-38ж — около 3  $\mu\text{кр}/\text{ч}$ . Расчет отношения  $\text{Th} : \text{U}$  в аномальной зоне может быть сделан по формуле

$$\frac{\text{Th}}{\text{U}} = \frac{1}{\alpha_{\text{Th}}} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \frac{f_{\text{Т}} - f_a}{f_a - f_{\text{Т}}}, \quad (21)$$

где  $\alpha_{\text{Th}}$  — ториевый эквивалент по  $\gamma$ -излучению\*.

Методы аэрогамма-спектрометрии позволяют определять и абсолютные содержания урана (по радию), тория и калия как в аномальных зонах, так и в горных породах по маршруту полета (Балясный и др., 1961; Труды второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии, т. 8, 1959; Аэрогамма-спектрометрический метод поисков месторождений урановых руд, 1967). Для отдельного количественного определения урана (по радию), тория и калия измерения ведутся в тех характерных областях спектра, в которых наиболее четко проявляются линии  $\gamma$ -излучения каждого из трех названных элементов. Аэрогамма-спектрометр АСГ-48 имеет три дифференциальных канала (ДК) для измерения скорости счета  $\gamma$ -квантов в следующих интервалах энергии: ДК-1 —

\* См. гл. II, раздел 5.

1,3—1,7 Мэв (преимущественно калиевый), ДК-II—1,8—2,4 Мэв (урановый), ДК-III—2,5—4 Мэв (ториевый). Общий поисковый канал (ОК) для индикации аномалий также регистрирует ограниченный спектр излучения свыше 250 кэв, чем частично исключается рассеянное  $\gamma$ -излучение.

Интерпретация результатов аэрогамма-спектрометрических измерений проводится на основе решения трех уравнений с тремя неизвестными (содержания U, Th и K), исходными данными для которых служат скорости счета  $\gamma$ -квантов  $N_1, N_2, N_3$  в каждом дифференциальном канале:

$$\left. \begin{aligned} q_U &= P_h (A_U N_1 + B_U N_2 + C_U N_3); \\ q_{Th} &= P_h (A_{Th} N_1 + B_{Th} N_2 + C_{Th} N_3); \\ q_K &= P_h (A_K N_1 + B_K N_2 + C_K N_3). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Решение обычно упрощается путем применения вспомогательных номограмм. Коэффициенты  $A_U, B_U, C_U, A_{Th}, B_{Th}, C_{Th}, A_K, B_K, C_K$ , входящие в эти уравнения, зависят от свойств сцинтилляционного счетчика в самолетном  $\gamma$ -спектрометре и определяются экспериментально при полетах над участками с известным содержанием радиоактивных элементов или с помощью трех рудных моделей (урановой, ториевой и калиевой) большого объема с известной концентрацией каждого элемента. Точность определения содержания радиоактивных элементов в горных породах по данным аэрогамма-спектрометрических измерений зависит от суммы систематических и случайных ошибок.

Первый вид ошибок возникает вследствие недостаточной стабильности параметров аэрогамма-спектрометров, что приводит к изменению коэффициентов в уравнениях (22). Статистические ошибки определяются чувствительностью детектора  $\gamma$ -излучения в выбранных энергетических интервалах.

Для аэрогамма-спектрометров АСГ-48 погрешности в определении U, Th и K для широких зон (0,5—1 км) составляют соответственно:  $\delta_U \approx 1,5 \cdot 10^{-4}\%$ ;  $\delta_{Th} \approx 2 \cdot 10^{-4}\%$  и  $\delta_K \approx 0,2\%$ . Следовательно, для пород с низкой радиоактивностью, таких как известняки и другие (4—6 мкр/ч), кларковые содержания радиоактивных элементов определяются с относительной ошибкой в 30—50%. Для более активных пород (15—25 мкр/ч) относительная ошибка снижается примерно в 1,5—2 раза.

Ошибки в определении содержания U или Th в рудных зонах обуславливаются главным образом ошибками пересчета поля локальных аномалий.

## 2. АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА

Из рассмотренных выше условий, необходимых для выявления и оценки при поисках рудных аномалий методом аэрогеофизической съемки, вытекает, что аппаратура должна обладать высокой

чувствительностью, малой инерционностью и непрерывной записью интенсивности  $\gamma$ -поля. Статистические флуктуации записи  $\gamma$ -поля должны быть существенно меньше ожидаемых рудных аномалий (Davis and Reinhardt, 1957). В сцинтилляционном самолетном радиометре-анализаторе АРС-1 чувствительность датчика составляет  $100-180$  имп/сек на  $1$  мкр/ч, что обеспечивает уверенное выделение аномалий с амплитудами выше  $0,6-0,7$  мкр/ч. В кассете этого прибора находятся четыре кристалла NaJ (Tl), диаметром около  $80$  мм и высотой  $50-60$  мм, сопряженные с большим фотоумножителем. Электрические импульсы фотоумножителя, возбужденные при поглощении  $\gamma$ -квантов в сцинтиляторе, поступают в усилительную схему, где после соответствующего усиления и разделения по амплитудам подаются на два самостоятельных измерительных канала — ОК и РК.

Для записи  $\gamma$ -поля используется двухканальный перописующий регистратор с непрерывной и равномерной протяжкой ленты. Инерционные свойства прибора определяются постоянной времени  $\tau \approx 0,75$  сек. Эпизодическая градуировка ленты записи в единицах скорости счета (импульсах в секунду) производится с помощью калибратора в схеме прибора, генерирующего импульсы определенной частоты. Стабильность работы сцинтилляционных радиометров-анализаторов в большой степени зависит от постоянства напряжений, питающих электронную схему прибора, температуры и других факторов. Для повышения стабильности в радиометр АРС-1 введено специальное электрооптическое устройство, автоматически поддерживающее постоянство усиления в измерительной схеме.

Измерения  $\gamma$ -поля по основному каналу записи ОК сопровождаются записью истинной высоты полета над поверхностью земли, осуществляемой с помощью стандартных самолетных радиовысотомеров РВ-2. В модернизированных радиометрах (АРС-2) этим же радиовысотомером управляется счетно-решающая схема АПВ, автоматически вводящая поправки в измерения  $\gamma$ -поля за высоту полета в соответствии с уравнением (17). При необходимости оценка природы активности выявленных аномалий канал записи высоты полета переключается на запись жесткой компоненты спектра  $\gamma$ -излучения (РК).

На основе комплексования аэроадиометра АРС-1 или АРС-2 с аэромагнитометром АМФ-21 была создана аэрогеофизическая станция АСГ-46. Измерения аномалий магнитного поля станцией АСГ-46 производится на фоне нормального магнитного поля земли, составляющего около  $0,5 \text{ э}^*$ . В магнитометре станции использованы магнитонасыщенные феррозонды, представляющие собой тонкие узкие пластинки из пермаллоя (железоникелевый сплав) с обмот-

\* Эрстед — единица напряженности магнитного поля в системе СГСМ.  $0,00001$  эрстеда называется гаммой ( $\gamma$ ).

кампи возбуждения. Обмотки питаются переменным током заданной частоты. В случае отсутствия внешнего магнитного поля электрические сигналы будут равны нулю, а при наличии его появляются сигналы ЭДС двойной частоты с амплитудой, пропорциональной силе действующего внешнего магнитного поля. Пороговая чувствительность аэромагнитометра АФМ-21 составляет  $5 \cdot 10^{-6}$  э, диапазон измерения  $\pm 2,5 \cdot 10^{-2}$  э.

Новая комплексная станция АСГ-48, помимо каналов для измерения суммарного  $\gamma$ - и магнитного поля, имеет три канала для записи счета квантов  $\gamma$ -излучения в выбранных участках спектра (дифференциальные каналы), о которых говорилось выше, канал записи высоты полета и канал автоматической записи трассы полета для привязки аэрогеофизических измерений. В  $\gamma$ -спектрометре станции используется сцинтилляционный счетчик в виде большого блока сцинтиллирующей пластмассы (полистирол со специальными добавками) объемом 20 л. Высокая стабильность измерительной схемы достигается применением схемы автоматического регулирования усиления с помощью радиоактивного изотопа с большой энергией излучения для создания опорного сигнала. В  $\gamma$ -спектрометре станции АСГ-48 введены, кроме того, схема АПВ для поправки измерений  $\gamma$ -поля за высоту полета по всем каналам  $\gamma$ -спектрометра и счетно-решающая схема, с помощью которой по уравнениям (22) автоматически вычисляется содержание радиоактивных элементов по трассе полета. В этом случае вместо записи скорости счета  $\gamma$ -квантов дифференциальными каналами ДК-I, ДК-II и ДК-III на ленте регистратора записываются раздельно содержания в горных породах урана (радия), тория и калия непосредственно в процентах.

В канале записи трассы самолета используется навигационный индикатор НИ-50. Счетно-решающая схема вычисляет текущие координаты самолета по его путевой скорости и азимуту угла полета и записывает трассу пути в прямоугольных координатах по отношению к заданной точке полета\*.

Для аэрооисковых работ по летно-тактическим данным, грузоподъемности и надежности самолет типа АН-2 больше всего подходит для аэрогеофизической съемки с комплексными станциями. Из вертолетов в практике аэрооисковых работ широко используются два типа — МИ-4 и МИ-1. Вертолет МИ-4, имеющий большую грузоподъемность, используется для транспортных перевозок отрядов наземной проверки аэроаномалий, бурового и горнопроходческого оборудования в местах с плохой проходимостью для автотранспорта. Вертолет МИ-1 используется главным образом для радиометрической съемки более крупного масштаба в сильно расчлененных горных

\* При автоматическом вычислении путевой скорости самолета влияние ветра учитывается как постоянно действующий фактор. Это приводит к появлению систематической ошибки в записи трассы самолета, требующей введения дополнительных поправок.

районах. Кроме того, с помощью вертолетов Ми-1, оборудованных радиометрами АРС-1, производится предварительная проверка  $\gamma$ -аномалий с посадками в непосредственной близости от участка выявленной аномалии. Сравнительно небольшой радиус действия и более высокая стоимость эксплуатации ограничивают широкое применение вертолетов.

При установке аэрогеофизической аппаратуры в самолете и вертолете чувствительные датчики размещаются в местах с минимальным уровнем помех со стороны агрегатов самолета. В целях уменьшения радиоактивного фона радиоактивная краска со шкал пилотажно-навигационных приборов удаляется. В тех случаях, когда это не сделано, величина фона внутри самолета обычно повышается на 2—3 мкр ч. Магниточувствительный блок ступиц для снижения уровня магнитных помех выносится на хвостовое оперение самолета, где поле помех составляет всего  $10-20 \cdot 10^{-6}$  э.

Размещение аппаратуры определяется также условиями правильной загрузки самолета и вертолета с учетом веса экипажа, аппаратуры и удобств для работы бортоператора. Кроме аэрогеофизической аппаратуры, в самолете устанавливается аэрофотокамера с целью эпизодической съемки ориентиров для привязки положения самолета к местности в полете. Обязательным является наличие переговорного устройства, с помощью которого осуществляется связь между оператором и экипажем.

### 3. МЕТОДИКА АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Комплекс работ включает собственно аэрогеофизическую съемку, геолого-геофизическую интерпретацию результатов съемки и наземную проверку выделенных аномалий. В соответствии с этим в состав аэропоисковых партий обычно входят летные отряды, интерпретационные группы и отряды наземной проверки аномалий. Количественный состав каждого из названных подразделений устанавливается в зависимости от проектируемого объема работ и поставленных геологических задач. Норма аэрогаммасъемочных работ для территорий с сложным рельефом составляет для одной аэропоисковой партии от 10 до 30 тыс. км<sup>2</sup> на один сезон работ. Облет ее производится двумя — пятью самолетами. На каждые 10 тыс. км<sup>2</sup> площади при съемке в масштабе 1 : 25 000 и использовании самолета АН-2 затрачивается 400—500 ч летного времени. Перед началом плановой поисковой работы проводится рекогносцировочная аэрогеофизическая съемка по маршрутам через 10—15 км для ознакомления летного и руководящего состава аэропартии с физико-геоморфологическими условиями, общим характером распределения интенсивностей  $\gamma$ - и магнитного полей, радиоактивных элементов в горных породах и с другими особенностями геолого-геофизической обстановки, определяющими конкретное планирование и проведение работ

в данном районе. Нередко такую рекогносцировку производят в предшествующий аэропоискам год.

По геологическим и топографическим картам с учетом результатов рекогносцировки намечается рабочая сеть полетов. Направления маршрутов выбираются вквост простирания основных геологических структур с обеспечением минимальной высоты полета, если это позволяет рельеф местности. Минимальной высотой полетов, предусмотренной «Наставлением о полетах» ГВФ, для равнинной местности считается 25 м, для всхолмленной 50 м, для горных районов 75 м и выше, в зависимости от характера расчлененности рельефа и абсолютной высоты полетов. Длина съемочных маршрутов обычно выбирается равной 25—30 км. Для повышения точности привязки аэрогеофизических измерений намечаются промежуточные ориентиры по маршруту с интервалами в 7—10 км.

Облет всей исследуемой территории производится на основе использования топокарт масштабов 1 : 50 000 и 1 : 100 000 или фотосхем с нанесенной штурманом сетью поисковых маршрутов. Аэропоисковые полеты, как правило, производятся в утренние или вечерние часы, наиболее спокойные по метеоусловиям, в периоды года, когда отсутствует снежный покров, экранирующий  $\gamma$ -излучение земной поверхности.

Вся площадь аэрогеофизической съемки разбивается на участки различных размеров. Если местность имеет резко выраженные формы рельефа (хребты, ущелья), сеть маршрутов приходится ориентировать вдоль рельефа, допуская в этом случае криволинейные маршруты, обтекающие формы рельефа с тем, чтобы обеспечить проведение полетов на малой высоте. Горные участки с расчлененным рельефом изучаются с помощью вертолета Ми-1.

Полеты начинаются с проверки и настройки аэрогеофизической аппаратуры. Вначале измеряется остаточный радиоактивный фон радиометров над каким-нибудь водоемом с широкой поверхностью или на большой (свыше 600 м) высоте, затем с помощью рудных образцов определяются чувствительность и параметры настройки приборов. Проверка в полете осуществляется бортоператором с помощью калибратора шкал и рудных образцов (уранового и ториевого), которые поочередно прикладываются к кассете радиометра в строго фиксированных местах. Чувствительность радиометра определяется по отклонениям записи в каналах общего счета (ОК) и дифференциальных (ДК-I, ДК-II и ДК-III). Одновременно со снятием остаточного радиоактивного фона на высоте полета свыше 600 м производится настройка магнитного канала комплексной станции и проверка работы курсографа.

В процессе проведения аэрогамма-съемки по заранее намеченным на топокарте маршрутам бортоператор и штурман отмечают пройденные ориентиры на ленте регистратора и в бортжурнале штурмана. Для повышения точности привязки с учетом систематических погрешностей курсографа в ряде случаев используется фотографирование ориентиров местности. Бортоператор ведет наблюдение за

пзметениями  $\gamma$ -поля, сменной горных пород, степенью их обнаженности и т. п., сообразуясь с имеющейся геологической картой. При появлении  $\gamma$ -аномалии оператор детализирует ее серией параллельных маршрутов по обе стороны от нее. В процессе детализации уточняются размеры и максимальная интенсивность аномалий, природа активности (по  $\gamma$ -спектрометрическим каналам), геологическая обстановка и составляются кроки местности. В зоне максимальной интенсивности сбрасывается вымпел для точной привязки аномалии, а центральную точку аномалии штурман наносит на топографическую карту. Детализация длится около 15—20 мин и после ее окончания продолжается полет по основному маршруту поисковой сети.

В конце дневного полета перед посадкой, а если необходимо, то и дополнительно в середине съемочного цикла, повторяются контрольные измерения для проверки работы и настройки аппаратуры, аналогичные проводившимся перед началом полета.

Для расшифровки лент записи аэрогеофизическая аппаратура регулярно эталонируется и градуируется. Эталонировка самолетной радиометрической (в том числе и  $\gamma$ -спектрометрической аппаратуры) производится обычным путем (см. гл. V), с помощью стандартных радионных эталонов. Градуировка каналов записи содержаний урана (по радию), тория и калия производится ежедневно с помощью больших рудных моделей, о которых говорилось выше, или эпизодически путем полетов над эталонными участками с известным содержанием радиоактивных элементов. Магнитный канал станции градуируется с помощью колец Гельмгольца.

Обработка лент записи производится сразу же после полета. Прежде всего маршруты на лентах записи разбиваются на километры в соответствии с отметками ориентиров и данными о длине маршрута по картам и боржурналу штурмана. Затем, если радиометрический канал не имеет схемы АПВ, производится пересчет нормального и аномального  $\gamma$ -полей к уровню земли. Для монотонно изменяющейся записи поля пересчет производят по коэффициентам приведения, используя запись высоты полета для определения коэффициента  $P_h$  по графику рис. 20. Значения интенсивности поля определяются по лентам записи с помощью специальной палетки. За нулевую линию принимается запись остаточного фона прибора. Для аномальных значений поля, имеющих на половине высоты аномального пика ширину  $T$  меньше 4—5 сек, пересчет к уровню земли производится по графикам рис. 24, по которым в зависимости от высоты полета  $h$  и величины  $T$  определяется коэффициент пересчета  $P_a$ .

Пересчитанные и исправленные значения  $\gamma$ -поля переносятся на топопланшет с нанесенными линиями маршрутов. Если привязка производится с помощью курсографа, то трасса маршрутов переносится с лент записи с помощью стола-дешифратора ДШ-1. Стол-дешифратор позволяет преобразовать криволинейную форму записи аэрогеофизических измерений в прямоугольную с необходимой трансформацией масштабов для построения карт. По нанесенным на маршруты значениям интенсивности  $\gamma$ -излучения строится карта  $\gamma$ -поля в изо-

линиях через 1—2 мкр/ч, в зависимости от степени его дифференциации и точности съемки. Для более уверенной корреляции слабых  $\gamma$ -аномалий на спокойном фоне результаты аэрогамма-съемки изображаются на графиках.

Анализ аномалий по природе активности проводят по методике, изложенной выше, в тех случаях, когда их интенсивность в воздухе превышает порог чувствительности канала разделения для данного радиометра-анализатора (для АРС-1 и АСГ-38ж соответственно 7 в 3 мкр/ч).

Карты распределения урана, тория и калия по результатам съемки аэрогеофизической станцией АСГ-48 строятся так же, как и радиометрические. При использовании счетно-решающих схем, дающих запись содержания радиоактивных элементов (в процентах), приведенных к уровню земли, карты содержания могут быть построены в графиках с помощью стола-дешифратора ДШ-1. Для построения карт в изоконцентрациях урана, тория или калия интервалы выбираются исходя из уровня двух-трехкратных квадратичных ошибок определения концентраций по повторным измерениям.

Обработка данных магнитного канала производится с помощью палеток, проградуированных в гаммах. Значения напряженности магнитного поля наносятся в виде графиков  $\Delta T$  в масштабе съемки, с учетом поправок за сползание нуля прибора, девиационных искажений и других погрешностей. Построенные графики  $\Delta T$  используются для построения карт  $\Delta T$  в изолиниях или графиках.

#### 4. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Обработке лент записи сопутствует предварительная геолого-геофизическая интерпретация радиометрических аномалий и связанного с ними магнитного поля. Помимо количественной интерпретации аномалий с определением природы их активности или содержания радиоактивных элементов, по геологической карте и наблюдениям бортоператора выясняется геоморфологическое положение аномалий и их приуроченность к геологическим комплексам. По аэромагнитным данным уточняется структурно-геологическая позиция участков аномалий. Этот анализ завершается составлением задания по методике и объемам предварительных проверочных наземных работ. В ряде случаев отсутствие достоверных геологических критериев затрудняет выделение аномалий, отвечающих урановым рудным телам или их ореолам рассеяния, на фоне многочисленных аномалий, обусловленных высокими концентрациями тория и калия. Такое положение на практике приводит к выделению в наземную проверку большого числа так называемых породных аномалий. О сложности процесса интерпретации материалов при аэропосках урановых руд можно судить по следующим статистическим данным. В особенно благоприятных геологических условиях при использовании

аэрогадметра без каналов, анализирующих природу активности, одно рудопроявление урана выделялось из 20—50 аномалий, а для открытия одного месторождения урана наземными работами проведено не менее 300—500 перспективных аномалий.

При последующей интерпретации аэрогеофизических записей и анализе составленных карт содержания урана, тория и калия с привлечением данных аэромагнитной съемки для выделения перспективных урановых зон обращается внимание на локальные аномальных записей  $\gamma$ -поля, приуроченность урановых аномалий или зон к экстремумам и перепадам магнитного поля и на некоторые другие признаки, установленные для данного региона. Важное значение имеет стратиграфический, литологический и магматический контроль аномалий, наличие связи аномалий с малыми интрузиями, вулканическими аппаратами, дайковым комплексом, эффузивами кислого состава, фациями осадочных пород, обогащенных битумом, фосфором или представленными конгломератами и т. п. При поисках гидротермальных месторождений для оценки аномалий существенное значение имеет установление пространственной приуроченности их к региональным и локальным структурам, сложным зонам разломов и смятия, опережающим нарушениям и другим рудоконтролирующим структурным элементам, нашедшим отражение на геологической и аэромагнитной картах или аэрофотоснимках. При анализе аномалий учитывается характер рудопосности площади, устанавливаемой по материалам предшествующих работ, наличие в пределах ее урановых, ториевых, редкоземельных, молибденовых, полиметаллических и других рудопроявлений и месторождений (Gregory, 1960).

Рассмотрим значение отдельных параметров аномалий, используемых при интерпретации.

Определение содержания урана, тория и калия. Производственным опытом аэрогеофизической съемки установлено, что даже качественное определение природы радиоактивности радиометром-анализатором (АРС-1, АСГ-38ж) имеет большое значение для выделения перспективных аномалий с целью первоочередной проверки, хотя применение этого метода было ограничено недостаточной чувствительностью аппаратуры. Перспективными аномалиями в этом случае считаются такие, для которых содержание урана в 2—3 раза выше, чем во вмещающих породах.

Метод аэрогамма-спектрометрии особенно эффективен при интерпретации многочисленных, часто идентичных по форме и интенсивности рудных и породных аномалий в сложно дифференцированных  $\gamma$ -полях. В тесном сочетании с геолого-геохимическими критериями этот метод позволяет достоверно выделять урановые аномалии.

При интерпретации аэрогамма-спектрометрических данных следует учитывать высокую миграционную способность урана и относительную инертность тория в зоне гипергенеза, что заставляет весьма осторожно относиться к группе существенно ториевых аномалий. В этих случаях оценка аномалий по параметру торий-урано-

вого отношения может привести и к пропуску практически интересных урано-ториевых месторождений.

На рис. 26 приведены обобщенные данные по содержанию урана и тория в изверженных горных породах, рудных телах, первичных и солевых ореолах, из которых видно, что торий-урановое отношение не может однозначно характеризовать перспективность выявленных аномалий и что анализ абсолютного содержания урана в аномальной зоне и вмещающих породах является более надежным.

По распределению содержания калия могут выделяться структуры, контролируемые урановое оруденение. Например, в щелочных и кислых породах низкими содержаниями калия 1—2% на фоне 4—5%-ного содержания отчетливо фиксируются зоны альбитизации, окварцевания и карбонатизации. В породах среднего и основного состава повышенными содержаниями калия (до 5—7%) выделяются зоны ортоклазизации, биотитизации, частично серицитизации и т. д.

**Локальность аномалии.** Статистическая обработка данных о размерах естественных выходов урановых рудных тел на дневную поверхность, а также о размерах сопутствующих им первичных и механических ореолов рассеяния урана показывает, что средняя протяженность создаваемых ими аномальных радиометрических полей составляет 140—150 м, увеличиваясь до 200—230 м для осадочных урановых месторождений. Поэтому локальность аномалии является одним из признаков, определяющих ее перспективность. По данным интерпретации лент записи  $\gamma$ -поля установлено, что параметр  $T$  для них обычно составляет 2—5 сек (100—250 м), если поисковый маршрут проходит через центр выхода рудного тела на дневную поверхность. Смещение маршрута на 50—100 м от центра выхода рудного тела аналогично увеличению высоты полета и приводит к быстрому затуханию аномалий. Это положение наглядно иллюстрируется рис. 27, на котором приведены примеры изменения формы записи аномалий в зависимости от высоты и местоположения маршрута над осадочным и гидротермальным рудопроявлениями. Наибольшую сложность представляет интерпретация аэрогеофизической информации в районах с расчлененным рельефом, где фактическая высота полетов варьирует в широких пределах (30—120 м) и в связи с этим форма записи над рудопроявлениями может резко изменяться, иногда настолько, что выделить рудные аномалии не представляется возможным. Для таких районов рекомендуется шире использовать воздушную детализацию мало интенсивных и локальных аномалий, а для особо перспективных площадей с пересеченным рельефом — сгущать поисковую сеть до масштаба 1 : 10 000 (маршруты через 100 м).

Многолетний опыт поисков методом аэрогеофизической съемки показывает, что около 90% аэрогамма-аномалий, выделенных только по признаку локальности, не связано с рудопроявлениями урана. Аномальные записи  $\gamma$ -поля локальной формы могут наблюдаться над пегматитами и обнажениями горных пород с повышенными кларками радиоактивных элементов, в частности тория. Таким образом,

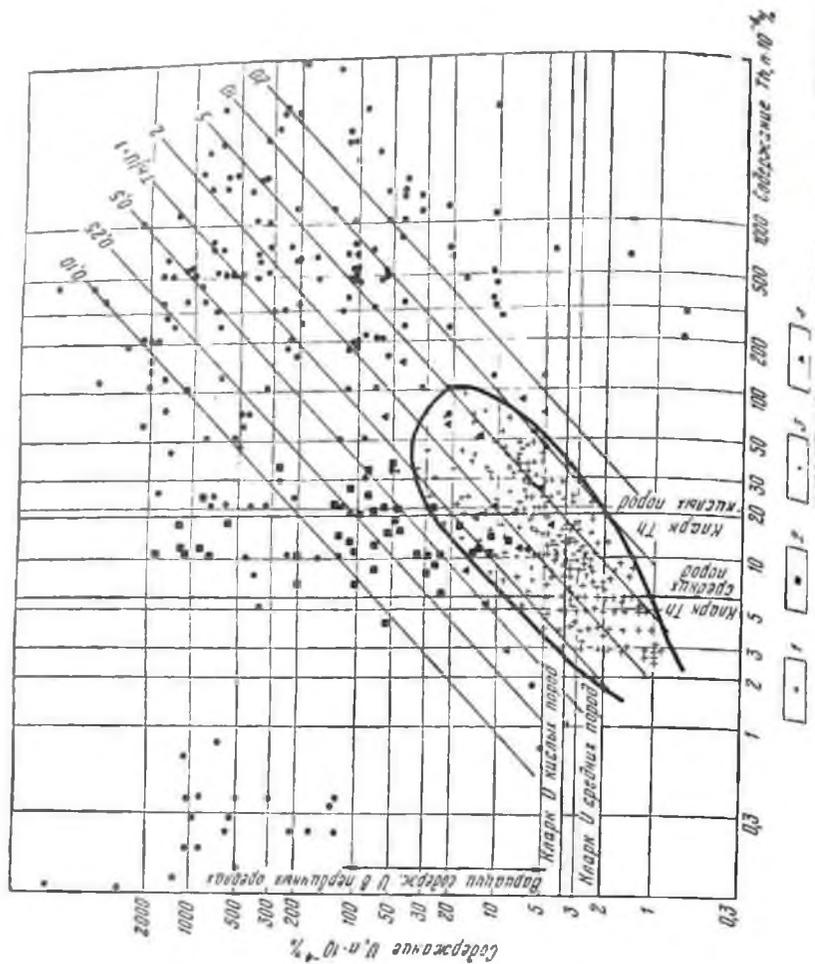


Рис. 26. Содержание урана и тория в рудных телах, горных породах, первичных и вторичных ореолах рассеяния  
 1 — содержание U и Th в рудных телах; 2 — содержание U и Th в солевых ореолах; 3 — содержание U и Th в первичных породах; 4 — содержание U в первичных ореолах

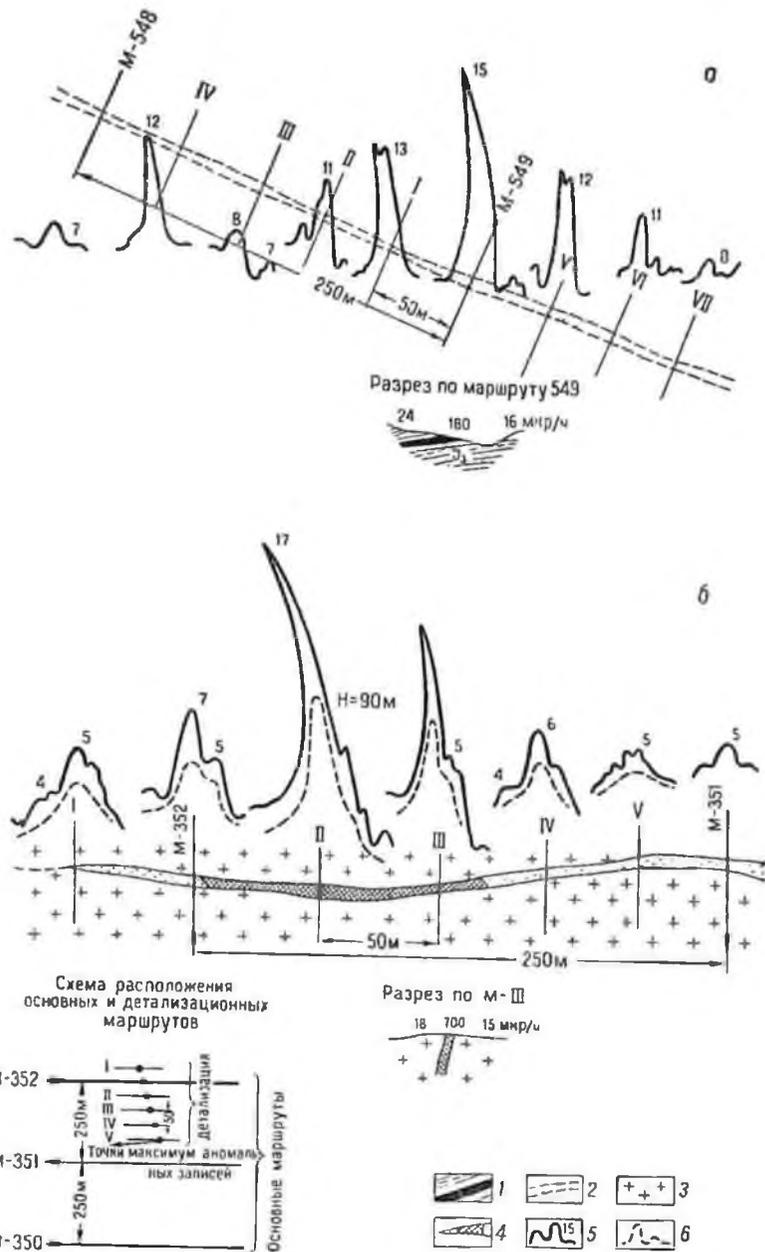


Рис. 27. Примеры записей пад осадочным (а) и гидротермальным (б) рудопроявлениями в зависимости от обилия рудных тел и высоты полета (H)  
 1 — песчаники и сланцы с урановым горизонтом; 2 — урановый горизонт (заптрихованы выходы на дневную поверхность); 3 — граниты; 4 — рудная зона (пигрихованная обнаженный участок). Формы записей (в мкр/ч) аномалий: 5 — при H = 35—40 м (5), 6 — при H = 90—100 м.

локальность приборной записи на ленте не является единственным и однозначным признаком урановых аномалий.

Интенсивность аэрогамма-аномалий. Для рудопроявлений с выходами значительных размеров и содержаниями урана в приповерхностном слое от 0,01% и выше, интенсивность аэрогамма-аномалий, вряду с локальностью, также определяет ее перспективность. Однако в тех случаях, когда рудопроявления представлены первичными ореолами с низкими содержаниями урана или перекрыты современными отложениями, или когда из приповерхностных частей рудных выходов уран существенно выщелочен,

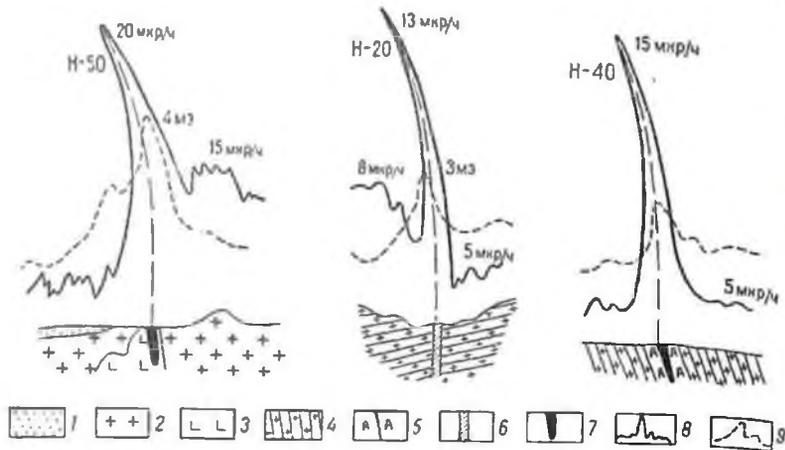


Рис. 28. Примеры записей комплексных аэрогамма-магнитных аномалий

1 — современные отложения; 2 — граниты; 3 — диориты; 4 — гнейсы; 5 — амфиболиты; 6 — дайки диабазовых порфиров с урановым оруденением; 7 — ураноносные зоны; 8 — запись гамма-поля; 9 — запись магнитного поля

значение интенсивности аномалии при интерпретации снижается. В связи с этим большое значение приобретает применение количественной интерпретации локальных аномалий, методика которой изложена в разделе 1 настоящей главы. При использовании методики приведения к уровню земли по параметру  $T$  (ширина на половине высоты аномального пика) аномалий, которые первоначально не привлекают к себе внимания, после пересчета поля могут быть выделены для наземной проверки благодаря высокой приведенной к земле интенсивности по сравнению с радиоактивностью вмещающих пород.

Аэромагнитные данные. Материалы аэромагнитной съемки используются для уточнения известных и выделения не отраженных на геологических картах рудоконтролирующих структур (Ильобакис и Лапина, 1960; Логачев, 1955).

Большой поисковый интерес представляет выделение по аэромагнитным полям малых интрузивных тел, не выходящих на дневную поверхность. Как известно, слепые интрузии являются наиболее

благоприятными рудоконтролирующими структурами для образования урановых месторождений и ряда других полезных ископаемых. Пространственная приуроченность локальных и нелокальных аэрогамма-аномалий урановой природы к геологическим структурам определяет степень перспективности этих аномалий и позволяет уточнить направление работ наземными методами.

Если рудопроявления урана генетически или парагенетически связаны с магнетитовым оруденением или с породами, которые выделяются по магнитным свойствам, например со штоками диоритов и жилами диабазовых порфиров, то таким рудопроявлениям при

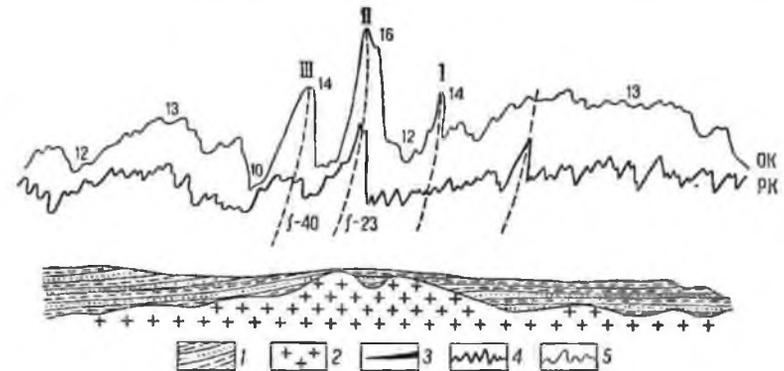


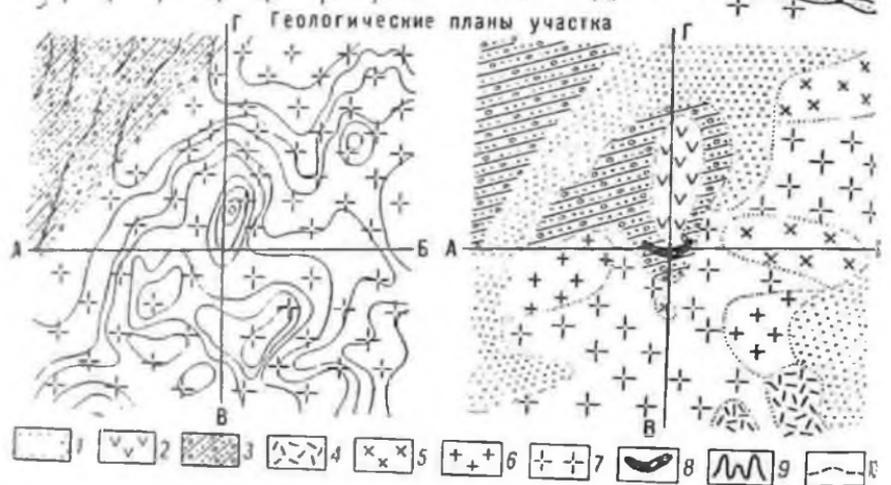
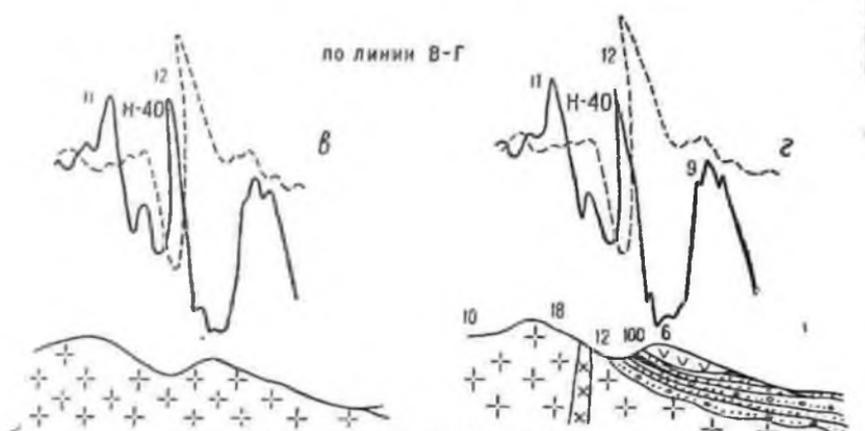
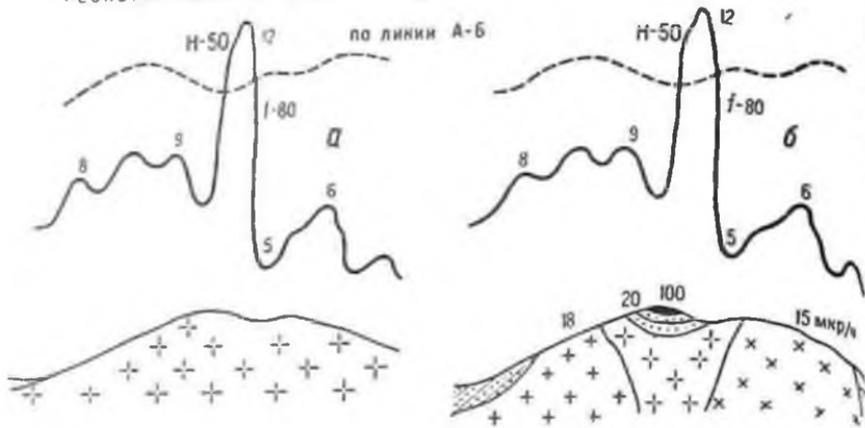
Рис. 29. Пример записей и интерпретации  $\gamma$ -поля на аэропоисковом маршруте по данным каналов общего счета и разделительного

1 — сланцы, песчаники; 2 — граниты; 3 — углистые ураноносные сланцы; 4 — запись разделительного канала РК; 5 — запись канала общего счета ОК (в мкр/ч).

аэрогеофизической съемке отвечают комплексные  $\gamma$ -магнитные аномалии (рис. 28). В этом случае аэромагнитные данные могут успешно использоваться для поисков урановых руд на площадях, закрытых современными отложениями, что увеличивает глубину аэропоискового метода.

Ниже приводятся примеры выделения перспективных аномалий на основе изложенных принципов. На рис. 29 даны записи  $\gamma$ -поля на аэропоисковом маршруте по каналу общего счета и разделительному каналу станции АСГ-38ж. По каналу общего счета зарегистрированы три аномалии, из которых по форме записи интерес могли представлять аномалии I и II и менее перспективной оказалась аномальная запись III. Тем не менее установленный по данным канала разделения высокий спектральный коэффициент ( $f_a = 80$ ) для аномалии III выдвигает ее как урановую в первоочередную проверку, а аномалия II, судя по низкому спектральному коэффициенту ( $f_a = 40$ ), является торфяной и отнесена к разряду бесперспективных для обнаружения урановых руд. Наземное изучение показало, что аномалия III обусловлена пластом углистых сланцев с повышенной

Геологические разрезы с аэрогеофизическими данными



концентрацией урана (0,02—0,03%), а аномалии I и II приурочены к выходам на поверхность гранитов, обладающих более высокой радиоактивностью по сравнению с окружающими осадочными породами.

На рис. 30 приводятся случаи регистрации осадочных рудопроявлений при полетах над ними в двух направлениях. В случае проложения маршрута по простиранию ураноносного пласта последний отмечается относительно широкой аномальной записью  $\gamma$ -поля. При пересечении выхода рудопроявления вкrest его простирания оно регистрируется локальной записью по  $\gamma$ -каналу и резким изменением магнитного поля. По этим данным аэрогамма-аномалия должна быть отнесена к группе перспективных и выделена в наземную проверку. Однако по аэровизуальным наблюдениям бортоператора аномалия приурочена к возвышенности с курумником и была бы отбракована как породная. Оценка перспективности данной аномалии принципиально изменилась после определения ее природы радиометром-анализатором. По высокому спектральному коэффициенту ( $f_a = 80$ ) аномалия однозначно была выделена как урановая под первоочередную наземную проверку, подтвердившую выводы интерпретации аэроспектрометрических данных.

На рис. 31 приведены формы аномалий, зарегистрированных по общему каналу и каналам записи содержания урана и тория. По каналу ОК на фоне неоднородного  $\gamma$ -поля выделяется группа аномалий. Пользуясь признаками локальности и интенсивности, а также учитывая сложность геологического строения участка, в наземную проверку выделены для первоочередного изучения аномалия I и с меньшей достоверностью из-за низкой интенсивности аномалии II и III.

Результаты оценки этих аномалий существенно изменились после привлечения к их интерпретации аэрогамма-спектрометрических количественных определений радиоактивных элементов. По урановой и ториевой составляющим уверенно устанавливается перспективность аномалии I, привлекает внимание для дополнительного изучения аномалия IV и определяется бесперспективность аномалий II и III, обусловленных кларковыми концентрациями радиоактивных элементов в горных породах. Наземной проверкой установлено: на участке аномалии I — урановое рудопроявление в песчаниках, на аномалии IV — горизонт фосфоритоносных известняков с низкими концентрациями урана, а на аномалиях II и III — обнажения кислых эффузивов.

Методические рекомендации по использованию аэромагнитной информации для выделения различного типа геологических структур

Рис. 30. Примеры интерпретации записей аномального гамма-поля по простиранию и вкrest простирания рудопроявления (слева — по ранее составленной геологической карте, справа — по карте, составленной при наземной проверке аномалий)

1 — современные отложения; 2 — базальты; 3 — туфогенная осадочная свита; 4 — фельзиты; 5 — слепит-порфиры; 6 — лейконитовые граниты; 7 — биотит-роговообманковые граниты; 8 — рудный пласт; 9 — запись  $\gamma$ -канала; 10 — запись магнитного канала

(разломы, контакты пород, малые интрузии и т. д.) достаточно подробно изложены в литературе (Колубакин и Лапина, 1960; Догачев, 1955). Рассмотрим один из примеров использования аэро-радио-метрических данных при геологической интерпретации аэро-радио-метрических карт. На рис. 32 представлена карта графиков  $\Delta T$ , геологическая и аэро-радио-метрическая карты. Как видно из рисунка,

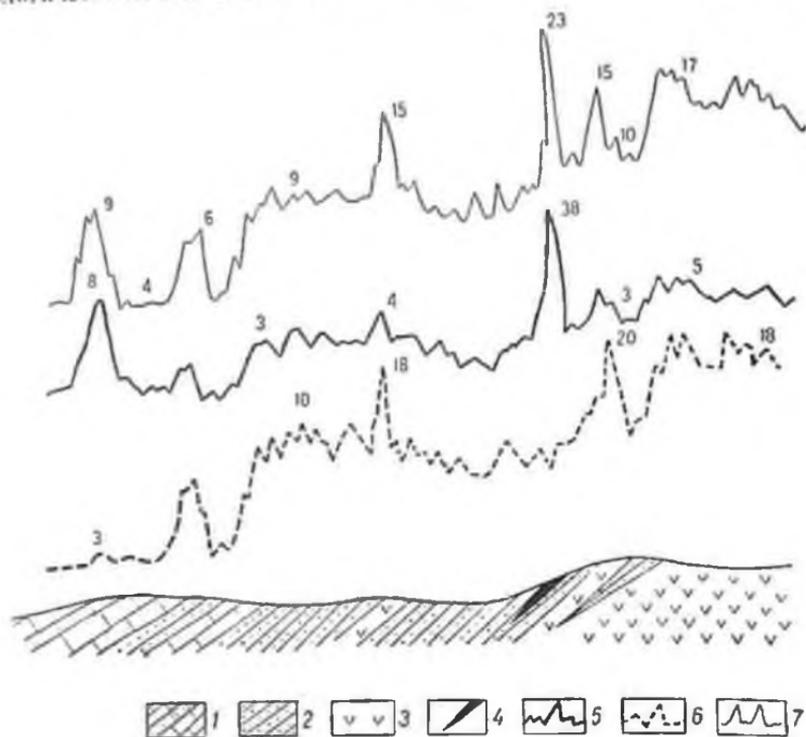


Рис. 31. Примеры регистрации рудных и «породных» аномалий при аэрогамма-спектрометрических съемках

1 — пластинки с фосфоритовым горизонтом; 2 — песчаники; 3 — кислые эффузивы; 4 — ураноносный пласт песчаников; 5 — запись содержания урана (в  $\mu \cdot 10^{-4}\%$ ); 6 — запись содержания тория (в  $\mu \cdot 10^{-4}\%$ ); 7 — запись радиоактивности канала ОК (в  $\mu\text{кр}/\text{ч}$ )

совместный анализ карт позволяет наметить перспективную зону и направить изучение наземными методами аэрогамма-аномалий, в том числе и нелокальных, выделение которых только по радио-метрическим лентам записи было бы невозможно.

Аэропоисками в одном из районов была выявлена группа аномалий среди повышенных  $\gamma$ -полей, приходящаяся по геологической карте масштаба 1 : 500 000 на площадь распространения гранитов. При наземной проверке оказалось, что наряду с аномалиями, приуроченными к гранитам, имеются аномалии, связанные с кислыми эффузивами, в которых была установлена урановая минерализация. В дальнейшем проведенные на этом участке аэропоиски в масштабе 1 : 10 000

с радиометрами-анализаторами позволили локализовать по распределению содержания радиоактивных элементов площади распространения кислых эффузивов с выделением по природе активности ряда перспективных аномалий. Наземные поиски на аномальных участках в эффузивах привели к открытию перспективных рудопроявлений урана.

Из этих примеров видно, что интерпретация  $\gamma$ -аномалий должна производиться не по каким-либо единичным признакам, а по совокупности их, с учетом в каждом отдельном случае геологической, геохимической и геоморфологической обстановки. Только при этих условиях возможна правильная оценка выявленных аномалий и передача наиболее перспективных из них по урану в наземную проверку.

## 5. НАЗЕМНАЯ ПРОВЕРКА АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Наземная проверка  $\gamma$ -аномалий является обязательной стадией поисков методом аэрогеофизической съемки. Климатические условия, высокая миграционная способность урана, экранирующее действие поверхностного покрова рыхлых отложений и другие геохимические в геологические причины чрезвычайно усложняют наземные исследования  $\gamma$ -аномалий. Наиболее экономичной формой организации наземных работ оказалось двухэтапное проведение наземной проверки в составе аэропартий с применением вертолетов в труднопроходимых районах.

При предварительной наземной проверке производится геолого-геофизическое изучение аномалий с целью отбраковки бесперспективных из них или составления заданий по дальнейшей оценке аномалий, отнесенных к числу перспективных. Как показывает опыт, на этом этапе отбраковывается большая часть аномалий, выявленных при аэропоисках. Отряды предварительной проверки проводят пешеходную или автомобильную  $\gamma$ -съемку на площади 1—3 км<sup>2</sup> с целью изучения аномальной зоны и определения центров аномалии в данной геологической обстановке. В небольших объемах производятся наземные магнитометрические работы, эманационные измерения и проходится канавы и мелкие шурфы; по зонам оруденения проводятся  $\gamma$ -спектрометрические измерения и отбор проб на спектральный и химический анализы. Геолого-геофизические наблюдения сопровождаются отбором проб для различных анализов. Признаками перспективности аномалий при их предварительной проверке являются повышение с глубиной содержания урана, наличие видимой урановой минерализации, интенсивные околорудные изменения, фиксируемые, в частности,  $\gamma$ -спектрометрическим методом по привосу или выносу калия, приуроченность к геологическим структурам и литологическим горизонтам и ряд других.

При детальной проверке перспективных аномалий уточняется характер уранового оруденения, его связь с вмещающими породами

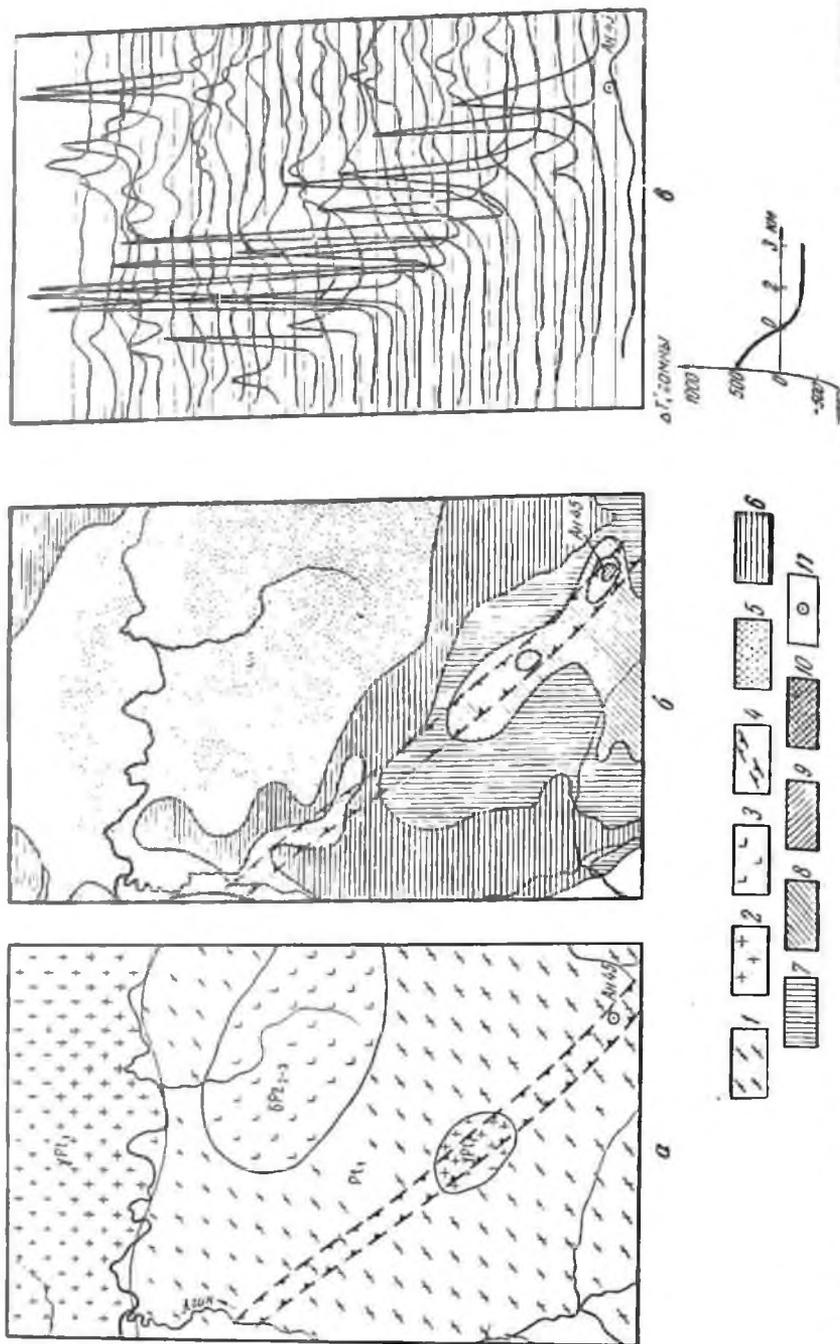


Рис. 32. Пример комплексной интерпретации аэрометрических и аэрогеометрических карт для выделения рудоуплотняющих структур

а — геологическая карта; б — аэрогеометрическая карта; в — карта графитов  $\Delta T$

1 — графитовые и слюдяные сланцы; 2 — граниты, гнейсы, гнейсовидные сланцы, сланцы, мicaschists; 3 — сланцы, мicaschists; 4 — известняки; 5 — известняки; 6 — от 2 до 4; 7 — от 4 до 6; 8 — от 6 до 8; 9 — от 8 до 10; 10 — больше 10; 11 — радиометрическая аномалия

и геологическими структурами, определяются размеры, морфология и элементы залегания рудных тел, содержание в них урана и элементов-спутников. Уточняется необходимый комплекс и объем геолого-геофизических и горно-буровых работ в районе аномалий.

Отряды детальной проверки расширяют площади исследования аномальных участков и благоприятных геологических структур, проводят общегеофизическое, радиометрическое и геологическое обследование площади, выделяемой с расчетом охвата всех рудоносных структур. Основное внимание при детальных наземных проверочных работах уделяется изучению выявленных аномалий на глубину с применением буровых работ. Участки аномалий вскрываются канавами и шурфами с целью прослеживания перспективных зон. Разведочные выработки документируются, из активных зон отбираются пробы для радиометрического, спектрального и других анализов, на основании которых делаются выводы о содержании урана и других полезных ископаемых. На рудопроявлениях урана, перспективность которых установлена детальными работами, задается серия скважин, пересекающих оруденение в зоне первичных руд, с целью обоснования постановки более детальных геологоразведочных работ.

По рудопроявлениям с кондиционными содержаниями урана и определенными масштабами оруденения даются рекомендации о направлении и объемах дальнейших геологоразведочных работ силами разведочных партий.

Как может изменяться точка зрения на перспективность уранового оруденения на этапе наземных проверочных работ, иллюстрирует рис. 33. При предварительной оценке аномалий рудопроявления урана инсоляционного типа рассматривались как неперспективные. После проходки глубоких шурфов в обоих случаях были вскрыты рудные тела.

Помимо наземных работ по проверке аэрогамма-аномалий, аэрокартиями проводятся также самостоятельные наземные геолого-геофизические поиски урановых месторождений в масштабе 1 : 10 000 или 1 : 25 000. Такие поиски проводятся на перспективных площадях, недоступных по условиям сложнорасчлененного горного рельефа для опоскования аэрометодом, главным образом в пределах развития рудоконтролирующих структур, выявляемых в процессе аэрогеофизической съемки по данным интерпретации комплексных (аэрогамма-спектрометрических и магнитных) наблюдений с учетом геологических материалов.

В последнее время число легкооткрываемых с воздуха рудопроявлений и месторождений урана с каждым годом сокращается, в связи с чем возникает необходимость

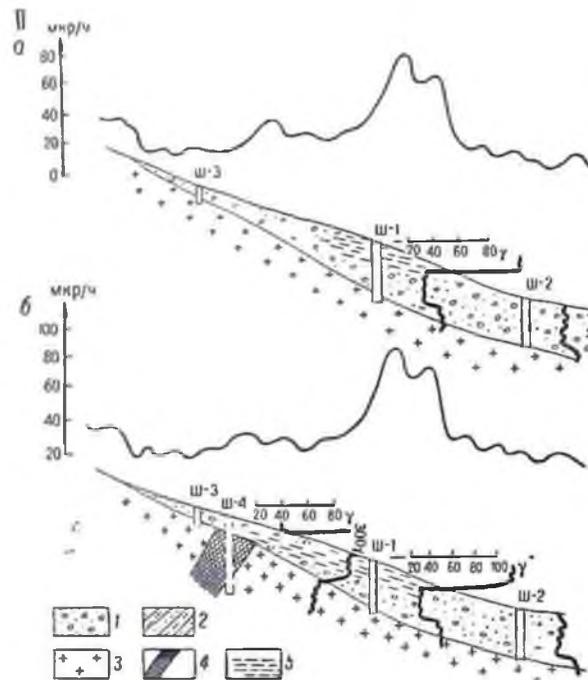
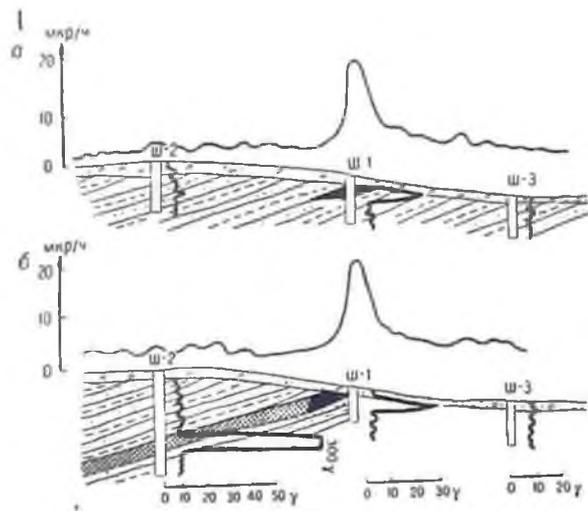


Рис. 33. Примеры оценки рудопроявлений при предварительной наземной проверке.

Участок I а — первичная интерпретация — аномалия связана с сорбцией урана лимонитизированным горизонтом осадочной слиты; б — после углубления шурфа 2 установлен пиритизированный ураниносный горизонт с кондиционным оруденением. Участок II. а — первичная интерпретация — аномалия обусловлена сорбцией урана глинистым прослоем рыхлых отложений вблизи активных гранитов; б — после проходки шурфа 4 установлено, что аномалия связана с ореолом рассеяния гидротермального рудного тела. 1 — современные отложения; 2 — сланцы, песчаники, глины; 3 — граниты; 4 — ураниносный горизонт с пиритом, лимонитизировавший в поверхностных частях; 5 — ураниносное тело гидротермального генезиса и его вторичный ореол рассеяния.

дальнейшего развития аэрогеофизических методов для поисков слабо проявленных на поверхности или слепых месторождений. Намечается несколько направлений в развитии аэрометодов. Широкое применение метода аэрогамма-спектрометрии, его усовершенствование и накопление опыта геологической интерпретации раздельных количественных определений радиоактивных элементов позволит перейти к поискам урановых руд не только по их выходам на дневную поверхность, но и по ореолам рассеяния с низкими концентрациями урана.

Карты распределения урана (радия), тория и калия в горных породах, слагающих район поисков, могут служить надежным обоснованием для металлогенических прогнозов и выделения перспективных участков и зон под глубинные поиски урана. Этому же будет способствовать расширение комплекса аэрогеофизических методов с включением в него аэроэлектроразведки, аэрогравирозведки и др. Методы математического анализа комплексных данных усилят объективность прогнозирования перспективных зон.

Повышение геологической эффективности и глубинности аэрогеофизических методов невозможно без расширения объемов и комплекса наземных исследований, в том числе увеличения объема буровых работ. Экономическая эффективность аэрогеофизических методов может быть существенно повышена, если одновременно использовать их не только для поисков урановых руд, но и других полезных ископаемых — редких металлов, агрономических руд, нефти, газа и др.

## АВТОГАММА-СЪЕМКА

Автогамма-съемка решает в общем те же задачи, что и пешеходная  $\gamma$ -съемка, но имеет перед последней ряд преимуществ (быстрота, более низкая стоимость, большая чувствительность аппаратуры). Однако возможность применения автогамма-съемки существенно ограничивается условиями проходимости местности для автотранспорта. Наиболее пригодной для проведения автогамма-съемки является равнинная или холмистая, слабо залесенная и не заболоченная местность с углами уклона рельефа до  $5-8^\circ$ . Местность с углами уклона рельефа более  $15^\circ$  для проведения площадной автогамма-съемки непригодна.

Опыт работ показывает, что автомобильная  $\gamma$ -съемка может уверенно фиксировать рудные тела и сопровождающие их урановые ореолы рассеяния, выходящие на дневную поверхность, размером от первых десятков квадратных метров и с интенсивностью  $\gamma$ -излучения в центре ореолов от первых единиц микрорентгенов в час.

В условиях аридной зоны, наиболее благоприятной для автомобильной  $\gamma$ -съемки, обычно доминирует механический и смешанный (механический и солевой) тип рассеяния урановых руд. Поэтому рыхлые отложения элювиально-делювиального типа мощностью до  $3-4$  м, вмещающие подобного рода ореолы, как правило, не препятствуют успешному применению автогамма-съемки.

Области развития эоловых, пролювиальных, флювиогляциальных и аллювиальных отложений в большинстве случаев неблагоприятны для проведения автогамма-съемки, так как чуждые наносы мощностью около  $0,5$  м практически полностью экранируют  $\gamma$ -излучение рудных тел. В ряде случаев эти области могут быть благоприятны для россыпных месторождений, устойчивых в зоне выветривания радиоактивных минералов и урановых месторождений инфильтрационного генезиса.

Для анализа физико-географических условий применения метода \* целесообразно использовать топографические карты масштаба  $1:100\,000-1:50\,000$ , а также стандартную аэрофотооснову масштаба  $1:30\,000$ , с помощью которых можно выделить площади,

\* Имеется в виду районирование по степени применимости площадной автомобильной съемки, так как применимость маршрутной автогамма-съемки по дорогам определяется в первую очередь наличием и качеством дорог в районе работ.

доступные по проходимости для съемочных автомашин. По этому признаку различают следующие три группы площадей.

1. Практически полностью доступные площади, на которых углы уклона рельефа не превышают  $8-10^\circ$ ; сеть оврагов, болота, лес и крупный кустарник развиты незначительно.

2. Площади, в большей своей части доступные, на которых углы уклона рельефа не превышают  $10-12^\circ$ ; овраги, кустарник, болота, каменные осыпи и другие осложняющие съемку условия встречаются сравнительно часто.

3. Площади недоступные.

По результатам анализа геологических материалов в пределах доступных площадей отмечаются участки распространения различных по типу и мощности рыхлых отложений, определяющих эффективность автогамма-съемки, а также наиболее выгодные направления поисковых маршрутов для каждого участка площади.

На основе выполненного таким образом анализа совокупности природных факторов может быть составлена карта применимости автомобильной  $\gamma$ -съемки (удобен масштаб карты  $1 : 500\ 000-1 : 200\ 000$ ), которая является основой для проектирования и планирования работ\*.

## 1. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ АВТОГАММА-СЪЕМКЕ

Физические основы автомобильной  $\gamma$ -съемки в значительной степени сходны с основами аэрогамма-съемки (см. гл. III), поскольку оба метода базируются на регистрации и непрерывной записи в движущейся интенсивности  $\gamma$ -излучения естественных радиоактивных объектов (Временное руководство по комплексным аэрогеофизическим поискам 1957, 1958; «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957).

Для проведения количественных расчетов интенсивности  $\gamma$ -излучения над объектами такого рода делают допущение о том, что интенсивность  $\gamma$ -излучения на дневной поверхности убывает от центра к периферии либо по линейному закону, либо по закону нормального распределения. Обычно для проведения таких расчетов пользуются приближенными графическими методами, предложенными А. Ф. Яковлевым совместно с Р. М. Коганом (1958).

Пример результатов такого расчета для ореола рассеяния эллиптической формы (в плане) приведен на рис. 34. На этом примере отчетливо видно, что интенсивность  $\gamma$ -излучения над ореолом рассеяния

\* При проведении районирования крупных территорий целесообразно на основе карты применимости автосъемки составить в масштабе  $1 : 250\ 000$  схему расположения площадей, доступных для автопоисков.

в пределах его контура весьма невелика по сравнению с интенсивностью излучения в центре ореола, принятой за единицу.

Количественные расчеты и практический опыт показывают, что при мощности элювиально-делювиальных отложений порядка 3—5 м интенсивность  $\gamma$ -излучения в эпицентре ореолов, возникающих в результате рассеяния рудных тел, редко превышает 5—10 мкР/ч (над уровнем фона окружающих отложений). Очевидно, что такой ореол рассеяния может быть обнаружен современными автомобильными радиометрами только в том случае, когда поисковый маршрут пересекает контур ореола.

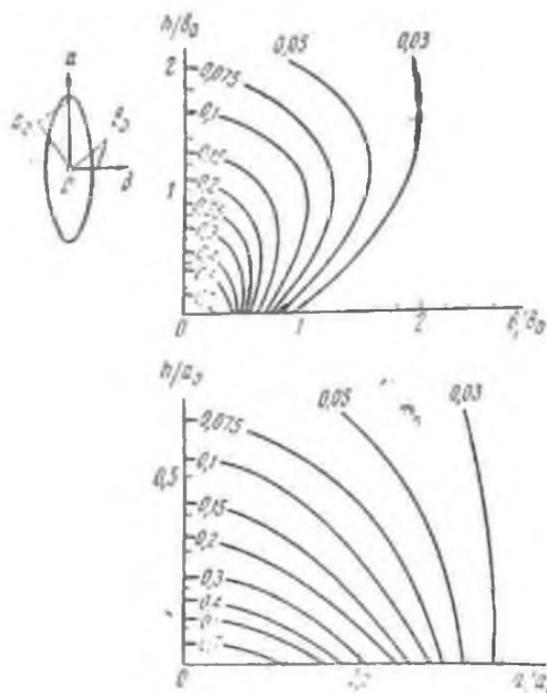


Рис. 34. Гамма-поле над излучающим объектом эллиптической формы.

Интенсивность  $\gamma$ -излучения на поверхности объекта убывает от центра к периферии по закону Гаусса. Изолинии показаны в долях интенсивности  $\gamma$ -излучения ( $I$ ) на поверхности в центре объекта. Отношение величин полуосей эллипса  $\frac{a_0}{b_0} = 3$ ; расстояние от центра объекта ( $a$  и  $b$ ) и высота над центром объекта ( $h$ ) выражены в долях  $a_0$  и  $b_0$ .

На результаты измерений интенсивности  $\gamma$ -излучения существенное влияние оказывают различия чувствительности приемника излучения в разных направлениях, экранирующее действие автомашины, скорость движения по поисковому маршруту, а также рельеф местности.

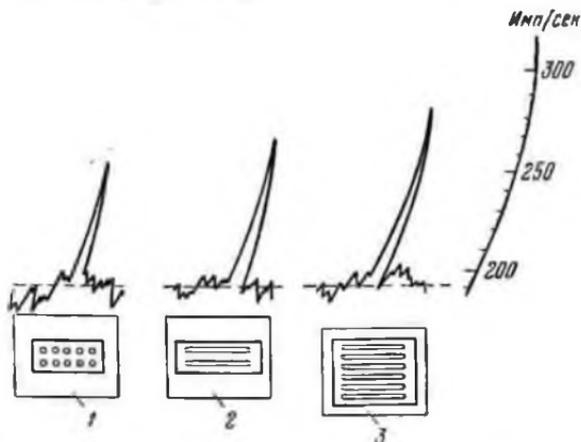
На рис. 35 показана  $\gamma$ -аномалия, зарегистрированная при различной ориентировке кассеты прибора СГ-65 относительно локального источника излучения.

Экранирующее действие автомашины, проявляющееся в уменьшении измеренной величины  $\gamma$ -интенсивности по отношению к ее истинной величине, замечается в зависимости от места расположения кассеты в автомашине, а также размеров и расположения излучающего объекта относительно автомашины. Коэффициент экраниро-

ванья\* является наименьшим (20%), когда кассета располагается впереди и сзади автомашины, и наибольшим (40%), когда кассета расположена внутри автомашины (рис. 36).

Рис. 35. Интенсивность  $\gamma$ -излучения локального объекта, зарегистрированная при различной ориентировке приемника излучения относительно излучающей поверхности

1, 2, 3 — расположение кассеты относительно излучающего объекта



Инерционные искажения проявляются в уменьшении амплитуды и увеличении ширины регистрируемой аномалии по сравнению с их истинными величинами, а также в смещении максимума записи аномалии по отношению к его истинному положению на местности. Величина инерционных искажений зависит от постоянной времени радиометра и размеров регистрируемой  $\gamma$ -аномалии («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957).

Обычно эта величина характеризуется коэффициентом инерционных искажений ( $Q$ ), равным отношению истинной (определенной без инерционных искажений) интенсивности  $\gamma$ -излучения ( $I_0$ ) в данной точке маршрута к интенсивности, зарегистрированной в этой точке в процессе движения по маршруту ( $I_3$ ). Для условий автомобильной  $\gamma$ -съемки величина  $Q$  с достаточной точностью может быть определена по формулам\*\*

$$Q = 0,75 + 0,92 \left( \frac{\tau\nu}{x_0} \right) \quad (23)$$

\* Коэффициент экранирования количественно характеризует поглощаемую автомобильной долей  $\gamma$ -излучения земной поверхностью.

\*\* Эти формулы справедливы при  $\frac{\tau\nu}{x_0} \geq 0,5$  или  $0,35 \leq \frac{\tau\nu}{x_3} \leq 1,43$ , что соответствует наиболее распространенным условиям автопоисков (Евдокимов, 1962).

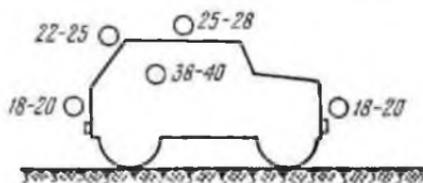


Рис. 36. Экранирующее действие автомашины (излучающий объект — полупространство)

Кружки и цифры — места определения и значений коэффициентов экранирования  $\eta$  %

$$Q = 0,75 + \frac{0,828\tau v}{x_2 - 0,7\tau v} \quad (23a)$$

где  $\tau$  — постоянная времени радиометра, сек;

$v$  — скорость движения автомашины по маршруту, м/сек;

$x_0$  — истинная ширина аномалии (на половине интенсивности  $I_0$ );

$x_2$  — ширина записываемой аномалии (на половине интенсивности  $I_2$ ).

В различных условиях автогамма-съемки истинная амплитуда аномалий уменьшается (при соответствующем увеличении истинной ширины аномалии), обычно не более чем в 3—5 раз. Смещение максимумов в сторону движения автомашины обычно не превышает истинной ширины аномалии и может быть рассчитано по формуле

$$\Delta x_0 = \frac{0,6 \cdot x_2 \sqrt{\ln Q}}{Q} \quad (24)$$

Предельно допустимая (максимальная) скорость движения автомашины определяется параметрами применяемой аппаратуры (чувствительностью и инерционностью), а также ожидаемыми размерами и интенсивностью  $\gamma$ -аномалий. Если величину порога уверенного отсчета радиометра\* обозначить  $P$ , ширину аномального поля на половине максимальной интенсивности —  $x_0$ , максимальную интенсивность —  $I_0$ , а постоянную времени радиометра —  $\tau$ , то максимальная допустимая скорость движения по маршруту  $v_m$  определится формулой

$$v_m = \frac{x_0}{\tau} \left( \frac{I_0 - 0,75P}{0,92P} \right) \quad (25)$$

Опыт работ и количественные расчеты показывают также, что максимально допустимая скорость движения для современных авторадиометров при проведении автогамма-съемки в масштабе 1 : 25 000 составляет 25—30 км/ч, в масштабе 1 : 10 000 — 15—18 км/ч, в масштабе 1 : 5000 — 8—10 км/ч, а при съемке в масштабе 1 : 2000 и детализации аномалий — 3—4 км/ч.

Средняя скорость движения автомашины, обеспечивающая надежную регистрацию аномалий при автогамма-съемке масштабов

\* Величина порога уверенного отсчета определяется по формуле

$$P = \frac{3}{\sqrt{2\tau g}} \cdot \sqrt{I_{\phi} + I_{\text{оф}}}$$

где  $g$  — чувствительность радиометра, имп/сек на 1 мкр/ч;

$I_{\phi}$  — нормальный фон пород, мкр/ч;

$I_{\text{оф}}$  — остаточный фон радиометра, мкр/ч.

1 : 25 000 и 1 : 10 000 на больших площадях, обычно составляет 10—15 км/ч.

Искажающее влияние рельефа местности на результаты автогамма-съемки (вследствие изменения телесного угла облучения), как правило, сказывается незначительно, и колебания измеряемой интенсивности  $\gamma$ -излучения, связанные с изменением рельефа, обычно не превышают 10—15%, в редких случаях достигая 50—80% (при движении в ущельях, топелях и т. п.).

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АВТОГАММА-СЪЕМКИ

**Виды, масштабы и организация автогамма-съемки.** Существуют два вида автогамма-съемки — маршрутная и площадная. Маршрутная съемка не имеет самостоятельного значения и применяется при проведении рекогносцировочных исследований.

Площадная автогамма-съемка в зависимости от перспективности и степени радиометрической изученности района работ, а также поставленных перед поисками задач, проводится в масштабах от 1 : 25 000 до 1 : 1000. Как правило, площадные автогамма-съемки производятся после проведения аэрогамма-съемки, результаты которой учитываются при выборе площадей и масштабов автомобильной  $\gamma$ -съемки.

Автомобильная  $\gamma$ -съемка обычно используется в комплексе с пешеходной  $\gamma$ -съемкой, эманационной съемкой, металлометрией, а также поисковым бурением и легкими горными работами, без которых невозможно полноценное опоскование площади и надежная оценка аномалий, выявленных автосъемкой.

Съемка в масштабе 1 : 25 000 обычно применяется для исследования крупных площадей (несколько тысяч квадратных километров), ранее не обследованных наземными радиометрическими методами, но перспективных на уран по общим геологическим данным. Масштаб 1 : 10 000 используется преимущественно на площадях размером до нескольких тысяч квадратных километров с установленными перспективами ураноносности. Масштабы 1 : 5000 и 1 : 2000 \* применяются в пределах рудоносных площадей (десятки и сотни квадратных километров), примыкающих к известным месторождениям или перспективным рудопроявлениям радиоактивных руд, а также при наземной проверке аэрогамма-аномалий.

Самостоятельные автопоисковые партии создаются для проведения больших объемов автопоисковых работ (десятки тысяч квадратных километров) \*\*. При меньших объемах площадных автопоисков эти

\* Иногда в целях удобства разбивки поисковой сети применяется не стандартный масштаб 1 : 2500.

\*\* Состав типовой автопоисковой партии не зависит от масштаба проводимых работ. Нормами предусматривается одновременная работа в партии девяти съемочных автомашин.

работы обычно проводятся силами автопоисковых отрядов, входящих в состав геологопоисковых партий. Маршрутные автопоиски проводятся силами отрядов (одна съемочная автомашина), в состав которых входит техник-геофизик (оператор), геолог и шофер.

Подготовка аппаратуры, оборудования и документации. Для автогамма-поисков до последнего времени использовались главным образом гамма-радиометры типа СГ-65 на газоразрядных счетчиках. В настоящее время промышленность выпускает радиометры типа РА-69 также на газоразрядных счетчиках, отличающиеся более высокой чувствительностью. Принципиально автомобильные радиометры аналогичны самолетным радиометрам СГ-10 (АСГМ-25) и отличаются от них лишь деталями конструкции. Основные параметры современных автомобильных радиометров приведены в табл. 4.

Для автопоисков используются автомашины типа ГАЗ-69 и ГАЗ-69А. Использование грузовых автомашин (ГАЗ-63, ГАЗ-51 и др.) повышает стоимость работ, поэтому рационально лишь при эпизодическом применении автомобильного метода (например, в паземных отрядах аэропоисковых партий).

Подготовка аппаратуры заключается в проверке комплектности и работоспособности приборов, подборе счетных трубок и т. д.

При установке кассеты счетчиков на автомашине учитывается зависимость чувствительности детектора от направления  $\gamma$ -лучей, форма  $\gamma$ -поля над естественными объектами, а также экранирующее действие автомашины и необходимость обеспечения сохранности прибора при движении по бездорожью. Кассета счетчиков Гейгера укрепляется с помощью крошителей на заднем борту автомашины, торцами трубок по ходу движения (большей стороной кассеты вниз) на высоте 0,7—1,0 м над уровнем земли. При съемке по дорогам кассета укрепляется с помощью реек и растяжек на крыше кузова автомашины, торцами счетных трубок вниз (большей стороной кассеты по ходу движения). Такая установка кассеты обеспечивает минимальное влияние дорожного покрытия на результаты измерений. Сцинтилляционный приемник излучения в виду особенностей его конструкции во всех случаях устанавливается вертикально в тех же точках автомашины.

Окончательная проверка работоспособности аппаратуры производится путем проведения нескольких заездов по маршрутам.

Для проведения автопоисковых работ подготавливается следующая документация: топографо-геологическая основа, журнал учета объемов выполненных работ, журнал предварительной регистрации и кадастр аномалий, журнал контрольных измерений, журнал этилопирования радиометров, аномалий, а также сводные и рабочие карты. Сводные карты (масштаб в 4—5 раз мельче, чем масштаб проводимых поисков) используются для оперативного планирования и учета проведенных работ. На основе этих карт составляется схема опоскования площади, на которой указываются расположение участков, номера и расположение магистралей, последовательность проведения поисков. Сводные карты изготавливаются на основе име-

ющихся топографических карт, на которые наносится геологическая ситуация. Рабочие карты (схемы) изготавливаются в масштабах, наиболее близких к масштабу проводимых работ (на основе наиболее детальных из имеющихся топографических и геологических карт). Целесообразно в качестве основы для них использовать стандартные аэрофотосъемки. Эти карты используются операторами в процессе проведения съемки для привязки маршрутов, предварительной интерпретации результатов, нанесения выявленных аномалий и т. п.

**Эталонирование авто-радиометров.** Эталонирование (градуирование) автомобильных радиометров производится перед началом работ, а также в процессе полевых работ по мере изменения чувствительности выше допустимого предела ( $\pm 10\%$ ) и при замене деталей в схеме или счетных трубок.

Методика эталонирования автомобильных радиометров аналогична методике эталонирования самолетных радиометров (см. гл. III) и описывается в инструкциях, прилагаемых к приборам.

Составной частью эталонирования является экспериментальное определение остаточного фона автогамма-радиометра над водной поверхностью (на нерадиоактивных водоемах глубиной

не менее 1 м, шириной не менее 20—30 м, с пологими и слабо радиоактивными берегами). Измерения можно производить разместив прибор на плоту или в лодке либо не снимая прибора с автомашины, на пароме или деревянном мосту без земляного покрытия. График эталонирования авторадометра строится так же, как и для пешеходных радиометров (см. рис. 43).

**Построение поисковой сети и проведение полевых измерений.** Поисковая сеть для проведения площадных автомобильных поисков строится на основе прямолинейных параллельных маршрутов.

Расстояния между маршрутами и оптимальная длина маршрутов\* (табл. 7) зависят от масштаба поисков (Евдокимов, 1961).

Различают два способа построения поисковой сети: одно- и двух-базисный. При однобазисном способе расположение поисковых маршрутов контролируется одной магистральной линией; при двух-базисном — концы маршрутов контролируются двумя магистральями. Для проведения площадных автопоисков в значительных объемах

Таблица 7

*Изменение расстояния между маршрутами и их оптимальной длины при съемках различных масштабов*

Масштаб автопоисков	Расстояние между маршрутами, м	Оптимальная длина маршрутов, км
1 : 25 000	250	3,4
1 : 10 000	100	2,3
1 : 5 000	50	1,7
1 : 2 000	20	1,2

\* Под оптимальной понимается такая длина маршрутов, при которой на развороты, повторные (узвучные) маршруты и детализацию аномалий затрачивается минимальная их часть.

основным способом построения поисковой сети является двухбазисный способ (или сочетание одnobазисного и двухбазисного способов).

При маршрутной съемке на целине, поисковая сеть строится на основе прямых линий (или ломаных) маршрутов, задаваемых таким образом, чтобы они пересекали интересующие поисковика комплексы пород и геологические структуры.

Прокладка поисковых маршрутов относительно магистралей производится с помощью искусственных передвижных ориентиров (высоких вешек с флагами), которые обычно переносятся по магистрали рабочими-речетниками. При автосъемке в масштабе 1 : 5000 и крупнее передвижение и установку ориентиров в том же порядке можно производить без участия рабочих-речетников, снабдив предварительно вехи легкими треногами с шипами для укрепления в грунте.

В начале рабочего дня проводится контроль чувствительности радиометра рабочим эталоном и заезд по контрольному маршруту (см. выше). Во время подъезда к съемочному участку прибор остается включенным и производится запись на ленту.

Как правило, при съемке используется минимальная постоянная выдержка. Не менее трех раз в день шкала прибора калибруется, а положение «нуля записи» контролируется не реже чем через час в течение рабочего дня. Скорость движения при съемке должна выдерживаться по возможности постоянной и не должна превышать величин, указанных в разделе 1 настоящей главы.

Ежедневно площадная съемка начинается с повторения одного (обычно последнего) маршрута предыдущего дня. Повторный маршрут проходится с той же скоростью движения и в том же направлении, что и основной маршрут.

В процессе съемки непрерывно анализируется запись радиометра путем ее сопоставления с результатами визуальных наблюдений за геологической и геоморфологической обстановкой по маршруту. На ленте отмечаются начало и конец каждого маршрута (моменты прохождения автомашины через магистрали), номера маршрутов, а также фиксируются с помощью кратких записей или заранее разработанных условных обозначений результаты визуальных наблюдений, характер поверхности, по которой движется машина, коренные выходы и высыпки пород, задернованные участки и т. п. Одновременно оператор следит за правильностью перемещения ориентиров по магистралям.

При обнаружении аномального повышения интенсивности  $\gamma$ -излучения об этом делается отметка на ленте, а затем на минимальной скорости (2—5 км/ч) проходится короткий маршрут в обратном направлении для уточнения положения максимума аномалии. Максимум отмечается на местности земляным туром, высоким колом или вехой. Аномальное повышение детализируется серией параллельных маршрутов (через 5—25 м в зависимости от масштаба поисков и размеров аномального поля), выходящих в нормальное  $\gamma$ -поле. Выявлен-

вые детализацией максимумы отмечаются по местности, а их местоположение наносится на схему детализационных маршрутов с указанием направления движения автомашин и мест отбора проб (образцов) пород, после чего съемка продолжается в обычном порядке.

**Полная обработка результатов измерений.** Обработка результатов измерений заключается в расшифровке и оформлении лент записи (осреднение и перевод показаний радиометра в микрорентгены в час и т. п.), графическом изображении результатов (построение карт, графиков, вариационных кривых), заполнении каталогов и полевых журналов. Перед началом обработки подписи и отметки на ленте (ориентиры, результаты визуальных наблюдений и т. п.) приводятся в порядок. В начале ленты наносится криволинейная шкала перевода импульсов в секунду в микрорентгены в час. Затем проводится осреднение показаний прибора. Перевод показаний радиометра и перенесение этих показаний на карту производится с помощью палетки, входящей в комплект радиометра.

Результаты автомобильной съемки изображаются в виде карт изолиний  $\gamma$ -активности (при площадной съемке) или карт  $\gamma$ -активности по маршрутам.

Полевые карты изолиний обычно строятся в масштабе съемки по участкам, а затем сводятся путем пантографирования в единую карту более мелкого масштаба. Интервалы  $\gamma$ -активности обычно выбираются равными  $2 \text{ мкр/ч}$  для плавно меняющихся  $\gamma$ -полей и равными  $4-8 \text{ мкр/ч}$  для полей с большим градиентом. При проведении изолиний (особенно при построении детальных карт) необходимо учитывать смещение записи на ленте вследствие инерционных искажений. Для учета этого смещения точки с одинаковыми (границными для интервалов между изолиниями) значениями  $\gamma$ -активности на соседних маршрутах, заезды по которым проводились в противоположных направлениях, соединяются на карте тонкими прямыми линиями (рис. 37). Затем каждая прямая мысленно делится пополам и через точки деления проводится изолиния, на форме которой инерционные искажения сказываются незначительно.

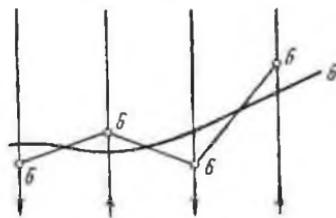


Рис. 37. Учет инерционных искажений при проведении изолиний

Построение карты изолиний сопровождается анализом формы записи на ленте. Часто определенные комплексы пород характеризуются специфической формой записи («пилообразная» запись над графитами, «спокойная» запись над известняками и т. п.). Такие особенности формы записи позволяют использовать результаты автосъемки в помощь геологическому картированию. Если при анализе записи выясняется, что отдельные повышения, в том числе и незначительные по интенсивности, могут быть объединены в зоны, выявляющиеся по характерным особенностям формы записи, то оси этих зон также наносятся на карту изолиний. Карты  $\gamma$ -активности по маршрутам строятся на основе схем заездов, откорректированных

в процессе проведения маршрутных поисков. Величины  $\gamma$ -активности наносятся цветными линиями, аномалии — условными знаками. Все сведения о выявленных аномалиях записываются в журнал предварительной регистрации аномалий.

По результатам предварительной проверки аномалий (см. ниже) составляются следующие документы: схематическая геологическая карта, на которую нанесены места расположения горных выработок, профили геофизических измерений, места отбора проб и т. п.; карта изолиний интенсивности  $\gamma$ -поля, составленная по результатам детальной авто съемкой, на которую нанесены максимумы, выделенные пешеходной съемкой; графики концентрации эманации по профилям; геолого-геофизическая документация горных выработок с результатами радиометрического анализа бороздовых проб; таблицы и графики содержания элементов-спутников по результатам спектрального анализа; список образцов горных пород с указанием мест отбора; объяснительная записка с кратким описанием аномалий, оценкой их перспективности и рекомендациями по дальнейшей проверке.

**Геологическая интерпретация результатов автопоисков.** Проверка аномалий. Геологическая интерпретация результатов автомобильных  $\gamma$ -поисков заключается в оценке выявленных аномалий, выделении характерных геологических и геоморфологических признаков перспективных и бесперспективных  $\gamma$ -аномалий и использовании результатов автопоисков в помощь геологическому картированию.

Интерпретация записи радиометров в процессе проведения съемки имеет целью выделение аномальных повышений интенсивности  $\gamma$ -излучения. Поскольку ни форма записи, ни абсолютная величина повышения интенсивности  $\gamma$ -излучения пород сами по себе не являются достаточно надежными признаками его перспективности, особенно важны тщательный анализ и фиксация оператором геологической обстановки по маршруту. Так, на основании визуальных наблюдений в процессе съемки, как правило, легко могут быть отбракованы как неперспективные повышения интенсивности  $\gamma$ -излучения, связанные с выходами, высыпками и валунами коренных пород (сневитов, аплитов, грацитов и т. д.), обычно обладающих повышенной радиоактивностью, если эти повышения заметно не превосходят фона, характерного для данных пород в районе работ.

Особого внимания заслуживают повышения интенсивности  $\gamma$ -излучения, приуроченные к участкам задернованной поверхности, площадям развития рыхлых отложений, выходам источников вод, долинам, конусам выноса и т. п., поскольку такие повышения нередко связаны с ореолами рассеяния скрытых на глубине рудных тел, потоками рассеяния или россыпями радиоактивных минералов.

Дальнейшая интерпретация заключается в сборе и анализе сведений о перспективности выявленных аномалий. Этот анализ проводится по результатам проверочных работ.

Проверка автогамма-аномалий осуществляется в три этапа. На первом этапе проводится геологическое и геоморфологическое

обследование аномальной площади, сопровождаемое пешеходной  $\gamma$ -съемкой с высокочувствительными радиометрами. Эта работа устанавливает комплексы пород и геологические структуры, с которыми пространственно связана аномалия, а также уточнить местоположение максимумов интенсивности  $\gamma$ -излучения. Если в результате этих исследований с несомненностью устанавливается, что данная аномалия вызвана геологическими объектами, не представляющими по-искового интереса (например, выходами пород, обладающих нормаль-слабо радиоактивных наносов), то эта аномалия дальнейшей проверке не подвергается. Если аномалия связана с перспективными геологическими образованиями (структурами, комплексами пород), а также если геологические причины появления аномалии неясны, то такая аномалия подвергается дальнейшей проверке.

На втором этапе проводится следующий комплекс работ.

1. Геолого-радиометрическое обследование участка в масштабе 1 : 2 000—1 : 5 000 с составлением схемы геологического строения, на которой указывается местоположение максимумов и осей аномалий. Примерный объем работ — 0,5 км<sup>2</sup>.

2. Эманационная съемка по трем—пяти профилям, проходящим вкрест простирания аномалий. Профили проходятся через максимумы аномалии и на ее флангах с шагом 5 м. При проведении эманационной съемки определяется природа радиоактивности путем раздельного определения содержания радона и торона на каждой третьей—пятой точках, а также на максимумах аномалий. Примерный объем эманационных измерений на одной аномалии составляет 100—200 точек.

3. Металлометрическое опробование рыхлых отложений и коренных пород на уран и элемент-спутники (Mo, Cu, Pb, Co, Bi, Zn, P, V и др., в зависимости от металлогенетических особенностей данного района) проводится по двум—трем профилям с шагом 10 м в пределах максимума аномалии и с шагом 20—25 м на ее флангах. Примерный объем металлометрического опробования на одной аномалии 40—50 проб.

4. Горные работы (канавы и шурфы) используются для вскрытия на глубину участков, к которым приурочены повышенные  $\gamma$ -активность и концентрация эманации. Примерный объем канавных работ 15—20 м<sup>3</sup>, шурфов 3—5 пог. м. В горных выработках проводится геолого-геофизическая документация ( $\gamma$ - и эманационные измерения).

5. Бороздовое опробование горных выработок проводится по результатам геолого-геофизической документации. Если в результате указанных работ не устанавливается перспективность данной аномалии, то она подвергается дальнейшему исследованию — детальной проверке с применением комплекса геолого-геофизических (поверхностных и глубинных) и горнобуровых работ по обычной методике, принятой для детальной проверки радиометрических аномалий.

Контроль и оценка качества аэрогамма-поисковых работ. Контроль чувствительности радиометров производится ежедневно утром и вечером с помощью стандартного или рабочего эталона, создающего регистрируемую интенсивность излучения около 5—6 мкр/ч.

С целью контроля постоянства остаточного фона авто-радиометров и увязки результатов измерений разными экземплярами приборов ежедневно в начале и конце работы необходимо проходить контрольный маршрут длиной 1—2 км, расположенный в пределах как нормального, так и повышенной γ-полей.

Контроль качества прокладки маршрутов осуществляется два-три раза в течение полевого сезона для каждого съемочного экипажа. С этой целью на любых типичных для района работ участках местности после прохождения автомашиной маршрута с помощью теодолита или буссоли провешивается прямая линия, точно идущая в том направлении, в котором должен проходить маршрут. Затем расстояния между этой линией и следом автомашины измеряются мерной лентой. Максимальная величина бокового смещения маршрута не должна превышать  $\pm 25\%$  принятого межмаршрутного расстояния (исключая объезды местных препятствий).

Полевая точность оценивается на основании проведения повторных измерений (ежедневного повторения последнего маршрута предыдущего дня). При проведении повторных маршрутов автомашина должна двигаться точно по тому же следу, что и при первых измерениях, в том же направлении и с той же скоростью, причем кассета радиометра должна находиться в том же положении относительно земной поверхности и автомашины. Величина средней квадратичной ошибки при измерениях автомобильными радиометрами типа СГ-65 и РА-69 не должна превышать  $\pm 1$  мкр/ч. Результаты контрольных измерений заносятся в специальный журнал в виде графиков и таблиц.

### 3. ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АВТОМОБИЛЬНОЙ ГАММА-СЪЕМКИ

*Пример 1.* Район работ представляет собой слабо всхолмленную степь. Пропускимость для автомашины хорошая. До проведения аэропоисков район был покрыт аэросъемкой масштаба 1 : 25 000, которая выявила урановое оруденение. Аэропоиски в масштабе 1 : 10 000 проводились в полосе между двумя рудопроявлениями, выявленными при аэропоисках.

В геологическом строении района работ принимают участие породы палеозоя: более древние — порфириды и их туфы, известняки, алевролиты и более молодые — конгломераты и песчаники. Рыхлые отложения развиты повсеместно и представлены элювиально-делювиальным покровом мощностью 2,5—7,0 м. Урановое оруденение приурочено к толще известняков и алевролитов и в некоторых случаях контролируется зонами разломов. По радиоактивности породы

района дифференцированы слабо. Величина нормальной  $\gamma$ -активности  $\bar{\gamma} = 8 \text{ мкр/ч}$ .

В процессе автопоисков на участке с задернованной поверхностью зафиксировано повышение интенсивности  $\gamma$ -излучения примерно

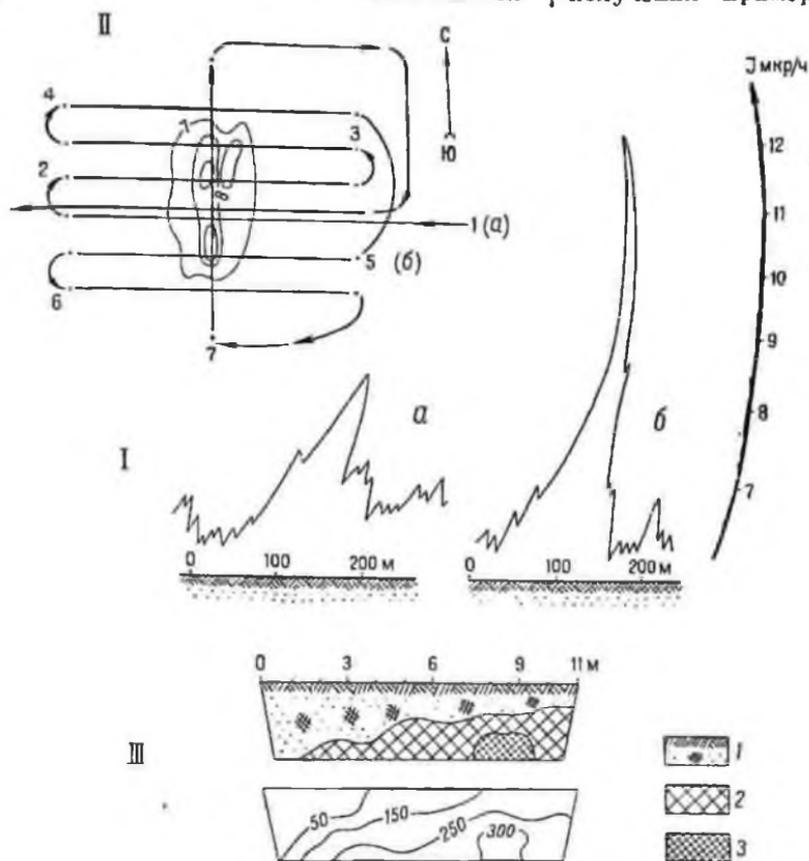


Рис. 38. Пример выделения рудной аномалии автопоисками.

- I — запись  $\gamma$ -фона по основному маршруту (а) и по одному из детализационных маршрутов (б); II — план изогам по результатам детализации аномалии; III — результаты геологической и радиометрической документации канала, вскрывающей эпицентр аномалии
- 1 — песчано-глинистые отложения с редкими обломками оруденелых пород;  
2 — аллювий оруденелых пород; 3 — оруденелые породы

на  $2 \text{ мкр/ч}$  над фоном окружающих пород, равным  $6-7 \text{ мкр/ч}$  (рис. 38, а). Повышение детализировалось шестью маршрутами через  $25-30 \text{ м}$ . При детализации выявлен еще ряд повышений  $\gamma$ -активности, коррелирующих в виде полосы длиной  $120 \text{ м}$  и шириной  $40-50 \text{ м}$ . Максимальная величина  $\gamma$ -активности по результатам детализации  $13 \text{ мкр/ч}$  (рис. 38, б). При обследовании участка аномалии с пешеходным радиометром выявлено несколько точек

с  $\gamma$ -активностью 150—180 мкр/ч. Концентрация эманации до 100—150 эман. природа активности смешанная (радопо-торошовая). В металлотрических пробах отмечены повышенные содержания фосфора и молибдена, что типично для уранового оруденения в этом районе. Двумя канавами вскрыты песчано-глинистые делювиальные отложения с мелкими и редкими обломками известняков, несущих признаки уранового оруденения, а в забое — элювий оруделых известняков. Интенсивность  $\gamma$ -излучения в канавах до 350—400 мкр/ч, концентрация эманации до 450—500 эман, природа эманационной аномалии чисто радошовая.

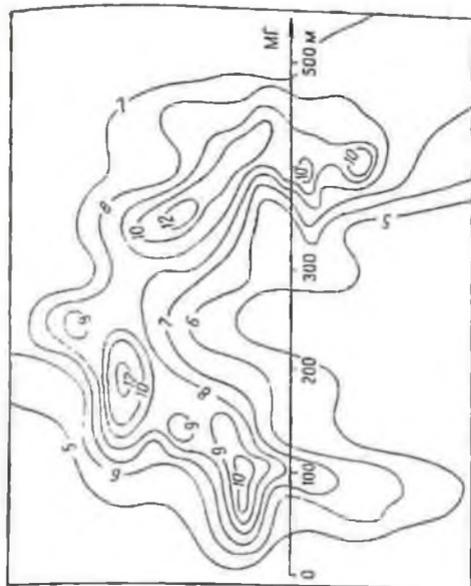
Аномалия передана под детальную проверку с применением горно-буровых работ, в результате которых выявлено промышленное оруденение.

**Пример 2.** Район работ представляет собой крупную депрессию, окаймленную сравнительно невысокими, но резко пересеченными и залесенными горами. Обрамление депрессии сложено гравитами, гранодиоритами, порффирами, их туфами. Депрессия сложена песчано-глинистыми отложениями. По радиоактивности породы дифференцированы. Повышенной  $\gamma$ -активностью отличаются мелкозернистые графиты, граносиениты. Сравнительно слабой равномерной  $\gamma$  активностью (4—6 мкр/ч) отличаются осадочные породы. В районе проводились аэропоисковые работы масштаба 1 : 25 000, сопровождающиеся маршрутными автопоисками в пределах краевых частей депрессии. В процессе выполнения автопоискового маршрута вдоль борта депрессии на задернованном участке с редкими высыпками песчаников было встречено повышение  $\gamma$ -активности, не зафиксированное аэропоисками. Превышение интенсивности  $\gamma$ -излучения над фоном, равным 5—6 мкр/ч, достигает по основному маршруту 10 мкр/ч (рис. 39, а).

Аномалия детализировалась маршрутами через 50 м. Максимальная интенсивность по результатам детализации достигает 21 мкр/ч. Аномалия вытягивается в виде подковы на 400 м при ширине 50—75 м. Эманационной съемкой фиксируется аномалия с концентрацией радона до 250 эман на фоне поля в 20—25 эман; природа активности смешанная (преимущественно торошовая). По металлотрическим пробам отмечаются повышенные содержания фосфора, меди, свинца, кобальта.

Канавами на площади выявленного повышения  $\gamma$ -активности вскрыты переслаивающиеся углисто-глинистые сланцы и песчаники, перекрытые элювиально-делювиальными отложениями мощностью до 1,5 м. Концентрация радона в выработках до 400 эман, максимальная величина  $\gamma$ -активности до 100—150 мкр/ч. Повышенные содержания урана связаны с пачкой углисто-глинистых сланцев и песчаников несогласно залегающих на кристаллическом фундаменте. Аномалия передана под детальную проверку с применением горно-буровых работ.

С методической точки зрения интересно отметить, что в непосредственной близости от этой аномалии встречены несколько локальных



Эмбр/ч

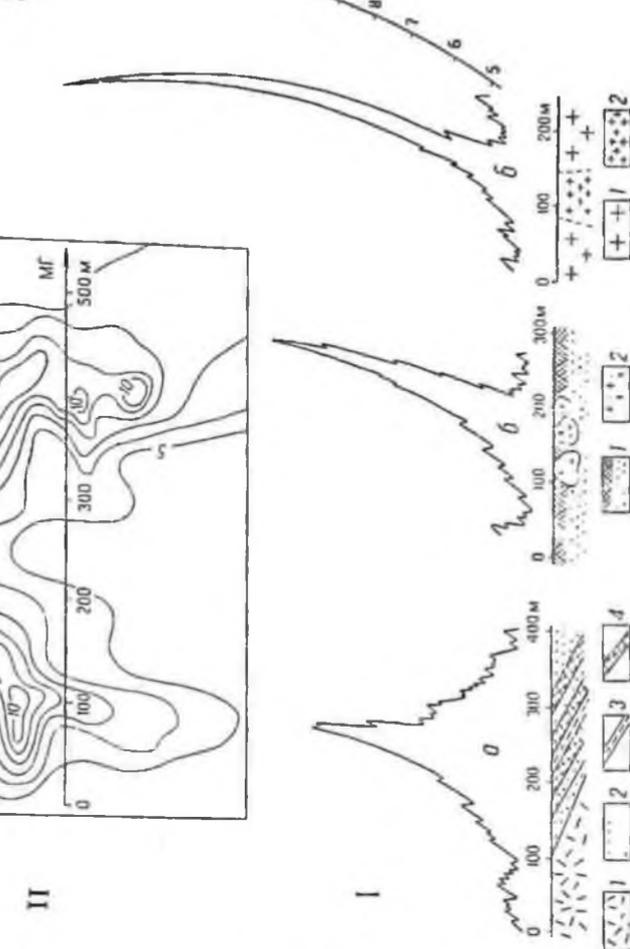


Рис. 39. Примеры записей у-поля над рудными и безрудными аномалиями (I) и план изогома рудной аномалии (II)

1 — рудная аномалия; 2 — песчаники, эффузивы; 3 — глина; 4 — рудносые сланцы; 6 — безрудный андезит; 1 — песчано-глинистые отложения; 2 — валуны свецит-порфиром; 6 — безрудная аномалия; 1 — крупнозернистые граниты; 2 — мелкозернистые граниты

повышевший  $\gamma$ -активности, связанных с высыпками мелкокристаллических венцементных гранитов (рис. 39, а), скоплениями мелких валунов граноспелитов (рис. 39, б). Эти повышения отличаются значительно более высокой максимальной интенсивностью и локальностью, чем выпявление, связанное с урановым оруденением, однако они легко были отбракованы уже в процессе проведения маршрута на основании результатов визуальных наблюдений оператора и геолога.

\* \* \*

Ближайшей перспективой развития метода автопоисков является более широкое внедрение высокочувствительных малоинерционных авторадометров на сцинтилляционных счетчиках, а также использование новых транспортных средств — вездеходов с повышенной проходимостью. Такое техническое перевооружение метода позволит увеличить скорости движения при автогамма-съемке и территориально расширит область применения метода, повысив его производительность и уменьшив стоимость работ без ущерба для их геологической эффективности.

Другим направлением развития метода является внедрение навигационных систем, позволяющих проводить автогамма-съемки без разбивки поисковой сети и использования передвижных ориентиров, а также разработка автоматических счетно-решающих устройств для обработки лент записи авторадометров и построения радиометрических карт. Эти усовершенствования также позволят уменьшить затраты и автоматизировать трудоемкие процессы.

Перспективным направлением представляется также разработка и внедрение наряду с автогамма-методом таких автомобильных модификаций геофизических методов поисков как автомагнитная съемка, автомобильная электроразведка, автомагнитная съемка и метод определения вещественного состава горных пород по рассеянному  $\gamma$ -излучению и наведенной  $\gamma$ -активности. Более близким будущим является широкое внедрение метода разделения  $\gamma$ -аномалий по природе радиоактивности с помощью автомобильных радиометров-анализаторов ( $\gamma$ -спектрометров).

Развитие перечисленных выше методов позволит расширить круг решаемых автосъемкой геологических задач и уменьшить объемы работ сравнительно дорогих и менее производительных пешеходных модификаций этих методов, в настоящее время широко применяемых для поисков радиоактивных руд в доступных для автосъемки районах.

## ПЕШЕХОДНАЯ ГАММА-СЪЕМКА

Среди разновидностей  $\gamma$ -метода (самолетные и автомобильные  $\gamma$ -съемки, поисковый  $\gamma$ -картаж и др.) пешеходные  $\gamma$ -съемки наиболее широко используются при поисках месторождений радиоактивных и сопутствующих им элементов. Основные достоинства этого метода следующие:

а) высокая результативность, производительность и относительно небольшая стоимость этих съемок;

б) возможность применения в районах, недоступных для других радиометрических методов (в высокогорных районах с резкими относительными превышениями рельефа, недоступных для аэропоисков; в условиях, исключающих или ограничивающих применение автомобильных и других механизированных средств поисков; при обводненных наносах или на болотах, недоступных для эманационных поисков и т. п.);

в) возможность непрерывной оценки радиоактивности на всем протяжении маршрута и оперативной детализации аномальных зон;

г) обеспеченность простой в обращении, портативной и чувствительной аппаратурой.

В зависимости от средней глубины залегания представительного горизонта поисков применяются различные модификации наземных  $\gamma$ -поисков. Под представительным горизонтом поисков понимается наиболее приближенный к дневной поверхности горизонт максимального площадного развития вторичных радиоактивных ореолов рассеяния в контуре уверенного обнаружения их современной радиометрической аппаратурой («Глубинные поиски рудных месторождений». Гостеолтехиздат, 1963). Так, на участках широкого развития ореолов рассеяния открытого типа, где представительный горизонт совпадает с дневной поверхностью, применяются автомобильные и пешеходные  $\gamma$ -поиски. При глубине залегания этого горизонта от 0,3—0,5 до 1,0—1,5 м (ослабленные или частично перекрытые ореолы рассеяния)  $\gamma$ -поиски проводятся в закопках, шпурах или с использованием плужных  $\gamma$ -съемок. На участках, перекрытых мощными чуждыми отложениями мощностью до 10—20 м, осуществляются глубинные  $\gamma$ -поиски с применением специальных самоходных буровых установок (типа СУГП и др.).

При проведении автомобильных и плужных  $\gamma$ -поисков обеспечивается непрерывная регистрация  $\gamma$ -поля вдоль поисковых маршрутов. При этом в варианте плужной  $\gamma$ -съемки датчик радиоактивных излучений с помощью специального устройства (типа плуга) располагается на глубине 30—70 см от дневной поверхности.

Пешеходные, шпуровые и глубинные  $\gamma$ -съемки, базирующиеся в настоящее время в основном на использовании сцинтилляционных

радиометров, осуществляются по сети фиксированных точек наблюдений.

При глубоких и шпуровых  $\gamma$ -поисках непрерывная регистрация  $\gamma$ -активности осуществляется в процессе углубления снаряда (применяется палочка) в перекрывающие отложения.

Пешеходные  $\gamma$ -съемки находят применение на всех этапах поисковых работ от рекогносцировок, проводимых с целью оценки перспектив уранопосности больших площадей (прогнозирования), до детальных поисково-разведочных работ, завершающихся предварительной оценкой выявленных рудопроявлений и месторождений урана.

## 1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ДРУГИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ЭФФЕКТИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Постановке пешеходной  $\gamma$ -съемки, как и других видов наземных поисков, должно предшествовать обязательное составление карты природных условий ведения поисковых работ, которая в процессе поисков должна систематически уточняться. На основе такой карты с учетом результатов предварительного тщательного изучения всех имеющихся геологических данных по району работ выделяются наиболее перспективные площади, а в их пределах — наиболее благоприятные для поисков участки. При составлении таких карт, кроме учета геологического строения, необходимо принимать во внимание мощность, состав и характер рыхлых образований, климатические и геоморфологические особенности района работ, в значительной степени определяющие характер развивающихся радиоактивных ореолов рассеяния (открытые, ослабленные, погребенные), а следовательно, и глубину представительного горизонта поисков.

Наиболее благоприятные природные условия для проведения пешеходной  $\gamma$ -съемки имеются в высокогорных районах, где наряду с хорошей обгащенностью широко развиты механические ореолы рассеяния. В подобных условиях физическое выветривание опережает процессы окисления и химического разложения руд, в связи с чем радиоактивное равновесие между радием и ураном в породах оказывается практически нарушенным, а концентрация этих элементов не разубожена. Это дает возможность легко обнаруживать рудопроявления урана при проведении радиометрических наблюдений непосредственно на дневной поверхности.

В пределах нагорий эффективность пешеходной  $\gamma$ -съемки снижается из-за большой распространенности озер, болот и каменных россыпей.

Задача фиксации рудных скоплений урана по результатам  $\gamma$ -поисков на участках каменных и глыбовых россыпей в некоторых случаях может оказаться достаточно сложной, но вполне разрешимой. Болота в подобных районах должны исследоваться по специальной методике (см. раздел 5 настоящей главы).

Эффективность пешеходных  $\gamma$ -поисков в сильно расчлененных невысокогорных районах обычно не ниже, чем в высокогорных. Эффективными эти поиски оказываются и в средне- или слаборасчлененных районах на участках хорошей обнаженности коренных пород и развития рыхлых автохтонных отложений, в пределах которых благодаря хорошо выраженным зонам окисления и интенсивному рассеянию рудного материала широко развиты открытые механические и солевые ореолы рассеяния.

В равнинных, а также в слаборасчлененных средне- и низкогорных районах, закрытых чуждыми рыхлыми отложениями, эффективность пешеходных  $\gamma$ -поисков, как и других радиометрических методов, крайне низка.

На рис. 40 приведен пример хорошего совпадения результатов  $\gamma$ -сцинтилляционной и уранометрической съемок на одном из урановых рудопроявлений, расположенных в южном невысокогорном районе. Идеичность формы графиков свидетельствует о наличии радиоактивного равновесия между ураном и радием в ореоле и, следовательно, о высокой надежности  $\gamma$ -поисков в этих условиях.

В гумидной климатической зоне количество выпадающих осадков преобладает над испарением. При общей повышенной температуре воздуха, характерной для северных и восточных районов СССР, широко развивается вечная мерзлота. В рассматриваемой зоне приповерхностный слой элювиально-делювиальных образований обеднен ураном и радием, так как последние выносятся подмерзлотными водами. В результате этого пешеходные  $\gamma$ -поиски на дневной поверхности оказываются мало эффективными. Однако и в этих районах известны примеры выявления уранового оруденения пешеходными  $\gamma$ -поисками.

На рис. 41 изображены результаты  $\gamma$ -измерений в шпурах на разных глубинах вдоль профиля, пересекающего ореол рассеяния уранового рудопроявления, расположенного в районе с гумидным климатом. Вследствие интенсивного выщелачивания радиоактивных элементов из приповерхностного слоя ореол рассеяния над уранопосной зоной, характеризующейся на глубине 3 м  $\gamma$ -активностью более 1500 *мкр/ч*, с поверхности и при глубине измерений вплоть до 0,6 м практически не выделяется. Лишь при глубине измерений в 1 м аномальная  $\gamma$ -активность пород отмечается уверенно.

На рис. 42 приведены результаты поверхностной и шпуровой  $\gamma$ -сцинтилляционных съемок в пределах одного из урановых рудопроявлений, также расположенного в гумидной климатической зоне. Мощность элювиально-делювиального покрова здесь колеблется от 0,5 до 2,0 м. Как видно на рис. 42, аномальная зона на глубине 1 м имеет размеры 850  $\times$  70 — 150 м.  $\gamma$ -съемка по дневной поверхности отмечает в этих условиях лишь слабую аномалию размером 100  $\times$  50 м, пространственно тяготеющую к участку выхода коренных пород.

В условиях гумидного климата уран накапливается в пролювиальных и аллювиальных отложениях гидросети, а также в болотах.

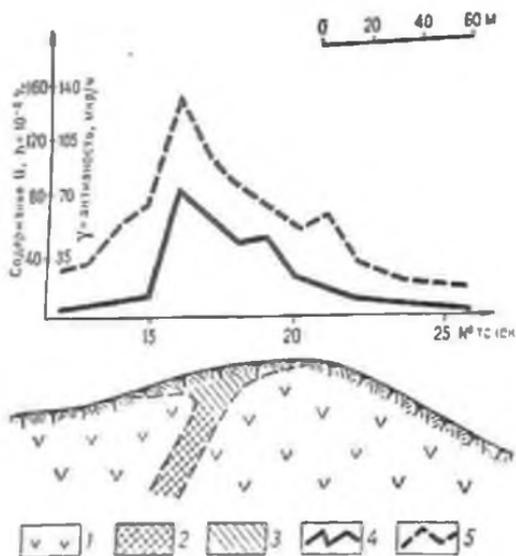


Рис. 40. Результаты пешеходной  $\gamma$ -сцинтилляционной и уранометрической съемки на участке разности ореола рассеяния уранового рудного тела

1 — кварцевые порфиры; 2 — урановое рудное тело; 3 — ореол рассеяния урана в элювиально-делювиальных отложениях; 4 — график содержания урана в металлогрических пробах; 5 — график  $\gamma$ -активности

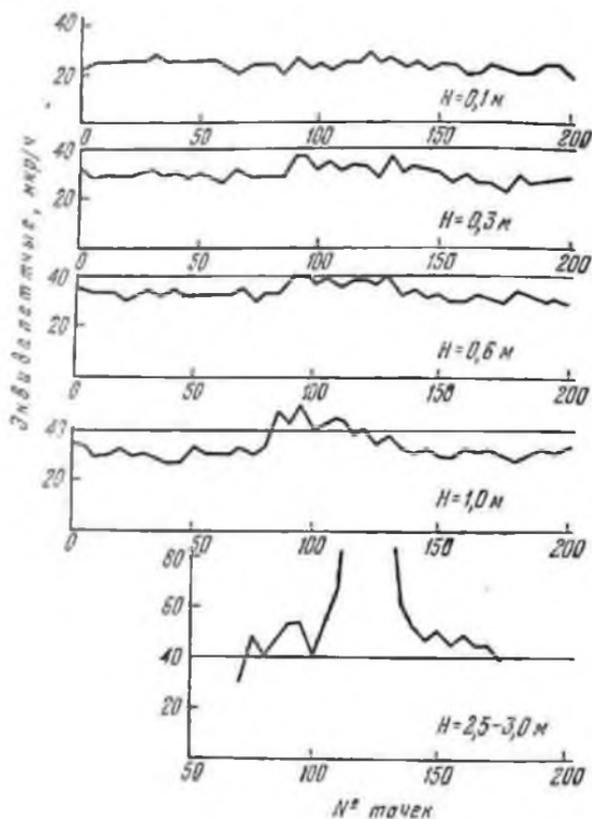


Рис. 41. Изменение  $\gamma$ -активности с глубиной над урановой рудной зоной в условиях гумидного климата

Сплошными горизонтальными линиями отмечены уровни надежного выделения аномалий на фоне колебаний нормального гамма-поля

где он образует устойчивые соединения с органическим веществом; содержание радия при этом часто не отвечает равновесному по отношению к урану.

Значительно более сложными и трудоемкими являются поиски в районах, где коренные породы закрыты аллохтонными дальнеприносными отложениями (морены, лёсс и т. п.). Ореолы рассеяния здесь обычно распространяются на сравнительно небольшие расстояния и редко выходят на дневную поверхность. В подобных районах, как уже отмечалось выше, радиометрические поиски ведутся глубинными методами, в основе которых лежит погружение датчиков радиоактивных излучений ниже перекрывающих отложений, с применением специальных технических средств (вибропогружатели, гидрозадавливатели типа СУГП и т. д.).

## 2. НОРМАЛЬНОЕ И АНОМАЛЬНОЕ ПОЛЯ ГАММА-AКТИВНОСТИ

При пешеходных поисках месторождений урана существенное значение имеет правильная оценка нормального поля активности пород в районе работ, позволяющая установить нижний предел аномалии. Это особенно важно на участках, закрытых рыхлыми образованиями, где иногда по небольшим превышениям  $\gamma$ -активности над нормальной ее величиной могут быть обнаружены практически интересные рудопроявления и месторождения урана.

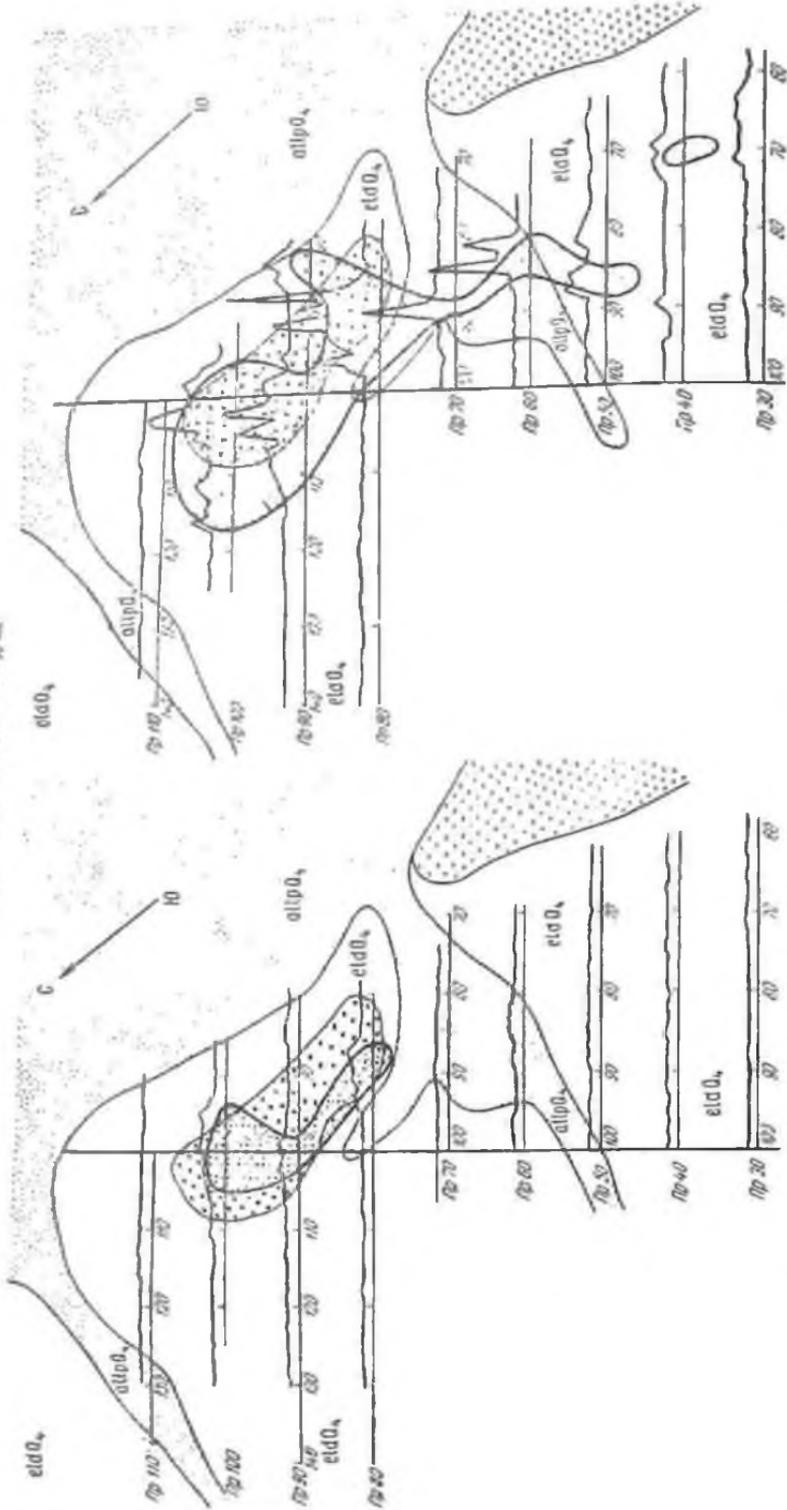
Под нормальным полем активности пород подразумевается наиболее часто встречающееся значение активности, определенное на участках с нормальным содержанием в этих породах радиоактивных элементов. Очевидно, что нормальное поле  $\gamma$ -активности пород будет обусловлено не только содержанием в этих породах урана и радия, но и тория и калия.

Нормальное поле активности коренных пород и рыхлых отложений очень важно изучать с первого дня полевых работ и непрерывно уточнять по мере получения новых данных. Нормальная активность определяется путем построения вариационных кривых или графиков накопленных частот (Разумовский, 1962).

В случае нормального закона распределения  $\gamma$ -активности нормальное поле можно также определить по величине медианы его распределения, т. е. по значению активности, находящемуся посредине последовательности, записанной в порядке возрастания ее значений.

При расчетах необходимо принимать во внимание различие показаний приборов в зависимости от телесного угла и, в частности, иметь в виду, что нормальные поля активности одних и тех же пород в горных выработках и скважинах существенно отличаются от значений нормальных полей, измеренных на поверхности или над плоскими объектами (обнажения и т. п.).

Геологический разрез по профилю А-Б  
 Геологический разрез по профилю В-Г



- аллюв. / 1
- песч. / 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8

Рис. 42. Сопоставление площади аномалии по данным поверхностной и шуровой (глубина 1 м)  $\gamma$ -съемки. 1 — аномалия, полученная по данным поверхностной  $\gamma$ -съемки; 2 — аномалия, полученная по данным шуровой  $\gamma$ -съемки; 3 — аномалия, полученная по данным шуровой  $\gamma$ -съемки с использованием коэффициента поправки; 4 — аномалия, полученная по данным шуровой  $\gamma$ -съемки с использованием коэффициента поправки; 5 — аномалия, полученная по данным шуровой  $\gamma$ -съемки с использованием коэффициента поправки; 6 — аномалия, полученная по данным шуровой  $\gamma$ -съемки с использованием коэффициента поправки; 7 — контур аномалии по данным шуровой  $\gamma$ -съемки; 8 — контур аномалии по данным шуровой  $\gamma$ -съемки; 9 — контур аномалии по данным шуровой  $\gamma$ -съемки.

Нормальная  $\gamma$ -активность пород обычно колеблется в пределах от нескольких микрорентген в час до 20 мкр/ч, редко достигая 30—50 мкр/ч. Наиболее низкие значения нормального поля среди осадочных пород фиксируются в пределах болотных отложений (до 5 мкр/ч), для каменной соли (до 3 мкр/ч) и карбонатных пород (до 10 мкр/ч). Минимальными значениями  $\gamma$ -активности среди изверженных пород характеризуются основные породы. Наибольшие значения нормального поля среди осадочных пород характерны обычно для глин (до 20 мкр/ч) и некоторых типов сланцев, а среди изверженных пород — для гранитоидов и пегматитов (до 50 мкр/ч).

Существенно отметить, что в общей величине нормальной  $\gamma$ -активности горных пород вклад  $\gamma$ -плучения урана и радия сравнительно невелик; большая часть (около 70%) нормальной  $\gamma$ -активности горных пород обусловлена содержанием в них тория и калия.

Очевидно, что величина нормального поля, выраженная в мкр/час, будет зависеть и от типа измерительного прибора. Особенно заметна эта зависимость при сопоставлении активностей по измерениям с радиометрами на газоразрядных счетчиках и на сцинтилляторах без дополнительных экранов в связи с различной их чувствительностью к  $\gamma$ -плучениям урана, тория и калия (см. гл. II).

Иногда нижний предел аномальной активности ( $I_a$ ) выражают величиной, кратной нормальному полю (например, за аномальную принимается активность, более чем в два раза превышающая значение нормального поля). Такой принцип подсчета не может считаться правильным, так как при этом не учитывается вариация в содержаниях радиоактивных элементов. Нижний предел аномальной радиоактивности следует оценивать по величине нормального поля с учетом колебаний этой величины. Если обозначить вариацию (среднее квадратичное отклонение) нормального поля через  $\sigma$ , то нижний предел аномальной активности в этом случае будет определяться по формуле

$$I_a = I_0 + b\sigma, \quad (26)$$

где  $I_0$  — нормальное поле активности породы;  
 $b$  — коэффициент, который в зависимости от требуемой надежности оценки может приниматься в интервале от 2 до 3. В практике  $\gamma$ -поисков коэффициент  $b$  принимается равным 3.

Изменения (вариации) нормального поля радиоактивности в связи с колебаниями содержаний радиоактивных элементов в рыхлых отложениях, перекрывающих рудные тела затрудняют выявление радиоактивных ореолов рассеяния

и тем самым снижают глубину пешеходных  $\gamma$ -поисков. Чем больше вариации активности в нормальном поле, тем труднее выделять участки со слабоаномальной активностью.

Необходимо заметить, что представление о глубинности  $\gamma$ -метода, основанное только на степени поглощения  $\gamma$ -лучей в перекрывающих рудные тела отложениях, не является правильным. Расчеты показывают, что даже в идеальном случае бесконечный пласт чистого урана при мощности перекрывающих его абсолютно нерадиоактивных отложений, равной 1 м, имеет мощность дозы  $\gamma$ -излучения на поверхности этих отложений, не превышающую 0,2 мкр/ч. Даже при отсутствии вариаций нормального поля радиоактивности прямая глубинность  $\gamma$ -метода не превышает 1 м, а глубинность  $\beta$ -метода 1—2 см. Фактически в связи с наличием в ваназах ореолов рассеяния глубинность  $\gamma$ - и ( $\gamma + \beta$ )-съемок может достигать 2—3 м и более.

### 3. АППАРАТУРА

При выборе типа радиометра для пешеходных  $\gamma$ -поисков учитывается соответствие его технико-эксплуатационных свойств поставленным задачам.

Высокая интегральная чувствительность сцинтилляметров к  $\gamma$ -излучению естественно радиоактивных элементов и особенно к мягкому  $\gamma$ -излучению является весьма ценным свойством для поисков урановых руд, так как  $\gamma$ -излучение ближайших продуктов распада урана ( $UX_1$  и  $UX_2$ ) характеризуется значительно меньшей энергией, чем  $\gamma$ -излучение продуктов распада радия и элементов ряда тория. Это особенно важно при поисках урана на участках смещения радиоактивного равновесия в сторону недостатка радия по отношению к урану. Поэтому в настоящее время пешеходные  $\gamma$ -поиски проводятся со сцинтилляционной аппаратурой.

Вместе с тем указанное свойство сцинтилляметров оказывается неблагоприятным в случае использования их для количественной оценки рудопроявлений ( $\gamma$ -опробование и т. п.) на месте залегания пород, вследствие трудноучитываемой зависимости результатов таких наблюдений от вещественного состава пород и геометрии измерений.

Для количественной оценки рудопроявлений при пешеходных  $\gamma$ -поисках используются радиометры на газоразрядных счетчиках или сцинтилляторы с дополнительным экраном, поглощающим мягкие  $\gamma$ -лучи.

Из сцинтилляционных радиометров лучшим для поисковых целей является радиометр СРП-2 («Кристалл»), который отличается надежностью в работе, портативностью, имеет большое время непрерывной работы с одним комплектом питания и, что особенно важно для поисков урана, обладает наиболее высокой чувствительностью к мягкому  $\gamma$ -излучению.

Для перевода показаний радиометров в микрорентгены в час приборы до начала работ и систематически в процессе поисков

эталонируются. При эталонировании радиометров важно устранять влияние рассеянного от поверхности эталонировочной площадки излучения. Это может быть осуществлено применением специальных экранов.

Для эталонирования радиометров выбирается площадка с минимальной активностью пород, размерами примерно  $10 \times 15$  м, свободная от посторонних предметов. На площадке на расстоянии 6—10 м закапываются два столба высотой 2 м\*, между которыми туго натягивается трос или провод. У верха одного из столбов прикрепляется доска, на которой устанавливаются и закрепляются экран и гильза радиометра.

Положение центра счетчика или кристалла строго фиксируется. От этого места с помощью меток отмечаются соответствующие расстояния по тросу. Расстояния счетчик — эталон ( $r$ ) выбираются в зависимости от чувствительности прибора, диапазона измерений и интенсивности источника излучения. Расчет указанных расстояний (в метрах) производится по формуле

$$r = \sqrt{\frac{840m}{I}}, \quad (27)$$

где  $m$  — количество радия в эталоне, мг;

$I$  — интенсивность излучения, мкр/ч.

Формула (27) справедлива для точечного источника. Это условие практически выполняется во всех случаях, когда расстояние от эталона до счетчика превышает размеры счетчика не менее чем в 2—3 раза.

Для эталонирования гильза радиометра с газоразрядным счетчиком устанавливается в вертикальном положении, так как в этом положении счетчик имеет меньшую чувствительность к  $\gamma$ -излучению пород, слагающих эталонировочную площадку. Гильза сцинтиллометра устанавливается в горизонтальном положении торцом по направлению к эталону. Под гильзу со сцинтиллометром подкладывается свинцовый экран толщиной 4—5 мм и площадью  $25 \times 5$  см, изогнутый в виде полуцилиндра; со стороны торца гильзы экран должен выступать в направлении эталона на 10—20 см.

При таком положении экрана рассеянное от земли  $\gamma$ -излучение эталона поглощается экраном и прибор фиксирует практически только прямое излучение от эталона.

Эталонирование радиометров проводится в следующей последовательности. Вначале измеряется на всех диапазонах фон при уда-

\* С уменьшением высоты подвеса гильзы и эталона увеличивается относительная величина рассеянного  $\gamma$ -излучения. Аналогичный эффект имеет место также с увеличением в определенных пределах расстояния между счетчиком и эталоном.

ленным эталоне \*. Затем в точке троса, расположенной на минимальном из выбранных для диапазона I расстоянии, подвешивается эталон и производится отсчет показаний прибора. После этого эталон приближается к счетчику на различные, заранее намеченные точки, и на каждой из них берется отсчет. По окончании эталонирования прибора на всех диапазонах, выполненного при приближении эталона к счетчику (прямой ход), производятся отсчеты показаний прибора в обратном порядке, т. е. при возрастании расстояний эталон — счетчик; в последнем случае число градуировочных точек

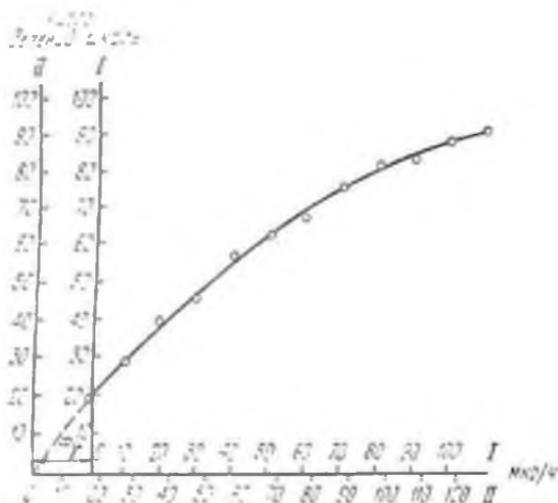


Рис. 43. Экстраполяция эталонировочной кривой к нулевому фону

I — шкалы координатных осей до экстраполяции; II — шкалы координатных осей после экстраполяции. Пунктиром проведена экстраполированная часть эталонировочной кривой

уменьшается в 2—3 раза. Затем вновь определяется фон пункта эталонирования \*\*.

В процессе эталонирования полезно строить кривую зависимости отсчетов по прибору от интенсивности излучения эталона. Это позволяет своевременно заметить и исправить пезакономерный ход эталонировочной кривой, обусловленный ошибками отсчета показаний прибора или установки эталона. Кривая, построенная подобным образом, для наиболее чувствительных диапазонов измерений должна быть затем перестроена (рис. 43). Так как отсчет показаний прибора обусловлен не только  $\gamma$ -излучением эталона ( $I_T$ ), но и фоном ( $\Phi$ ) пункта эталонирования, нуль абсциссы эталонировочной кривой смещается влево на величину  $\Phi_T$ . Величина  $\Phi_T$  определяется затем

\* Эталон удаляется от прибора на расстоянии не меньше  $30 \sqrt{m}$ . В этом случае дополнительный эффект от эталона окажется меньше  $1 \text{ мкр/ч}$ .

\*\* В процессе эталонирования радиометров (особенно сцинтилляметров) необходимо следить, чтобы до окончания эталонирования находящиеся на эталонировочной площадке предметы не перемещались.

путем экстраполяции (продолжения) начальной линейной части градуировочной кривой к оси абсцисс. Расстояние от точки пересечения экстраполированной части кривой с осью абсцисс до выбранного ранее начала координат, выраженное в масштабе оси абсцисс, равно искомому фону пункта эталонирования (в  $\text{мкр/ч}$ ). Точность экстраполяции зависит от линейности градуировочных кривых. Последние у сцинтилляметров на диапазонах I и II практически линейны. Градуировочные кривые радиометров на газоразрядных счетчиках несколько нелинейны. Точную экстраполяцию кривых к нулевому фону в этом случае можно осуществить аналитически, как это описано в работе Б. Я. Юфа (1958).

Сразу же после эталонирования прибора необходимо по возможности точнее определить интенсивность  $\gamma$ -излучения от рабочего эталона, который для этого прикладывается вплотную к определенному месту гильзы поблизи счетчика (люминофора). Место установки рабочего эталона должно быть четко намечено на гильзе (краской или иным способом). К каждому прибору типа СРП завод-изготовитель придает рабочий эталон, изготовленный из  $\text{Co}^{60}$ , нанесенного на диск. Рабочие эталоны можно изготовить из раздробленной и тщательно перемешанной радиоактивной руды, запаянной в металлическую ампулу\*.

Контроль чувствительности приборов с помощью рабочих эталонов рекомендуется проводить по двум точкам градуировочной кривой, показания радиометров в которых соответственно составляют около  $1/3$  и  $2/3$  их шкалы. Наиболее важно осуществлять контроль чувствительности на диапазоне I, более чувствительном, так как небольшие, но существенные изменения чувствительности на этом диапазоне могут остаться незамеченными при контроле на более грубых диапазонах.

Контроль чувствительности радиометра ведется систематически во все дни работы с прибором не менее трех раз в день: до начала и в конце работы, а также в середине рабочего дня. Кроме того, контроль чувствительности необходимо проводить перед ответственными измерениями (оценка обнаруженной аномалии и т. п.), а также в случае нестабильной работы прибора.

Во всех случаях перед отсчетом показаний прибора от рабочего эталона необходимо определить, а затем вычесть фон (в  $\text{мкр/ч}$ ) пункта контроля чувствительности. Этот пункт выбирается по возможности на участке с минимальной активностью пород. В случае, когда по данным контроля чувствительности будет установлено существенное ее изменение (более 10%), радиометр следует эталонировать заново.

\* После запайки активность рабочего эталона со временем увеличивается, поэтому необходимо до начала его использования выждать соответствующее время (не более месяца) для достижения радиоактивного равновесия между радием и радоном в эталоне.

Повторное эталонирование приборов обычно проводится независимо от результатов контроля чувствительности не реже одного раза в месяц.

#### 4. ВЫБОР МАСШТАБА СЪЕМКИ. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ С ДРУГИМИ ПОИСКОВЫМИ МЕТОДАМИ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

Оптимальный масштаб съемки определяется, как и в других методах поисково-разведочной геофизики, минимальной шириной и длиной (по пространству) поисковых объектов — радиоактивных ореолов рассеяния, развивающихся в пределах доступного для выбранного метода горизонта поисков, вокруг представляющих практический интерес рудных тел. При этом размеры ореолов выбираются в пределах контура уверенного выделения аномалии ( $I_a \geq I_{\phi} \pm 2\sigma$ ).

При выборе масштабов пешеходных  $\gamma$ -поисков учитывается степень изученности и перспективность поисковых площадей, а также тип ожидаемого оруденения.

Как показала практика работ, наиболее подходящими для выявления промышленных месторождений урана являются масштабы 1 : 25 000, 1 : 50 000. Поиски в масштабе 1 : 25 000 проводятся на выделенных предшествующими работами тектонических структурах или геологических формациях, в пределах которых в данном районе или в аналогичных условиях других районов установлены урановые рудопроявления.

Масштаб 1 : 50 000 может быть основным для выявления промышленных месторождений урана в районах развития пологопадающих осадочных и метаморфических толщ с весьма выдержанными по простиранию горизонтами. Поиски в масштабе 1 : 50 000 проводятся также для первоначального исследования малоизученных площадей, в пределах которых установлены прямые признаки рудоносности, однако, недостаточные для постановки более детальных поисков. На перспективных по геологическим данным участкам, обследованных ранее аэрогамма-поисками без положительных результатов, взаимные  $\gamma$ -поиски в масштабе 1 : 50 000 целесообразно ставить, если можно предполагать, что достоверность аэрогамма-поисков в связи с характером рельефа, степенью обнаженности района и характером процессов выщелачивания была недостаточной.

Поиски масштаба 1 : 10 000 следует вести на площадях, непосредственно прилегающих к месторождениям, или на участках между известными месторождениями или рудопроявлениями, приуроченными к определенной тектонической структуре или металлогенической зоне.

Работы в масштабе 1 : 5 000 и крупнее обычно проводятся на небольших площадях для детализации аномалий, обнаруженных при более мелкомасштабном исследовании.

Несмотря на высокую эффективность, пешеходные  $\gamma$ -поиски обычно не проводятся как самостоятельный вид работ без применения других и прежде всего геологических методов поисков. Практика показывает, что геологическая направленность радиометрической съемки имеет первостепенное значение при поисках.

Для более достоверного опознания участков, перекрытых рыхлыми отложениями, и прослеживания под ними выявленных аномалий в комплексе с пешеходными  $\gamma$ -поисками с поверхности часто проводятся другие виды радиометрических работ и, в частности, шпуровая и глубинная  $\gamma$ - и эмпацповная съемки.

Ограниченная глубинность  $\gamma$ -поисков часто вызывает необходимость применения таких геофизических методов, как электро-, магнито-, грави- и сейсморазведка. Эти методы применяются для выявления и прослеживания под более молодыми отложениями тектонических нарушений, русел древних потоков, депрессий и других рудоконтролирующих структур и благоприятных комплексов пород.

Наземные  $\gamma$ -поиски могут проводиться как специальными поисковыми партиями, так и отдельными отрядами, организационно входящими в состав поисково-разведочных партий. В составе поисковых партий могут быть предусмотрены специальные отряды по оценке аномалий. До выявления аномалий, требующих детальной оценки, эти отряды ведут обычные поисковые работы.

## 5. МЕТОДИКА ПЕШЕХОДНОЙ ГАММА-СЪЕМКИ

До начала планомерных поисков на выделенной площади проводится рекогносцировка, при которой уточняются мощность и характер рыхлых отложений, условия формирования в них ореолов рассеяния, нормальные значения радиоактивности отдельных типов пород, наличие явлений выщелачивания и другие данные, необходимые для выбора представительного горизонта и соответствующей модификации наземных  $\gamma$ -поисков. Большую помощь при выполнении этих работ может оказать геологическое дешифрирование аэрофотоматериалов. Для уточнения данных о мощности рыхлых отложений в отдельных пунктах иногда оказываются необходимым выполнение геофизических исследований (ВЭЗ и т. п.) или проходка горных выработок.

В результате рекогносцировочного обследования уточняется карта природных условий ведения поисков, намечаются направления поисковых маршрутов, выделяются наиболее перспективные по геологическим данным участки. Положение, направление и густота последующих маршрутов ежедневно корректируются геологом на основе своих наблюдений и результатов поисков, выполненных операторами.

Поисковые маршруты обычно направляются вкост простирания геологических структур или зон тектонических нарушений, контро...

рующихся оруденение. При разработке системы маршрутов в районах с резко расчлененным рельефом параллельно с простиранием пород или структур, контролирующих оруденение, учитывается направление гряды и основные формы рельефа.

Плотность точек наблюдений по маршруту зависит от масштаба поиска и сложности геологического строения участка. На участках простого геологического строения и при незначительных изменениях радиоактивности пород по маршруту расстояния между точками наблюдений для поисков масштабов 1 : 50 000 и 1 : 25 000 должны быть не более 40—50 м, а при поисках в масштабе 1 : 10 000 — 20 м. В пределах зон тектонических нарушений, на участках частой смены пород и при больших колебаниях их радиоактивности расстояния между точками наблюдений уменьшаются в два раза. Направление маршрутов при мелкомасштабных поисках в степных и низкорослых районах со слабо расчлененным рельефом задается по компасу, а расстояния между точками наблюдений определяется подсчетом числа шагов или на глаз, ориентируясь по карте, контактными отпечаткам аэрофотосъемки и местным ориентирам. Мелкомасштабные поиски в районах с резко расчлененным рельефом проводятся по сети криволинейных маршрутов, проходимых по наиболее обнаженным частям рельефа — водоразделам, тальвегам ручьев и т. д.

В этом случае привязка маршрута производится визуально по имеющимся ориентирам с использованием топопланшетов или отпечатков аэрофотосъемки; плотность сети наблюдений должна соответствовать принятому масштабу поисков. Крупномасштабные поиски (1 : 10 000 и крупнее) обычно проводятся по предварительно разбитой топографической сети на полуинструментальной основе.

Пешеходные уловки по маршрутам проводятся путем непрерывного прослушивания активности пород с помощью телефона радиометра и отчета активности по стрелочному индикатору в отдельных пунктах. При прослушивании активности пород оператор медленно передвигается (скорость не более 1—2 км/ч) по маршруту, держа гильзу радиометра на расстоянии 5—10 см от диевой поверхности. При измерениях активности гильза со счетчиком прикладывается вплотную к обследуемой поверхности; отчет активности по стрелочному индикатору производится после установки гильзы радиометра через интервал времени, превышающий удвоенную величину постоянной времени радиометра. Последняя для каждого прибора указывается в его паспорте. В полевой журнал записывается отчет, соответствующий положению, в котором стрелка индикатора устанавливается наиболее часто.

По маршруту и в полосе 50—100 м от него радиометром обследуются все доступные обнажения коренных пород, горные выработки или их отвалы, осыпи, свалы, крупные валуны и т. п. Обследуя обнажения и горные выработки, поисковик особенно тщательно и детально прослушивает и измеряет радиоактивность на тех участках пород, где имеются прямые или косвенные поисковые признаки урановой или другой рудной минерализации.

В процессе поисков урановых руд следует обращать также внимание на попутные поиски других полезных ископаемых, так как радиометрические методы могут оказать большую помощь в открытии рудопроявлений и месторождений некоторых редких и рассеянных элементов.

На участках, перекрытых чуждыми рыхлыми отложениями или элювиально-делювиальными образованиями большой мощности, ореолы рассеяния радиоактивных элементов оказываются погребенными или резко ослабленными и не фиксируются с поверхности радиометрическими методами.

Поиски в подобных условиях проводятся с помощью глубинной (шпуровой) съемки. Глубина съемки определяется глубиной залегания представительного горизонта. На участках развития аллохтонных отложений указанный горизонт, как правило, располагается ниже подошвы последних. Поэтому для обеспечения необходимой достоверности поисков в подобных условиях шпуров должны углубляться в коренные породы на 0,5—1,0 м.

На рис. 44 представлен вертикальный разрез одной из рудных зон уранового месторождения, перекрытого аллохтонными отложениями (суглинками) мощностью 2—5 м, с результатами глубинной и пешеходной (поверхностной)  $\gamma$ -сцинтилляционных съемок. Как видно на этом рисунке, глубинные радиометрические методы являются эффективным средством проведения поисков месторождений урана на закрытых площадях.

При неглубоком залегании представительного горизонта (0,5—1,0 м) шпуров ходятся вручную. Проходка более глубоких шпуров осуществляется с помощью специальных высокопроизводительных установок (виброагрегаты, автокраны, самоходные установки СУГП и др.).

Для проведения  $\gamma$ -измерений в шпурах наиболее пригодны каротажный и шпуровой варианты сцинтилляционного радиометра СРП-2 (СРП-2к и ШГ-25), у которых диаметры гильз соответственно равны 34 и 26 мм. Высокая чувствительность этого прибора дает возможность дифференцировать породы даже при нормальном содержании в них радиоактивных элементов.

Измерения  $\gamma$ -активности в шпурах производятся через 1 м, начиная с поверхности, что позволяет определить характер изменения  $\gamma$ -поля с глубиной. В интервалах между точками измерений величина  $\gamma$ -активности оценивается прослушиванием. В последние годы для производства глубинных радиометрических поисков применяются самоходные гидравлические погружатели СУГП-10, обеспечивающие проходку шпуров глубиной до 25 м с одновременным автоматическим  $\gamma$ -каротажем, отбор металлотрических, газовых или водных проб.

По результатам поисков ведется первичная и отчетная документация. К первичной документации относятся полевой журнал и радиометрическая карта фактического материала, а к отчетной — сводная радиометрическая карта района работ и кадастр аномалий. 4

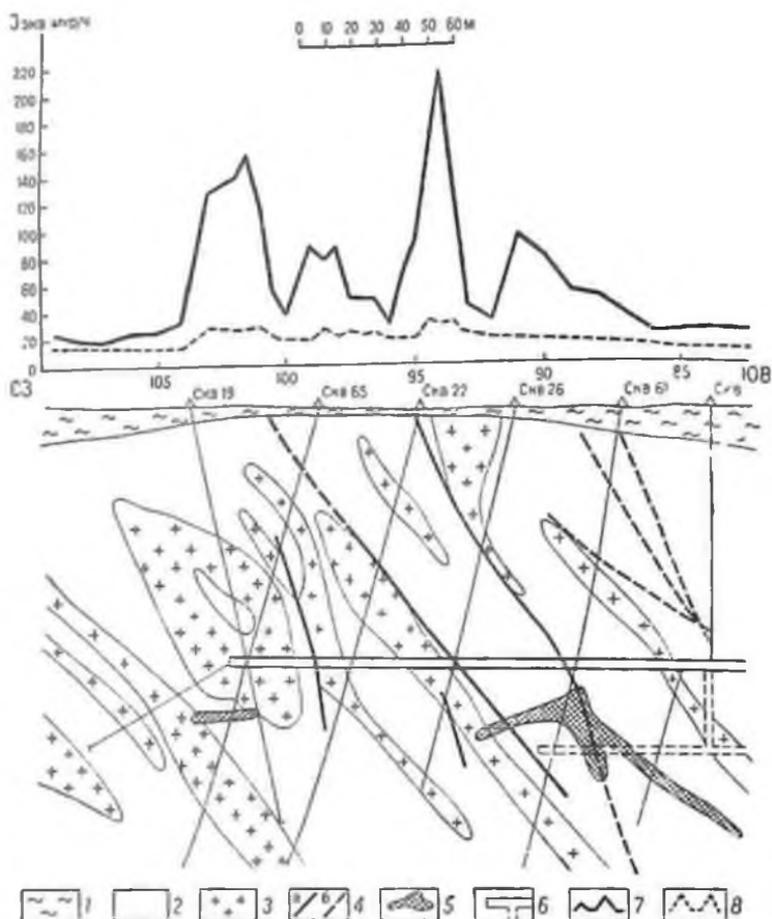


Рис. 44. Вертикальный разрез рудной зоны уранового месторождения с результатами глубинной и пешеходной  $\gamma$ -сцинтилляционных съемок

1 — третичные нестроцветные глины; 2 — алваролиты; 3 — длюритовые порфириты; 4 — тектонические нарушения (а — проследки, б — предпологаемые); 5 — рудные тела; 6 — подземные горные выработки; 7 — графики  $\gamma$ -активности по замерам на забое шурфов (глубина 3—5 м, прибор СРП-2к); 8 — графики  $\gamma$ -активности по замерам на поверхности (прибор СРП-2)

Первичная обработка полевых материалов, выполняемая обычно в маршруте, заключается в переводе показаний радиометра в  $\text{мкр/ч}$  с помощью эталонировочной кривой или предварительно составленной таблицы для перевода. При этом необходимо из отчета по прибору, переведенного в  $\text{мкр/ч}$ , вычесть соответствующий фон в  $\text{мкр/ч}$ . Величина последнего зависит от вида съемки и типа используемого радиометра (см. гл. II, раздел 6).\*

При обработке результатов  $\gamma$ -съемки, проводимой с дневной поверхности, из показаний радиометров вычитается сумма космического и остаточного фона, а при шпуровой съемке вычитается только остаточный фон. Величиной космического фона в этом случае практически можно пренебречь.

Результаты пешеходной  $\gamma$ -съемки ежедневно наносятся на радиометрическую карту фактического материала, выполненную на геологической основе. На эту же карту наносятся все обследованные обнажения, горные выработки и водопункты с указанием их радиоактивности.

Сводная радиометрическая карта района работ также составляется на геологической основе. На эту карту наносятся все результаты выполненных партией поисковых работ в обследованном районе, причем аномалии и рудопроявления выделяются особыми условными знаками. Кроме того, наносятся контуры проектных и фактически опоскованных площадей (по методам и масштабам) и выделяются участки, недоступные для поисков или недостаточно надежно опоскованные вследствие неблагоприятных природных условий (большая мощность наносов, резкое нарушение равновесия в сторону недостатка радия и т. п.).

С целью проверки качества работ систематически проводятся выборочные контрольно-радиометрические маршруты, в первую очередь на перспективных, по геологическим данным, площадях, в пределах которых не выявлено аномалий. По маршрутам, первичные результаты поисков на которых вызывают сомнения (неустойчивая работа аппаратуры и т. п.), проводятся повторные измерения.

Оценка выявленных аномалий является завершающим этапом наземных  $\gamma$ -поисков, без методически правильного проведения которого непостижима высокая эффективность работ в целом.

Известно, что из многих тысяч аномалий, выявляемых в процессе наземных радиометрических съемок, лишь десятки связаны с перспективными рудопроявлениями, из которых впоследствии оказываются промышленными месторождениями урана только единицы. Проверка всех, особенно глубинных  $\gamma$ -аномалий горными выработками и буровыми скважинами была бы сопряжена с большими затратами труда, средств и времени. Поэтому до постановки тяжелых горно-буровых

\* В случае одинаковых условий съемки, учет фона целесообразно производить один раз (графическим путем) при построении эталонировочной кривой.

работ в пределах выявленных аномальных участков выполняется комплекс работ по предварительной разведке и оценке перспективности аномалий. В процессе этих работ отбраковываются и исключаются из дальнейшего рассмотрения аномалии, связанные с повышенным местным радиоактивным фоном отдельных разностей пород (породные аномалии), а также аномалии, вызванные вторичными промышленными аккумуляциями радиоактивных элементов (современными и древними). Из числа аномалий, связанных с урановыми скоплениями вызванными процессами рудной минерализации, в ходе дальнейших более углубленных оценочных работ выделяются наиболее перспективные рудопроявления для вскрытия бурением и горными выработками.

Более детальная оценочная классификация выявляемых радиометрических аномалий должна специально разрабатываться для каждого конкретного рудного поля с учетом решаемых задач, геолого-геохимической обстановки, известных или ожидаемых типов урановых месторождений, методических и технических возможностей ведения поисков. Рабочую основу такой классификации должны составлять оценочные критерии, специально установленные в результате тщательного анализа всего геолого-геофизического и геохимического материала. Последние могут быть подразделены на три большие группы:

- а) общегеологические критерии (литолого-фациальный, магматический и структурный контроль промышленного оруденения);
- б) минералого-геохимические критерии (минералы урана, минералы и элементы-спутники уранового оруденения, околорудные изменения и т. д.);
- в) геофизические критерии (морфология ореолов рассеяния, их интенсивность, природа радиоактивности, радиоактивное равновесие, запас урана в ореоле на 1 м глубины и т. д.).

Для надежной оценки аномалий применяется широкий комплекс общегеологических, геофизических, радиометрических и геохимических исследований.

Оценочные работы начинаются с детализации выявленных  $\gamma$ -аномалий непосредственно в процессе съемки. Сразу же после обнаружения и подтверждения достоверности аномальной активности производится оконтуривание аномальной зоны с помощью непрерывного прослушивания и измерений активности в отдельных пунктах на промежуточных профилях, прокладываемых (на этом этапе) глазомерно, с выходом на каждый профиль в нормальное  $\gamma$ -поле не менее чем на 100—200 м. В процессе предварительной детализации радиометрически обследуются также все обнажения, расположенные вблизи аномальных зон.

Если аномалия установлена в таких перемещенных отложениях, как свалы, осыпи, валуны и т. д., то профили предварительной детализации располагаются выше по склону или руслам ручьев с учетом возможного направления сноса обломков от рудного тела. В результате предварительной детализации должно быть получено общее пред-

ставление о морфологии, размерах и интенсивности выявленных ореолов рассеяния.

В нескольких точках с максимальной радиоактивностью производится определение природы активного начала с помощью эманометров или радиометров-анализаторов.

На участке детализации отбираются образцы пород, в первую очередь с мест максимальной активности, а также с участков, где радиоактивность пород существенно превышает нормальную для данного района. Все отобранные образцы подвергаются радиометрическому анализу на содержание радиоактивных элементов.

При интерпретации результатов шпуровой и глубиной съемок необходимо обратить внимание на характер изменения интенсивности  $\gamma$ -излучения с глубиной. Закономерное возрастание с глубиной величины  $\gamma$ -активности по ряду соседних шпуров и скважин является одним из признаков перспективности аномалии, помогает локализовать переход ореола в коренные породы и, таким образом, уточнить точки заложения проверочных горных выработок. II, наоборот, «зависающие» на определенных горизонтах локальные аномалии, исчезающие с глубиной, свидетельствуют о вторично перетолженном характере скоплений радиоактивных элементов, не представляющих прямого практического интереса.

По мере производства предварительной детализации составляется схема детализации, на которую вносятся результаты измерений в виде графиков  $\gamma$ -активности по профилям, данные определений природы активности аномалий и места отбора образцов.

Максимумы аномалий и места отбора наиболее интересных образцов надежно закрепляются на местности путем установки заметных ориентиров (вехи, каменные туры и т. в.), а также привязываются по долговременным местным ориентирам к топографической карте с указанием элементов привязки на абрисе в поленом журнале.

На этапе предварительной детализации важно собрать максимум данных, характеризующих перспективы ураноносности района аномалии. Если в пределах аномальной зоны развиты рыхлые отложения, следует провести  $\gamma$ -шпуровую или эманационную (радоновоторовую) съемку. Последняя позволит получить дополнительные данные о природе активности и возможных масштабах оруденения. Методически правильное проведение предварительных детализационных работ, своевременная обработка и анализ полученного материала в тесной увязке с геологическими сведениями позволят уже на первом этапе оценки отбраковать большинство бесперспективных породных аномалий и участков вторичных приповерхностных аккумуляций урана и радия.

Если анализ результатов предварительной детализации показал, что аномалия может быть отнесена к числу перспективных, то все материалы по данной аномалии передаются специальному отряду, который должен провести детальную проверку с применением горных и буровых работ.

До начала второго этапа детализации проводится предварительное обследование участка аномалии и прилегающей к нему площади, в процессе которого уточняется геологическое строение участка и выявляются другие важные детали (приуроченность аномальных зон к определенным типам пород или геологическим структурам, мощность и состав рыхлых образований, геоморфологические особенности и т. п.), на основе которых окончательно решается вопрос о необходимости детальной проверки аномалий и намечается методика дальнейшей детализации.

Сеть наблюдений для детализации разбивается на полуструктуральной основе. Детализация проводится в масштабе 1 : 5000 в крупнее, в зависимости от размеров аномальных зон и характера изменчивости  $\gamma$ -поля на участке аномалии. В пределах участков резкого изменения поля детализация ведется в более крупном масштабе.

Вначале на участке детализации проводятся геологическая и  $\gamma$ -съемки. В процессе этих съемок все имеющиеся на участке обнажения подвергаются одновременной геологической и радиометрической документации.

Точки наблюдений располагаются не только по намеченной сети, но по мере необходимости и на промежуточных интервалах, положение которых уточняется в процессе работ. Расстояния между точками наблюдений определяются степенью сложности  $\gamma$ -поля и геологического строения участка. Плотность точек наблюдений должна быть достаточной для четкого оконтуривания отдельных аномальных зон (от 10 до 5—2 м).

При проведении геологической и радиометрической детализации породы и структуры, контролирующие оруденение, а также вмещающие породы, должны получить наиболее полную геологическую и радиометрическую характеристику.

В местах, где аномальные зоны уходят под рыхлые отложения небольшой мощности (1—2 м), ставится шуровая радиометрическая съемка. В пределах аномальных участков отбираются металлотрические пробы на урв и элементы-спутники с целью получения дополнительных данных для оценки перспективности аномалий. Металлотрическому опробованию подвергаются также пройденные на участке аномалии поверхностные горные выработки (канавы, мелкие шурфы).

Глубокие шурфы и буровые скважины для вскрытия и опробования обнаруженных рудопроявлений в коренном залегании проходятся после всестороннего анализа результатов по всем видам работ, выполненным с поверхности. В целях оперативного проведения работ первые проверочные выработки могут быть заданы до получения всех результатов лабораторных анализов.

Все горные выработки подвергаются геологической и радиометрической документации в масштабе 1 : 100, а на аномальных зонах — в масштабе 1 : 50. При геологической документации наиболее детально описываются породы и структуры с аномальной активностью, а также контролирующие и вмещающие оруденение. Радиометриче-

ская документация выработок выполняется путем сплошного прослушивания всей площади выработок и детальных измерений активности по определенной сети. При радиометрической документации выработок с аномальной активностью следует использовать щелевые (цилиндрические) свинцовые экраны.

Установленные по данным геолого-радиометрической документации аномальные зоны в горных выработках (и на обнажениях) необходимо опробовать. Отбор проб сопровождается радиометрическим контролем активности опробуемых интервалов на месте залегания пород и материала проб.

Опробование производится, как правило, борзодовым методом, а при особо благоприятных условиях (уровень равновесия с радием, торий содержится в концентрациях, близких к кларковым и т. п.) — методом  $\gamma$ -опробования\*. Борзоды располагаются по направлению максимальной изменчивости активности пород. Длина секций и их сечение при борзодовом опробовании устанавливаются исходя из характера распределения радиоактивности и изменчивости литологического состава опробуемых пород. Необходимо стремиться к тому, чтобы в одну секцию входили участки одних и тех же пород, мало отличающихся по радиоактивности. Сечение борзоды принимается в зависимости от степени равномерности оруденения от  $5 \times 3$  до  $10 \times 3$  см.

При равномерном распределении активности в породах одного состава длина секции может достигать 1 м, в случае резко неравномерного распределения секция не должна превышать 0,25 м. На маломощных (менее 10 см) прожилках после отбора образца с места максимальной активности отбирается задиrkовая проба.

В горных выработках и на естественных выходах пород с аномальной радиоактивностью отбираются также и образцы для последующих специальных исследований (минералогический анализ, радиография, шлифы и ацшлифы и т. п.). Отбор образцов, как и в случае отбора проб, сопровождается радиометрическим контролем места отбора и отобранного материала.

Пробы после обработки (дробление до 0,5 мм, квартование) передаются на радиометрический анализ в полевую лабораторию. До получения результатов лабораторных анализов отобранных проб каналы не должны засыпаться.

Первичная документация по результатам детальных работ включает в себя полевую журнал измерений, карты графиков  $\gamma$ - и эманационного полей, карты изогамм и изозаман.

К отчетной документации относится схематическая геологическая карта аномального участка в масштабе не мельче 1 : 10 000 с данными радиометрических наблюдений. Карты графиков  $\gamma$ - и эманационного полей составляются на геологической основе или на накладке-

\* См. гл. X, раздел Б.

восковке к ней. На эти карты напоятся все пройденные горные выработки с результатами их опробования.

В заболоченных районах методика непеходных  $\gamma$ -поисков отличается некоторыми особенностями, пока еще недостаточно освещенными в литературе по поискам урана.

Вторичные концентрации урана обнаруживаются как в краевых, так и в центральных частях болот. В краевых частях заболоченных участков уран фиксируется обычно при склоновом питании болот, в других частях в связи с выносом урана напорными подами. Глубинность метода поисков урана по вторичным его концентрациям в болотных отложениях в связи с этим практически мало зависит от мощности отложений, перекрывающих рудные тела. Характерно, что в болотных отложениях уран редко находится в равновесии с радием. Наиболее часто болотные отложения содержат уран практически без радия, реже — радий без урана.

Эта особенность определяет необходимость применения для поисков на заболоченных площадях таких методов, которые обеспечивали бы возможность обнаружения как урана, так и радия. Такому требованию из числа известных методов более других отвечает  $\beta$ - $\gamma$ -метод или  $\gamma$ -метод при использовании сантиметровых типа СРП-2. Нормальное поле  $\beta$ -активности болотных отложений составляет 2—5 экв. мкр/ч. Для выявления аномалий около 5—10 экв. мкр/ч используются радиометры с порогом чувствительности приблизительно 1—2 экв. мкр/ч.

Часто максимальные концентрации урана приурочиваются не к верхним, а к нижним или средним частям торфяной залежи, вследствие чего поиски необходимо вести с применением шпуров, а на особенно перспективных участках — с применением мелкого (ручного) бурения и с последующим опробованием керна на всю мощность торфяной залежи.

Максимальные концентрации урана в болотных отложениях при склоновом питании болот обычно приурочиваются к их периферической части со смещением максимума концентрации от края болот по направлению движения потока на 5—15 м, что обусловлено быстрым осаждением урана из вод в благоприятной гидрохимической обстановке. Эта особенность распределения урана вызывает необходимость детального опоскования периферических частей болот.

Направление профилей намечается не только с учетом наиболее вероятного простирания рудных тел, но и направления движения подземных вод, питающих болота, и выбирается на основе реконструктивного изучения геологической и гидрогеологической обстановки, а также геоморфологических особенностей района работ.

Масштаб поисков в зависимости от перспективности района принимается от 1 : 50 000 до 1 : 10 000. Более детальные поиски ведутся в пределах участков с установленными аномальными зонами.

При обнаружении повышенной активности производится предварительная детализация аномального участка, после которой решается

вопрос о дальнейшем направлении и объемах работ на участке аномалий.

Дальнейшая детализация на участке проводится в зависимости от размеров аномальной зоны в масштабе не мельче 1 : 10 000 и имеет задачей изучение распределения урана и радия как на поверхности, так и на глубину не менее чем до 1 м. Детализация проводится с обязательным выходом в нормальное поле не менее чем на 100—200 м.

На втором этапе детализации аномалий производится отбор проб болотных отложений, донных осадков и воды из всех источников, а также по определенной сети из вод, насыщающих болота. Пробы воды отбираются для анализа на уран, радон, желательны и на радий, а также для сокращенного гидрохимического анализа.

Если результаты детализации с поверхности показали, что участок заслуживает внимания, дальнейшее изучение его производится с помощью бурения и горных работ с целью локализации источников урана в коренном залегании.

Если получены данные, указывающие на склоновый характер вытаяния болот, то на участке склона, прилегающем к аномалии, в зависимости от степени обнаженности склона ставится  $\gamma$ - или эмавационная съемка с задачей обнаружения урана и радия в выходах коренных пород или ореолов радия и радона в почвенном слое. У оснований склонов по направлению потоков проходятся мелкие шурфы и каналы с целью вскрытия активных пород или мест разгрузки урановосных подземных вод.

Следует обращать внимание на взаимоотношение в пространстве аномальных зон с определенными типами пород или структур. Так, может оказаться, что урановосные торфяники закономерно вытягиваются в направлении, согласующемся с направлением зон тектопических нарушений, или приурочены к определенным типам пород.

В заключение отметим, что эффективность пешеходных  $\gamma$ -поисков можно повысить путем разработки и применения более совершенной переносной спектрометрической аппаратуры с автоматической записью наблюдений, позволяющей непосредственно на месте залегания пород определять содержание в них урана, тория и калия.

Одновременно необходимо дальнейшее развитие теории метода в направлении учета реальных геометрических условий измерений, более точного определения нормального и аномального поля пород и способов выделения слабых аномалий, например, на основе теории информации (Тархов, Сидоров, 1960).

Важной практической задачей является также разработка и широкое внедрение самоходных буровых установок с высокой проходимостью и производительностью для проведения наземных  $\gamma$ -поисков в закрытых районах.

## ЭМАНАЦИОННАЯ СЪЕМКА

Поиски радиоактивных руд методом эманационной съемки основаны на исследовании распределения радиоактивных эманаций в рыхлых отложениях путем отбора и анализа проб подпочвенного воздуха.

В зависимости от глубины отбора проб различают два вида эманационных съемок: 1) обычная эманационная съемка с отбором проб из бурок глубиной 0,8—1,0 м, проходимых вручную или с применением механизированных средств и 2) глубинная эманационная съемка с отбором проб из шпуров глубиной от 1,5 до 10 м и более, проходимых с помощью самоходных буровых установок (автокраны, вибробуры, СУГП-10 и т. п.).

### 1. ЭМАНИРОВАНИЕ ПОРОД И МИГРАЦИЯ ЭМАНАЦИЙ В ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ

Радиоактивные эманации — радон, торон и актинон — образуются при распаде радия и его изотопов ThX и AcX. Являясь по своей природе инертными газами, радиоактивные эманации по мере распада материнских элементов накапливаются в порах и трещинах горных пород и распространяются в различных направлениях от эманлирующего объекта, образуя радиоактивные газовые ореолы рассеяния. Выделение образующихся эманаций в поры и трещины горных пород и руд называется эманацией.

Интенси́вность эманирования горных пород и минералов характеризуется коэффициентом эманирования, т. е. отношением количества эманации, выделившейся за некоторый промежуток времени из эманлирующего тела, ко всему количеству эманации, образовавшейся в нем за тот же промежуток времени. Эманирование горных пород характеризуется также их эманлирующей способностью, под которой понимается количество эманаций, выделяемое 1 г породы за время, достаточное для установления радиоактивного равновесия между эманацией и ее материнским элементом (Баранов, 1956; Граммаков, 1957).

Эманирование пород зависит от плотности слагающих их минералов, их структуры, сохранности кристаллической решетки, формы нахождения материнских радиоактивных элементов, температуры, влажности и т. п. При одних и тех же условиях более плотные минералы и породы обладают меньшими коэффициентами эманирования. Вторичные минералы урана цеолитового характера (торбернит, отенит, тюамунит и т. д.) при прочих равных условиях имеют более высокий коэффициент эманирования, чем первичные. В целом можно утверждать, что всякое разрушение кристаллической решетки минералов приводит к увеличению их эманлирующей способности. Наибольшие величины коэффициентов эманирования (до 95—98%)

характерны для сильно разрушенных пород, чем, в частности, объясняется формирование газовых ореолов, приуроченных к тектонически ослабленным зонам. По этой же причине почвы обладают в среднем более высокими коэффициентами эманирования (от 15 до 100%), чем коренные неразрушенные породы (от 3 до 10—20%).

В процессе миграции эманаций существенное значение имеют диффузия, перенос в водной фазе и конвекционный перенос. Основным механизмом распространения эманаций является диффузия, при которой движение происходит в направлении уменьшения концентрации. В приповерхностном слое рыхлых отложений диффузия осложнена конвекционным переносом эманации в вертикальном направлении под влиянием метеорологических факторов, главными из которых являются изменение атмосферного давления, промерзание почвы и выпадение осадков (Булашевич, 1947; Граммаков и Повретинский, 1957; Повретинский, 1961).

Миграция радона под влиянием диффузии и конвекции происходит на расстоянии от 1—2 до 8—10 м, в зависимости от характера горных пород и рыхлых отложений. Следствием обоих этих процессов является эксгаляция, т. е. поступление радиоактивных эманаций из почвы в атмосферу. Существенное значение в механизме переноса эманации играет ее миграция в природных водах.

Радон хорошо растворяется и переносится подземными водами: коэффициент растворимости радона в воде для температуры 5° С составляет 0,42. Образование природных вод с повышенной концентрацией радона в основном обуславливается концентрацией радия в породах, омываемых водами, коэффициентом эманирования пород и временем соприкосновения воды с породой. Миграция радона

Таблица 8

Основные свойства радиоактивных эманаций

Эманация	Постоянный распад	Время практически полного распада	Миграция в газовой фазе	Миграция в природных водах	Нормальное содержание в почвенном воздухе, аман	Аномальные содержания в почвенном воздухе, аман
Радон	0,1812 дп. <sup>-1</sup>	38 дней	От нескольких сантиметров до 8—10 м	До сотен метров	От единиц до десятков	От $n \cdot 10^1$ до $n \cdot 10^3$
Торон	0,0127 сек. <sup>-1</sup>	9 мин	От нескольких до десятков миллиметров	До нескольких метров	То же	То же
Активный	0,1767 сек. <sup>-1</sup>	38 сек	От 0,01 м до нескольких сантиметров	Десятки сантиметров	0,1—2,0	Единицы, редко более 10

в грунтовых водах может привести к его переносу на десятки и сотни метров от амапирующего объекта.

В связи с малым периодом полураспада торопа ( $T = 54,3$  сек) его перенос от амапирующего объекта незначителен и, как правило, не превышает первых десятков сантиметров. Вместе с тем тороп может образовывать значительные концентрации в почвенном воздухе даже при отсутствии объектов с высокими концентрациями торпеносных минералов. Концентрация торопа в верхней обогащенной торпеносными минералами части разреза рыхлых отложений может в несколько раз превышать концентрацию радона.

Краткие сведения об основных свойствах радиоактивных эманаций, определяющих возможности эманационного метода, сведены в табл. 8.

## 2. АППАРАТУРА И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Для измерения концентрации эманации в газовых пробах в настоящее время применяются ионизационные эманометры СГ-11 (Мусиченко и Холмил, 1951), ЭМ-2 и сцинтилляционные эманометры ЭМ-6 (Ленин, 1961).

Определение концентрации эманации ионизационными эманометрами основано на измерении ионизационного тока, создаваемого в камере эманометра  $\alpha$ -частицами эманации при ее распаде. При определении концентрации эманации сцинтилляционными эманометрами измеряется скорость счета сцинтилляций, возникающих под воздействием  $\alpha$ -частиц эманации на поверхности чувствительного слоя, нанесенного на стенки эманационной камеры.

Основные технические характеристики эманометров приведены в табл. 9.

Наиболее часто при проведении эманационной съемки применяется эманометр СГ-11. Хорошие эксплуатационные качества прибора и высокая чувствительность, составляющая  $0,3-0,4$  эман на дел/мин при стандартной настройке электрометра ( $20$  дел/в), обусловили его широкое использование в практике геологоразведочных работ. Недостатками прибора являются его большой вес и невозможность работы в сырую и тем более дождливую погоду из-за утечек тока через ятарные изоляторы.

Эманометр ЭМ-2 — портативный прибор, который может быть с успехом применен в труднодоступных районах в тех случаях, когда измерения не требуют высокой точности.

Наиболее универсален сцинтилляционный эманометр ЭМ-6. Его сравнительно небольшой вес, возможность отсчета в эманах непосредственно по шкале прибора и высокая чувствительность позволяют использовать прибор при проведении эманационной съемки в любых районах.

Измеряемая концентрация радона выражается в эманах. Концентрация торопа выражается в эквивалентных эманах. Под эквивалент-

## Технические характеристики эманометров

Наименование эманометров	Вес рабочего комплекта, кг	Рабочий интервал температур, °С		Способ регистрации	Постоянная времени, сек	Цифровая камера	Цена деления прибора	Верхний предел измерений, эманы на диапазонах			Применяемые батареи, элементы		
		от	до					I	II	III	тип	к-во	продолжительность работы
СГ-11	10	-20	+50	Электрометр	—	Пошаговая, емкость 0,5 А	0,3—0,4 эманы на дел/мин	Пескостык тысяч	—	48-ПМЦГ-04 1,6-ФМЦГ-У32	6 1	Не менее 6 мес. (определяется временем саморазряда)	
ЭМ-2	5,5—6	-20	+50	Статический вольтметр	—	Индикационная, емкость 1 А	1—2 эманы на дел/мин						Несколько сотен
ЭМ-6	5,9	-20	+50	Микроамперметр, телефон	4,5	Сцинтилляционная (ЗС), емкость 0,5 А	1 эманы/дел 5 эманы/дел 25 эманы/дел	50	250	11,5-ПМЦГ-1,3 48-ПМЦГ-04	2 1	Не менее 80 ч	

ным эмалом повышается активность, создаваемая в эманационной камере любым радиоактивным веществом, равная по измеряемому эффекту одному эману радона (без продуктов распада), находящегося в камере. Для перевода показаний эмалометров в эмалы приборы перед началом полевых работ эталонируются жидкими эталонами с содержанием радия  $n \cdot 10^{-8} - n \cdot 10^{-9}$  г.

При эталонировании в эманационную камеру вводится известное количество радона, накопившееся в барбатере с раствором радия. Измеряется ионизационный ток, выражаемый в делениях в минуту (для СР-11 и ЭМ-2), либо частота сцинтилляций в делениях шкалы (для прибора ЭМ-6). По известной величине ионизационного тока (или по частоте сцинтилляций) рассчитывается коэффициент эталонирования прибора.

Эталонирование эмалометров производится вакуумным или циркуляционным способами. Более прост и надежен вакуумный способ,

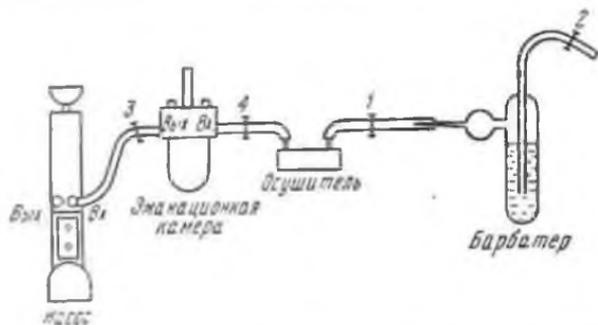


Рис. 45. Схема эталонирования эмалометров вакуумным методом

при котором введение радона в камеру осуществляется за счет вакуума, создаваемого в камере эмалометра с помощью насоса (описание и инструкция по работе с эмалометрами прилагаются к приборам).

Перед эталонированием эмалометров вакуумным способом производится тщательная проверка герметичности эманационных камер. С этой целью краники камер перекрываются и из камер откачивается воздух. Герметичность камеры считается удовлетворительной, если при открывании краника через 2—3 мин после откачивания раздается характерный свист входящего в камеру воздуха.

После проверки герметичности производится откачивание воздуха из камер. Зажимы 1 и 2 (рис. 45) при этом перекрываются, а зажимы 3 и 4 отпущены. По окончании откачивания воздуха зажим 3 перекрывается, а зажим 1 отпускается. Постепенно приоткрывается зажим 2, и через барбатор с раствором радия продувается струя воздуха, интенсивность которой регулируется зажимом 2 таким образом, чтобы она соответствовала выделению 100—150 пузырьков в 1 мин, что обеспечивает устранение разбрызгивания и потерь раствора в соединительных шлангах и осушителе. После окончания продува-

ния зажим 4 перекрывается и производится измерение ионизационного тока (эманометры СГ-11, ЭМ-2) или частоты сцинтилляций (ЭМ-6) через 3 ч после введения радона в камеру (4—5 отсчетов).

Вычисление коэффициентов эталонирования  $j$  производится по формулам

для эманометров ЭМ-6

$$j = \frac{3,0 \cdot a_0 (1 - e^{-\lambda t}) \cdot 10^{10}}{(i - i_\phi) \cdot V_k} \frac{\text{эман}}{\text{дел}}; \quad (28)$$

для эманометров СГ-11 и ЭМ-2

$$j = \frac{1,96 \cdot a_0 (1 - e^{-\lambda t}) \cdot 10^{10}}{(i - i_\phi) \cdot V_k} \frac{\text{эман}}{\text{дел/мин}}, \quad (29)$$

- где  $a_0$  — количество радия в эталонном растворе (указывается в паспорте эталона);  
 $e$  — основание натуральных логарифмов;  
 $\lambda$  — постоянная распада радона;  
 $t$  — время накопления радона в эталоне;  
 $V_k$  — объем эманационной камеры, л;  
 $i$  — средняя величина ионизационного тока, дел/мин (ЭМ-2, СГ-11) или средний отсчет в делениях (ЭМ-6);  
 $i_\phi$  — величина натурального фона прибора, дел/мин (ЭМ-2, СГ-11) или деления шкалы (ЭМ-6). При компенсации натурального фона в эманометрах СГ-11  $i_\phi = 0$ .  
 1,96 и 3,0 — коэффициенты нарастания отсчетов, обусловленного накоплением в камере прибора дочерних продуктов распада при трехчасовой экспозиции.

По окончании эталонирования барбатов с эталоном радия продувается атмосферным воздухом и запаивается. Время запайки записывается в паспорте эталона. Сразу же после окончания эталонирования производится калибровочное измерение со стандартным эталоном  $\gamma$ -излучения, помещаемым на заранее отмеченное место эманационной камеры прибора ЭМ-2 (корпуса эманометра СГ-11), или с контрольными препаратами  $\alpha$ -излучения (ЭМ-6) (Мусиченко, Холмин, 1951; Новиков, 1960).

В процессе эманационной съемки аналогичные измерения производятся ежедневно (в начале и по окончании рабочего дня) и служат показателем надежности работы аппаратуры. При расхождении более чем на  $\pm 10\%$  от показаний, полученных непосредственно после эталонирования, производится необходимая настройка и повторная градуировка эманометров. Новые значения коэффициентов эталонирования могут быть получены из соотношения:

$$j = j_0 \frac{i_0}{i}, \quad (30)$$

где  $j$  — коэффициент эталонирования эманометра при изменившейся настройке;

$j_0$  — коэффициент эталонирования, полученный при эталонировании жидким радиевым эталоном;

- $i$  — ионизационный ток (частота сцинтилляций) от эталона излучения (контрольного препарата) при новой настройке эманометра;
- $i_0$  — ионизационный ток (частота сцинтилляций) при контроле, произведенном после эталонирования жидким эталонным радия.

Вспомогательное оборудование, применяемое при проведении эманационной съемки, включает конические пробоотборники, осушители, необходимое количество соединительных резиновых шлангов, а также средства проходки шпуров — буры из буровой стали, воротки для их извлечения, кувалды и т. п. При использовании механических средств проходки шпуров перед началом полевого сезона производится подготовка к работе соответствующих агрегатов (автокраны, вибробуры, СУП-10 и т. п.).

### 3. ОСОБЕННОСТИ И УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ЭМАНАЦИОННОГО МЕТОДА. МАСШТАБЫ ЭМАНАЦИОННЫХ СЪЕМОК

Размеры эманационных ореолов зависят главным образом от размеров и условий залегания механических и солевых гипергенных ореолов рассеяния урановых рудных тел, являющихся источниками эманации, а также от мощности и состава перекрывающих их рыхлых отложений и периода полураспада эманации.

На значительных глубинах (более 2—3 м) для однородного бесконечного пласта большой мощности связь между концентрацией эманации в почвенном воздухе  $C_{Ra}$  и факторами, ее определяющими (концентрацией радия  $C_{Ra}$ , коэффициентом эманирования  $\eta$ , пористостью породы  $P$  и ее плотностью  $\rho$ ), выражается соотношением:

$$C_{Ra} = \frac{C_{Ra} \cdot \rho \cdot \eta}{P} \cdot 10^{13} \text{ эман.} \quad (31)$$

Величины, входящие в формулу (31), могут изменяться в значительных пределах. Особенно в широких пределах (в десятки раз) изменяется величина коэффициента эманирования, зависящая от физического состояния породы.

В приповерхностных слоях рыхлых отложений на величину концентрации эманации в почвенном воздухе, кроме того, в значительной степени оказывают влияние факторы, обуславливающие газообмен между почвой и атмосферой: диффузия газов, конвекционные потоки, возникающие благодаря изменению поверхностных условий (атмосферное давление, ветер, температура и т. д.).

В связи с этим формула (31) может быть использована лишь для ориентировочных расчетов ожидаемой концентрации эманации. Так, для случая, когда содержание урана (в равновесии с радием) состав-

влияет 0,001%,  $\eta = 0,5$ ,  $P = 0,3$  и  $\rho = 2$  г/см<sup>3</sup>, концентрация радона в почвенном воздухе составит 75 эман и легко может быть измерена современными эманометрами любых типов.

Эманационная съемка является одним из сравнительно глубоких методов поисков месторождений урановых руд. Наиболее эффективно эманационный метод может быть использован на участках с мощностью рыхлых отложений от 1 до 3—5 м. В отдельных случаях, при наличии интенсивно развитых вторичных ореолов рассеяния урана — радия, эманационная съемка может оказаться эффективной на участках с мощностью рыхлых отложений до 10 м. В районах широкого развития моренно-ледниковых, эоловых и других чуждых рыхлых отложений, перекрывающих рудные тела и вторичные ореолы рассеяния урана — радия и обладающих незначительной газопроницаемостью, глубинность эманационных поисков при стандартной (0,8—1,0 м) глубине отбора проб подпочвенного воздуха, как правило, не превышает 1,5—2,0 м.

При мощности малогазопроницаемых образований, превышающей 1,5—2 м, обычные эманационные поиски, как правило, являются неэффективными и должны быть заменены глубинными. Существенным фактором, затрудняющим эффективное применение эманационного метода, является увлажненность и заболоченность рыхлых отложений, особенно характерная для восточных и северных районов СССР и во многих случаях исключающая постановку эманационных поисков. Эманационные поиски в таких районах должны ставиться на незаболоченных участках в сухие периоды полевого сезона. В пределах участков, на которых постановка эманационного метода из-за увлажненности и заболоченности наносов невозможна даже в сухое время года, целесообразно проводить вместо эманационных шпуровые  $\gamma$ -поиски.

Таким образом, наиболее благоприятными для постановки эманационных поисков являются площади развития рыхлых отложений однородного состава с относительно постоянной мощностью (в пределах 1—5 м) и небольшими колебаниями нормального эманационного поля.

Неблагоприятными для проведения эманационных поисков являются площади с хорошей обнаженностью коренных пород, широким развитием каменных осыпей, моренных отложений, заболоченности и многолетней мерзлоты.

Выбор участков для эманационной съемки производится на первом этапе поисковых работ при районировании территории по применимости поисковых методов.

Эманационная съемка может применяться на различных этапах геологоразведочных работ на радиоактивные элементы, начиная от рекогносцировочных поисков и кончая детальными и оценочными работами на месторождениях и рудопроявлениях радиоактивных руд, вплоть до эманационного опробования горных выработок. Однако наиболее эффективны поисковая и детальная эманационная съемки.

Профили амацационной съемки задаются, как правило, вкрест простиранию рудоконтролирующих геологических и осадочных пород (тектонических нарушений, контактов магматических и осадочных пород и т. п.). Расстояние между профилями определяется масштабом поисков, который в свою очередь зависит от поставленных задач геологического строения и перспектив района, размеров ожидаемых рудных тел и их ореолов рассеяния и т. д. Расстояние между профилями не должно превышать длины ожидаемых ореолов рассеяния по простиранию. Расстояние между точками наблюдения по профилю выбирается таким, чтобы оно не превышало половины ширины амацационного ореола.

Рекогносцировочная (маршрутная) амацационная съемка применяется с целью выяснения (в комплексе с другими геофизическими методами) общих перспектив на урановые площади, закрытых рыхлыми отложениями, и выделения благоприятных рудоконтролирующих структур и пород района.

Расстояния между профилями при этом виде работ могут измеряться километрами, расстояния между точками наблюдения 10—25 м (на особо перспективных участках — 5 м). Привязка профилей производится по топографической карте без предварительной разбивки системы профилей и магистралей.

Рекогносцировочные амацационные поиски применяются в плохо изученных в геологическом отношении районах на первом этапе поисковых работ на радиоактивные элементы. В настоящее время рекогносцировочные амацационные поиски используются сравнительно редко.

Амацационная съемка в масштабах 1 : 25 000 (сеть наблюдений 250—200 × 5—10 м) и 1 : 10 000 (сеть наблюдений 100 × 5—10 м) применяется для непосредственных поисков новых рудных полей и отдельных месторождений радиоактивных руд. В отдельных случаях при поисках урановых месторождений пластового типа, приуроченных к выдержанным по простиранию горизонтам пород, может быть применена съемка масштаба 1 : 50 000 по сети наблюдений 500 × 10—20 м.

При поисках масштабов 1 : 25 000 и 1 : 50 000 в районах с достаточным числом надежных ориентиров сеть наблюдений может предварительно не разбиваться. Определение положения профилей в таких случаях производится оператором с помощью топографической карты и компаса, с учетом имеющихся ориентиров. В условиях затрудненной ориентировки работы проводятся с предварительной разбивкой магистральных линий.

Поиски масштаба 1 : 10 000 производятся, как правило, по сети заранее проложенных на местности профилей, увязанных магистральными линиями. Полуинструментальная разбивка сети наблюдений при этом производится специальным топографическим отрядом.

Детальная амацационная съемка масштабов 1 : 5 000 (сеть 50 × 5 м) и 1 : 2 000 (сеть 20 × 5—2 м) проводится с целью исследования выявленных радиометрических аномалий,

оковтуривания известных и выявления новых рудных тел в пределах месторождений и рудных полей. Детальные поиски производятся по предварительно подготовленной поисковой сети профилей.

#### 4. МЕТОДИКА ЭМАНАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Эманационная съемка проводится бригадой, состоящей из трех человек — оператора и двух рабочих. При механизированном способе проходки шпуров бригада состоит из двух человек — оператора и вспомогательного рабочего, причем работа бурового агрегата организуется таким образом, чтобы в течение дня можно было обслужить 2—3 бригады.

Перед началом поисковых работ настраиваются и градуируются эманометры, готовится вспомогательное оборудование — пылеулавливатели, резиновые шланги, пробоотборники, буры, воротки для извлечения буров из бурок и кувалды.

Процесс измерения концентрации эманации на точке наблюдения состоит из следующих последовательно проводимых операций.

1. Включение и проверка работоспособности эманометра.
2. Приготовление шпура глубиной 0,8—1,0 м для отбора газовых проб.
3. Установка в шпур пробоотборника, соединенного шлангом с пылеулавливателем и камерой эманометра.
4. Измерение или компенсация натурального фона прибора.
5. Отбор пробы подпочвенного воздуха.
6. Измерение концентрации эманации в пробе.
7. Определение природы эманации.
8. Удаление пробы из камеры.
9. Запись величины концентрации эманации в полевой журнал.
10. Переход на следующую точку наблюдений.

Включение прибора и его настройка осуществляются согласно заводским инструкциям по эксплуатации приборов.

При установке пробоотборника в шпур необходимо добиваться тщательного уплотнения устья шпура коническим накопечником пробоотборника, в противном случае подсос атмосферного воздуха может существенно исказить результаты съемки. При работе в районах с широко развитым моховым покровом в целях надежной герметизации устья бурки необходимо удалять мох вокруг него.

Измерение концентрации эманации в отобранной пробе подпочвенного воздуха производится сразу же после ее введения в камеру. Вычисление концентрации эманации производится по следующим формулам:

$$\text{для эманометров СР-11} \quad N = j i; \quad (32)$$

$$\text{для эманометров ЭМ-2 и ЭМ-6} \quad N = j(i - i_{\text{inf}}).$$

где  $N$  — концентрация эманации, *эман*;  
 $i$  — отсчеты при измерении проб, *дел/мин* (ЭМ-2, СГ-11) или деления шкалы (ЭМ-6);  
 $i_0$  — отсчеты при измерениях естественного рассеяния;  
 $j$  — коэффициент эталонирования, *эман на дел/мин* (СГ-11 и ЭМ-2) или *эман на дел* (ЭМ-6).

Для выяснения природы эманаций в рыхлых отложениях на каждой десяткой — пятидесятой точке наблюдения в пределах нормальных эманационных полей производятся отдельные определения эманаций. Для этого после окончания отбора пробы производится два последовательных измерения: 1) сразу же после отбора пробы (мгновенный отсчет) и 2) через 1 мин после введения пробы (одноминутный отсчет).

На каждой выявленной эманационной аномалии в двух-трех точках с максимальной концентрацией эманации производятся более точные радон-тороновые измерения, для чего производится три отсчета по шкале эманометра: 1) сразу же после введения эманации в камеру прибора (мгновенный отсчет), 2) через 2 мин (двухминутный отсчет) и 3) через 3 мин (трехминутный отсчет). По результатам наблюдений с различной экспозицией производится расчет концентрации радона и торона в анализируемой пробе подпочвенного воздуха.

При проведении эманационных поисков на участках со сложными смешанными эманационными полями (участки развития пород с повышенными кларками тория и урана) производится отдельная радон-тороновая съемка с тремя измерениями (мгновенный, одноминутный и двухминутный отсчеты) на каждой точке наблюдений. Расчет радона и торона производится по формулам

$$R_n = 1,5 (i_1 - 0,5i_0)j; \quad (34)$$

$$R_n = (i_2 - 0,2i_0)j; \quad (35)$$

$$R_n = 0,8 (i_3 - 0,1i_0)j; \quad (36)$$

$$T_n = i_0j - R_n, \quad (37)$$

где  $N_0$  — концентрация эманации, рассчитанная по измерению с мгновенным отсчетом;

$R_n, T_n$  — концентрации радона и торона в пробе, *эман*;

$i_0, i_1, i_2, i_3$  — величины, измеренные соответственно при мгновенном, одно- и двух- и трехминутном отсчетах, *дел* (ЭМ-6) или *дел/мин* (СГ-11, ЭМ-2).

Точность определения концентрации радона по формулам (34, 35, 36) составляет 15—20%, а торона 30—40%, что вполне приемлемо для решения практической задачи поисков месторождений радиоактивных руд эманационным методом.

По величинам концентрации радона и торона рассчитывается соотношение  $\varepsilon = \frac{R_n}{T_n}$ , используемое для оценки природы радио-

активности выявленной аномалии. При  $\epsilon > 1,5$  эманационное поле является существенно радоновым, при  $\epsilon \approx 1$  — смешанным и при  $\epsilon < 0,5$  — существенно тороновым.

При наличии на профиле различных препятствий для нормального отбора проб подпочвенного воздуха (обнажения скальных пород,

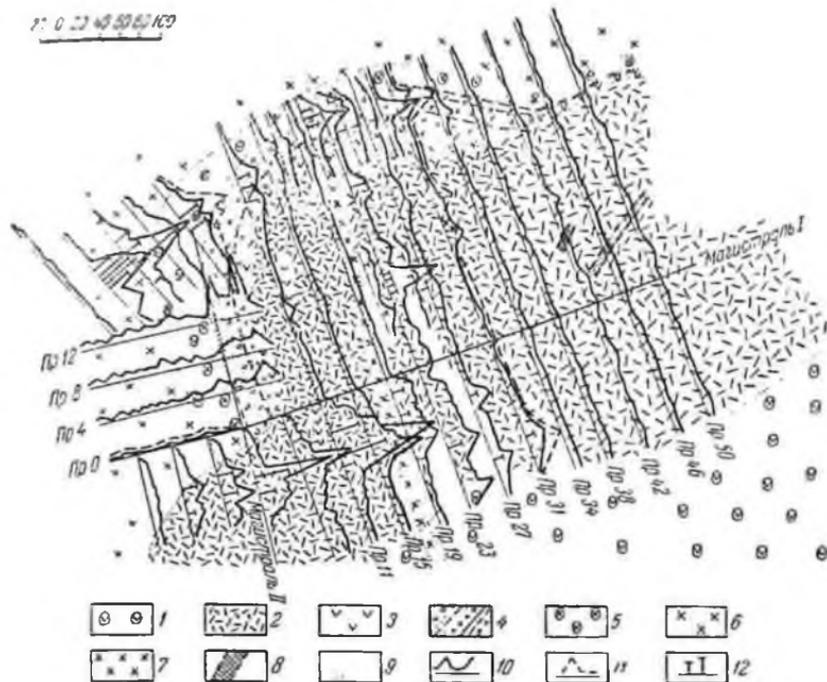


Рис. 46. План графиков эманационной съемки

1 — конгломераты, гравелиты, песчаники; 2 — туфы кварцевых порфиров, туфолавы; 3 — вулканическое стекло (лаво-брекчия), 4 — конгломераты с прожилками песчаников; 5 — глыбовые конгломераты; 6 — метаморфическая толща; 7 — микродырты; 8 — дробленные породы; 9 — геологические границы; 10 — графики концентрации эманации (верт. м-б: в 1 см — 100 экз. эман.); 11 — графики повторных измерений концентрации эманации; 12 — концентрация радона

обводненные участки, участки с отвалами горных выработок и т. д.) отбор проб осуществляется не на профиле, а в стороне от него. Если подобные участки занимают значительную площадь, то эманационная съемка на них заменяется другими видами радиометрических работ (пешеходная поверхностная и шпуровая  $\gamma$ -съемки и др.).

В процессе съемки производится систематический контроль работы аппаратуры и качества съемки в целом. Контроль работы аппаратуры осуществляется оператором дважды в день (в начале и по окончании рабочего дня) с помощью эталонов  $\gamma$ -излучения (эманометры ЭМ-2 и СГ-11) или специальных эталонных камер (ЭМ-6). Если полученные при контроле величины отсчетов отличаются более чем  $\pm 10\%$  от величины отсчетов, полученных при эталонировании.

эманометр подлежит тщательной проверке, устранению неисправностей и настройке. Качество работы операторов систематически контролируется начальником эманационного отряда.

Для оценки качества полевых работ в целом проводятся контрольные (повторные) измерения в объеме 3—5% от общего объема эманационных наблюдений. Контрольные измерения производятся систематически в течение всего полевого сезона на профилях, расположенных по возможности равномерно по всей площади съемки. О хорошем качестве работ свидетельствует повторяемость формы графиков концентрации эманации, полученных при основных и контрольных измерениях.

Результаты эманационной съемки изображаются в виде планов графиков концентрации эманации по профилям, на которые наносится схематическая геологическая основа (рис. 46). По результатам детальных работ на отдельных участках (как правило, на аномальных) строятся планы изоэман в масштабе проведенных работ.

## 5. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ СЪЕМКИ И ОЦЕНКА ЭМАНАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ

Граница аномальности концентраций эманации определяется для каждого участка в зависимости от величины нормального фона и степени его колебаний. В общем случае за аномальную концентрацию принимается концентрация эманации, превышающая среднюю фоновую концентрацию на удвоенное среднее квадратичное отклонение.

Так, при фоновых значениях концентрации эманации 20 эман и стандартном отклонении от фона  $\pm 10$  эман за аномальные значения принимаются концентрации, превышающие 40 эман.

В отдельных случаях аномальными следует считать даже незначительные (менее удвоенного среднего квадратичного отклонения) превышения концентрации эманации, если они коррелируются по нескольким соседним профилям.

При обнаружении аномальных концентраций эманации оператор прежде всего проверяет надежность работы аппаратуры, и в случае нормальной работы прибора, производит предварительную детализацию и изучение выявленной аномалии. Точки с максимальной концентрацией эманации отмечаются на местности каменными или земляными турками, затесами на деревьях, кольями и т. п.

Оценка аномалии производится в два этапа. На первом этапе производится предварительная оценка, имеющая целью отбраковку неперспективных аномалий и выбор методики последующих более детальных работ на основе имеющихся сведений о концентрации и природе эманации, размерах аномальных участков и их геологическом строении.

Предварительная оценка аномалий производится сразу же после их обнаружения. В пределах выявленной аномалии в двух-трех точках с максимальной концентрацией эманации определяется при-

рода последней при мгновенной, двух- и трехминутной экспозициях. При этом определяются содержания радона и тора в пробах производятся по формулам (36, 37), а формула (35) используется для контроля надежности этих определений. На существенно радоновых аномалиях ( $\epsilon > 1,5$ ) производится детализация по двум-трем параллельным коротким профилям, отстоящим на 10—25 м от профиля, на котором была выявлена аномалия. Длина детальных профилей выбирается с расчетом пересечения аномалии и выхода на 15—25 м в нормальное поле. Расстояние между точками наблюдения на детальных профилях в случае необходимости сокращается до 5, иногда до 2 м в зависимости от ширины аномального участка.

В результате детализации аномалии устанавливаются ее размеры, простирание и природа, что позволяет в большинстве случаев с учетом геологического строения участка дать заключение о перспективности аномалии и либо отбраковать ее как бесперспективную, либо наметить методику дальнейшей оценки. Уже на этапе предварительной оценки могут быть отбракованы как бесперспективные аномалии с существенно торневой природой ( $\epsilon < 0,5$ ), связанные с породами, обладающими повышенным кларком тория и не являющимися перспективными на наличие уранового оруденения, а также ряд локальных (точечных) радоновых аномалий (например, связанных с уплотнением верхней части рыхлого покрова на проселочных дорогах и т. п.).

Аномалии, выявленные аномалионной съемкой масштабов 1 : 2 000 и 1 : 5 000, детализации по дополнительным параллельным профилям в процессе съемки не подлежит. Вопрос о необходимости их детализации решается руководством партии после осмотра аномального участка и анализа полученных по нему результатов.

Второй этап оценочных работ — детальная оценка аномалий — производится, как правило, комплексом геолого-геофизических методов, включающим геологическое картирование аномального участка, наземную или шуровую  $\gamma$ -съемку, металлометрическое опробование рыхлых отложений на содержание урана и элементов-спутников, вскрытие аномалий горными выработками и т. п.

В процессе детальной оценки выясняются следующие основные параметры аномалии, позволяющие перевести ее в разряд перспективных рудопроявлений либо отбраковать как не представляющую промышленного интереса.

1. Форма и размеры аномального участка и характер распределения концентрации аномалии.
2. Природа радиоактивности выявленной аномалии.
3. Наличие или отсутствие повышенных концентраций урана и сопутствующих урановому оруденению элементов в рыхлых отложениях.
4. Характер изменения радиоактивности пород и концентрации урана с глубиной.
5. Наличие или отсутствие связи выявленных повышенных концентраций радиоактивных элементов в рыхлых отложениях с породами.

В результате детальной оценки устанавливается связь выявленной аномалии с перспективными равновесными структурами или рудными телами.

Методика детальной оценки аномалий не отличается от методики детальной оценки аномалий пешеходной съемки, и поэтому в настоящей главе подробно не описывается.

При интерпретации результатов аномалийных поисков следует иметь в виду, что аномалии обусловлены главным образом распределением радия и анированием пород и не всегда находятся в прямой связи с повышенными концентрациями урана. Помимо указанных факторов, на величину концентрации аномалии влияет ряд других причин, таких, как пористость пород и их плотность, увлажненность и газопроницаемость рыхлых отложений и т. в., в связи с чем интерпретация результатов аномалийной съемки сопряжена со значительными трудностями (Граμμαков, Попретинский, 1957; Граммаков, 1961).

Нарушение условий анирования горных пород и газообмена с атмосферой приводит к образованию аномалий, не связанных с повышенными содержаниями радиоактивных элементов в коренных породах и рыхлых отложениях, так называемых аномалий анирования и экранирования.

Аномалии анирования обусловлены локальными изменениями коэффициента анирования горных пород с нормальной радиоактивностью в пределах тектонических зон, участков сильно выветрелых пород и т. п.

Аномалии экранирования связаны с наличием в рыхлых отложениях локальных газонепроницаемых образований (глинистые отложения, увлажненные почвы и т. п.), расположенных над горизонтом отбора газовых проб и препятствующих диффузии аномалии в атмосферу. Зачастую аномалии экранирования приурочены к участкам уплотнения верхней части рыхлых отложений (дороги, тропы и т. п.); характерно также формирование аномалий экранирования после дождя, когда происходит смачивание верхней части рыхлых отложений, препятствующее нормальному газообмену с атмосферой.

Отбраковка таких аномалий при проведении предварительной детализации возможна лишь в случае отчетливой приуроченности локальных аномалий к участкам уплотнения грунта на дорогах и тропях. Во всех остальных случаях отбраковка аномалий анирования и экранирования возможна лишь на этапе их детальной оценки при исследовании изменений концентрации аномалии,  $\gamma$ -активности и содержания урана с глубиной (рис. 47 и 48).

Оценка перспективности и отбраковка аномалий должна проводиться с учетом результатов применения других радиометрических, геологических и геохимических методов по совокупности признаков, благоприятных для обнаружения уранового оруденения. К таким признакам относятся высокая концентрация радона, повышенная  $\gamma$ -активность, протяженность аномалии и ее связь

с благоприятными геологическими структурами, увеличение концентрации эманации или интенсивности  $\gamma$ -излучения с глубиной и др. К наиболее перспективным аномалиям, которые могут быть свя-

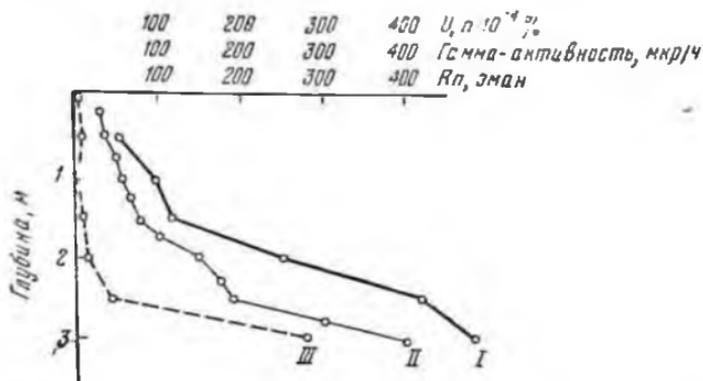


Рис. 47. Графики изменения концентрации эманации (I)  $\gamma$ -активности (II) и содержания урана (III) с глубиной на аномалии, связанной с рудными телами

заны с урановыми рудными телами, относятся аномалии, характеризующиеся следующими основными признаками.

1. Наличие аномальных концентраций урана в пробах рыхлых отложений и коренных пород.



Рис. 48. Графики изменения концентрации эманации (I);  $\gamma$ -активности (II) и содержания урана (III) на аномалии экранирования

2. Наличие видимой урановой минерализации.

3. Сравнительно высокие концентрации эманации (десятки и сотни эман), отчетливо коррелирующиеся по нескольким профилям в виде аномальной полосы.

4. Существенно радоновая или (реже) смешанная природа аномалии.

5. Увеличение концентрации амацции и интенсивности  $\gamma$ -излучения с глубиной.

6. Наличие пород с аномальной радиоактивностью и приуроченность их к определенным структурам, горизонтам в осадочных породах, зонам дробления, трещинам и т. п.

Основными признаками перспективных на урановое оруденение аномалии являются следующие.

1. Локальные размеры аномалии, отсутствие корреляции аномальных концентраций амацции (так называемые точечные аномалии).

2. Существенно торонная природа амацции.

3. Связь аномальных концентраций с незначительными скоплениями аксессуарных минералов в породах и рыхлых отложениях.

4. Весьма незначительная  $\gamma$ -активность в шпурах (превышение над фоном составляет несколько микрорентген в час) при существенно аномальных концентрациях амацции и отсутствии повышения последних и  $\gamma$ -активности с глубиной.

## 6. ОСОБЕННОСТИ ГЛУБИННОЙ ЭМАНАЦИОННОЙ СЪЕМКИ

Глубинные эманационные съемки месторождений урана применяются на площадях с погребенными или ослабленными у поверхности газовыми ореолами рассеяния, недоступными для выявления обычной эманационной съемкой с глубиной отбора проб до 1 м. Глубина отбора проб в этом случае определяется глубиной залегания представительного горизонта (см. гл. V) и составляет в зависимости от применяемых технических средств для проходки шпуров от 2—3 до 10 и более м.

Относительно высокая стоимость глубинных эманационных поисков обуславливает необходимость проведения этих работ на перспективных площадях, при выборе которых наиболее полно используются результаты всех предшествовавших геолого-геофизических работ и учитываются особенности разреза рыхлых отложений, определяющие выбор поисковых методов и технических средств проходки шпуров.

Глубинная эманационная съемка в последние годы потеряла самостоятельное значение при поисках месторождений урана на закрытых площадях, однако использование этого метода в благоприятных условиях, особенно при оценке природы радиоактивности аномалий, выявленных глубиной  $\gamma$ -съемкой, дает важный дополнительный материал, позволяющий целенаправленно проводить радиометрические поиски.

Выбор площадей для глубинной эманационной съемки осуществляется на основании их районирования по категориям трудности опоскования радиометрическими методами с использованием схема-

тических геолого-структурных карт, составленных в процессе подготовки к проведению поисковых работ.

На поисковом этапе исследования территории глубинная эманационная съемка проводится, как правило, в масштабе 1 : 25 000 по сети 250 × 20—40 м, реже в масштабе 1 : 50 000 по сети 500 × 20—40 м. На перспективных площадях проводится детальная съемка в масштабе 1 : 10 000 по сети 100—125 × 20—100 м.

Детализация аномалий с целью их оценки производится в масштабе 1 : 10 000 или 1 : 5000 по сети 100—50 × 20—10 м. Глубинная эманационная съемка на этом этапе работ, как правило, заменяется у-каротажем с частичным применением эманационного каротажа.

Глубинные эманационные поиски обычно проводятся по заранее подготовленной и закрепленной на местности сети профилей, ориентированных вкрест простирания основных рудоконтролирующих структур района. В каждой точке измерений шпуры проходятся на максимально возможную для данного бурового агрегата глубину. Если проходка шпуров на необходимую глубину оказывается невозможной вследствие встречи обломков скальных пород, то рядом проходятся дополнительные шпуры.

При глубинных эманационных поисках применяется отбор проб с перекрытием и без перекрытия шпуров. Разновидностью первого способа отбора является эманационный каротаж.

Отбор газовых проб без перекрытия шпуров является основным способом пробоотбора при глубинной эманационной съемке. В этом случае используются пробоотборники в виде перфорированных в нижней части металлических трубок длиной 1,0—1,5 м и диаметром 10—12 мм, опускаемых на резиновом шланге до забоя шпура.

В тех случаях, когда измерение торона не ставится целью эманационных работ, отбор проб воздуха без перекрытия шпура может выполняться спустя 5—10 мин и более после его проходки, когда торон практически распадается полностью, а последующее его поступление затруднено вследствие уплотнения стенок шпура. Вместе с тем, учитывая возможность осыпания стенок шпуров, эманационные наблюдения должны заканчиваться в тот же день, когда пройдены шпуры.

При определении природы радиоактивности аномалий, а также во всех других случаях, когда необходимо знать соотношение радона и торона в почвенном воздухе, отбор газовых проб должен производиться сразу же после проходки шпура. При этом ввиду быстрого распада торона время между проходкой шпура и отбором пробы на всех пунктах измерения должно выдерживаться постоянным и составлять не более 40—60 сек.

Отбор проб подпочвенного воздуха с перекрытием шпуров применяется в случае слабых эманационных аномалий, а также при измерениях концентрации эманации в мелких шпурах (менее 2 м). Перекрытие шпура производится с помощью специального пробоотборника (пакерзонда) с...

двумя резиновыми манжетами, и которые перед отбором пробы с помощью вспомогательного насоса вакуумируются воздухом, что герметизирует шпур и препятствует подосу атмосферного воздуха (рис. 49). Пакерзонд с одной манжетой применяется для исследования рас-пределения эманации и глубины части шпуров, т. е. в тех случаях, когда шпур незначительно углубляется в представительный горизонт (например, когда верхняя часть шпура пройдена в чуждых

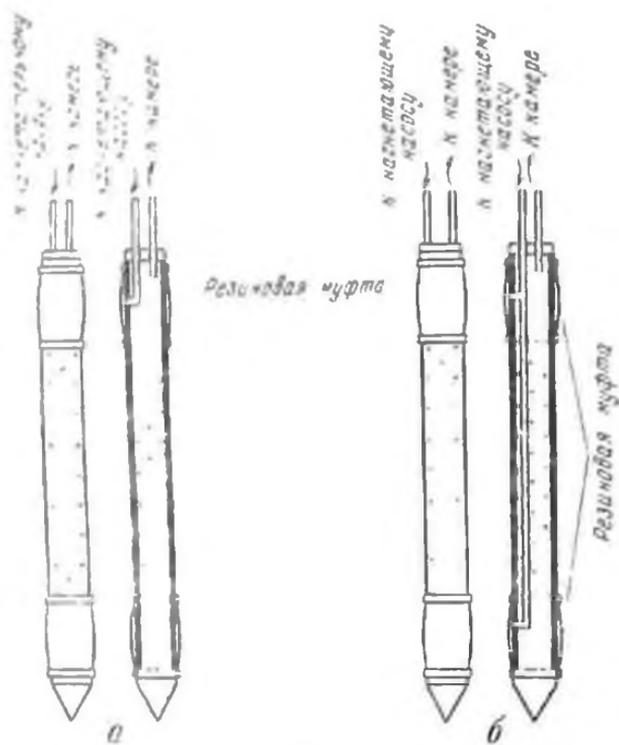


Рис. 49. Пробоотборники для глубинной эманационной съемки  
 а — с одной манжетой, б — с двумя манжетами

рыхлых отложений, не несущих ореолов рассеяния). Перекрытие шпуров при этом производится на высоте 1,0—1,5 м от забоя.

Эманационный каротаж по оси шпура с использованием пакерзондов с двумя манжетами производится в тех случаях, когда для оценки выявленных аномалий представляется необходимым изучить распределение эманации по вертикали. Расстояние между точками отбора проб по оси шпура при проведении эманационного каротажа зависит от характера рыхлых отложений и глубины шпура и может изменяться от 1 до 2—3 м. Перед отбором газовых проб в манжеты пакерзонда вакуумируется воздух, что обеспечивает герметизацию места отбора проб, позволяет привязать измеренную концентрацию

эманации к вертикальному разрезу рыхлых отложений и проследить ее изменение с глубиной.

Для получения достоверных результатов глубинной эманационной съемки необходимо правильно выбрать оптимальное количество качаний насоса для конкретных условий отбора пробы. Особенно важное значение имеет определение оптимального числа качаний насоса при отборе газовых проб без перекрытия шпура, поскольку в этом случае наблюдается резкая зависимость измеряемых концентраций радона от объема прокачанного воздуха вследствие разбавления почвенного воздуха в шпуре атмосферным воздухом. При увеличении числа качаний насоса выше оптимального в 1,5—2,0 раза резко уменьшается концентрация эманации в пробе, что может явиться причиной пропуска аномалий.

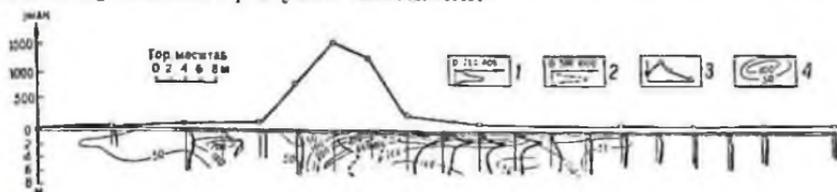


Рис. 50. Пример объемного изучения аномалии с помощью эманационного  $\gamma$ -каротажа

1 — диаграммы  $\gamma$ -каротажа; 2 — то же, в более мелком (в 2,5 раза) масштабе; 3 — диаграмма концентрации эманации; 4 — изоэмане

Определение оптимального числа качаний для шпуров различной глубины производится путем измерения концентрации эманации в отбираемых пробах при последовательном увеличении числа качаний насоса. В общем случае для шпуров диаметром 42—45 мм и глубиной 2—7 м оптимальное число качаний насоса (объем насоса 0,7 л) численно равно глубине шпура в метрах, увеличенной на единицу.

При отборе газовых проб пробоотборник, соединенный шлангом с эманационной камерой прибора, опускается в шпур до забоя и по меткам на планке определяется глубина шпура с точностью до десятых долей метра. Если нижняя часть шпура заполнена водой, то пробоотборник приподнимается, и отбор газовых проб производится над ее поверхностью. Все операции по проверке аппаратуры, измерению концентрации эманации и определению природы радиоактивности производятся точно так же, как при проведении обычной эманационной съемки.

Выявленные при глубинных эманационных поисках аномалии подвергаются предварительной оценке, которая заключается в площадном и объемном изучении радиоактивного ореола с прослеживанием его на глубину до коренных пород. Основные работы на этом этапе выполняются методом  $\gamma$ -каротажа шпуров с выборочным эманационным каротажем на аномальных интервалах с целью определения природы радиоактивности (рис. 50).

Результаты глубинных эманационных поисков представляются в виде карт графиков концентрации эманации

эманационного каротажа. На картах графиков концентрация эманации под линиями профилей вносятся глубины пробоотбора в масштабе 1 : 500—1 : 1 000.

Анализ результатов глубинных поисков включает в себя оценку их достоверности. Результаты считаются достоверными, если шпур углубляется и представительный горизонт не менее чем на 1 м.

Следует отметить, что в последние годы в связи с внедрением и практикой поисков урановых руд высокочувствительной и, в частности,  $\gamma$ -спектрометрической аппаратуры, применение эманационного метода стало более ограниченным.

Эманационные поиски все чаще стали заменяться сцинтилляционными шпуровыми  $\gamma$ -поисками. Вместе с тем благодаря основному преимуществу эманационного метода — возможности относительно простого и быстрого определения природы выявляемых радиометрических аномалий в полевых условиях — применение эманационной съемки в ряде случаев остается целесообразным. В частности, оно целесообразно в районах со смешанной урано-ториевой минерализацией, где выделение аномалий, связанных с урановыми рудопроявлениями, методом шпуровой  $\gamma$ -съемки является затруднительным или невозможным.

В благоприятных условиях эманационный метод может оказаться более эффективным по сравнению с  $\gamma$ -методом при выявлении и прослеживании тектонических зон, представляющих, как правило, поисковый интерес.

Новые возможности эманационного метода для поисков урановых месторождений, оценки природы и перспективности радиометрических аномалий могут открыться в связи с начатой разработкой активной съемки.

## УРАНОМЕТРИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

## 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Метод поисков месторождений урана по собственно урановым ореолам и потокам рассеяния называется уранометрической съемкой. В настоящее время разработаны три модификации уранометрической съемки, которые применяются на разных этапах поисковых работ:

- 1) уранометрическая съемка отложений постоянных и временных водотоков (метод донных осадков), имеющая целью выявление потоков рассеяния урана в аллювиальных и пролювиальных отложениях;
- 2) уранометрическая съемка элювиально-делювиальных отложений, позволяющая обнаруживать вторичные ореолы рассеяния урана;
- 3) уранометрическая съемка коренных пород, выявляющая первичные и вторичные ореолы рассеяния рудных тел.

В настоящей главе рассматриваются вопросы, относящиеся в основном к первым двум модификациям. Применение уранометрической съемки коренных пород для глубинных поисков слепых (не вскрытых эрозией) месторождений урана более подробно рассмотрено в гл. XIV.

В отличие от радиометрических методов, с помощью которых урановые месторождения и их ореолы рассеяния обнаруживаются по  $\gamma$ -,  $\beta$ - или  $\alpha$ -излучению урана и его продуктов распада, уранометрическая съемка ведется на основе прямых высокочувствительных определенных концентраций урана. Поэтому уранометрическую съемку используют при поисках в тех случаях, когда радиометрические способы не позволяют однозначно и достоверно обнаружить повышенные содержания урана.

Ореолы и потоки рассеяния урана проявляются в виде геохимических аномалий на нормальном геохимическом фоне, свойственном безрудным участкам пород.

Величина геохимического фона урана в рыхлых отложениях колеблется в пределах  $n \cdot 10^{-5} \div n \cdot 10^{-4} \%$  и достаточно постоянна для данной породы, хотя не всегда соответствует местному кларку последней, что обусловлено ландшафтными и геологическими условиями, определяющими выщелачивание и вынос урана или способствующими его накоплению в рыхлых образованиях. Например, в некоторых торфяных и болотных почвах, развитых на кислых изверженных породах, отмечены повышенные значения местного фона (до  $1-2 \cdot 10^{-3} \%$  и более) за счет сорбции урана органическим веществом из грунтовых вод, промывающих кору выветривания.

В результате денудации механических и солевых ореолов рыхлый материал, обогащенный ураном, перемещается в гидросеть и разносится поверхностными водами, образуя в русловых отложениях потоки рассеяния. В частных случаях накопление урана в виде

может происходить за счет выпадения его из поперхностных вод. Формирование потока рассеяния из ореола является дальнейшим этапом рассеяния рудного вещества; поэтому ореолы и потоки нельзя рассматривать и классифицировать как отдельные, независимо существующие образования. Поток есть периферическая часть ореола, развивающаяся в гидросети на путях дальнейшего переноса рудного вещества временными и постоянными водотоками. Потокам присущи все характерные черты ореолов в отношении генезиса и вещественного состава. По генетическому признаку потоки разделяются на механические и солевые, возникающие в результате денудации в одном случае механических, а в другом случае солевых ореолов, хотя при формировании тех и других потоков важную роль играет механическая сила воды, переносящая и откладывающая по руслу обогащенный ураном материал.

Вещественный состав ореолов и потоков рассеяния (ассоциация радиоактивных элементов и элементов-спутников, их количественные соотношения и минералогическая форма) является важнейшим параметром, по которому производится оценка их перспективности, делается предположение о генетическом типе коренного источника и возможной пространственной связи с ним, намечается методика дальнейших поисков.

В нижней по разрезу механического ореола части, примыкающей к рудному выходу, отмечаются концентрации урана, характерные для окисленных руд, а на периферии содержания его приближаются к величине местного геохимического фона. В среднем содержание урана как в механических, так и солевых ореолах колеблется в пределах от одной тысячной до первых сотых долей процента на фоне  $1-3 \cdot 10^{-4}\%$  и менее. Эпигенетические аккумуляции в торфяниках часто содержат сотые — первые десятые доли процента урана. Механические потоки урана обычно отличаются малой интенсивностью ( $5-30 \cdot 10^{-4}\%$ ), так как они более удалены от рудного тела, чем ореолы, и содержание рудных элементов в них подвергается большему разубоживанию пустыми породами. В механических потоках крупность обломков, несущих урановую минерализацию, постепенно убывает от начала (головы) потока к его концу. Солевые потоки рассеяния часто характеризуются более высокими концентрациями урана (до нескольких сотых долей процента), особенно в случае поступления в гидросеть материала из области солевых ореолов урана на заболоченных площадях.

Размеры вторичных механических ореолов, как правило, значительно превышают (в 3—10 раз и более) размеры рудных выходов. Ширина ореола рудного тела (или власта) мощностью от десятков сантиметров до первых метров при мощности рыхлого покрова от 1 до 5 м достигает 10—40 м. При близко расположенных зонах площадь суммарного ореола может иметь значительную величину, складывающуюся из отдельных ореолов. Размеры вторичных ореолов пропорциональны размерам рудного выхода и мощности рыхлых образований, определяющейся временем и скоростью денудации.

Наличие первичного ореола в коренных породах может значительно увеличить размеры вторичных механических ореолов как в плане, так и по вертикали.

Смещение максимума ореола в приповерхностном слое по отношению к проекции рудного выхода на дневную поверхность достигает 5—10 м и более и растет с увеличением мощности элювиально-делювиального покрова и крутизны склона.

Длина потоков рассеяния колеблется от сотен метров до первых километров и зависит главным образом от концентрации элементов и размеров ореола рассеяния, от соотношения площадей рудного и безрудного сноса и от местоположения ореола в бассейне денудации.

Механические потоки урана во многих случаях непосредственно примыкают к урановому ореолу на горном склоне, часто начпая формироваться внутри его контура, в коротких логах и ручьях. При выпуклых склонах между механическим ореолом и потоком может происходить разрыв.

Для потоков характерно прерывистое строение. Участки русловых отложений, обогащенные ураном, сменяются участками с фоновыми концентрациями, что объясняется неодинаковыми условиями накопления рудных частиц вдоль русла.

## 2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРАНА В ОРЕОЛАХ И ПОТОКАХ РАССЕЯНИЯ

Методы определения урана при уранометрической съемке должны иметь высокую чувствительность и обеспечивать большую производительность в условиях полевой партии.

В Советском Союзе наиболее широкое применение при уранометрической съемке нашла одна из модификаций перлово-люминесцентного анализа («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957), характеризующаяся следующими показателями: диапазон измеряемых концентраций  $(1-2) \cdot 10^{-4}$  — 0,1% урана, средняя относительная погрешность  $\pm 20-30\%$ , средняя производительность — 75 анализов на одного лаборанта за 6-часовую смену.

Способ химической обработки уранометрических проб выбирается таким образом, чтобы обеспечить обнаружение урана первичных урановых минералов и новообразований зоны гипергенеза и в то же время не создавать чрезмерно повышенного фона за счет урана пороодообразующих и аксессуарных минералов. Чаще всего применяется кислотное разложение проб с использованием смеси азотной и соляной кислот, которое позволяет выделить из проб уран, присутствующий в виде окислов, гидроокислов, силпкатов, фосфатов, сульфатов, карбонатов и некоторых других типов минералов. Аксессуарные ураносодержащие минералы плохо разлагаются при такой обработке и в тех случаях, когда требуется более полное извлечение урана, например, при определении его кларковых содержаний в породах.

следует применять смесь серной и соляной кислот с фтористым аммонием, а в некоторых случаях, при наличии тантало-ниобатов или безводных цирконов, производить сплавление пробы с содой или пиросульфатом калия.

Для поисков солевых потоков урана, где подавляющая часть урана присутствует в легко подвижной форме, можно применять методику обработки проб 1%-ным содовым раствором.

Перлы фтористого натрия активируются в растворе пробы или сплавляются с остатком от выпаривания, после чего определяется интенсивность люминесценции на люминесцентных фотометрах.

В США, Франции и некоторых других странах при геохимических поисках урана используется хроматографический метод, позволяющий определить уран в диапазоне концентраций  $(4-1200) \cdot 10^{-4}\%$  со средней точностью  $\pm 20\%$ ; при этом производительность на одного лаборанта за 8-часовую смену в зависимости от квалификации аналитика составляет 60—120 анализов (Hawkes and Bloom, 1956).

Основной причиной ограничения применения лабораторного радиометрического анализа при уранометрической съемке является отсутствие экспрессных радиометрических методов, позволяющих определять уран, начиная с кларковых содержания.

Из существующих радиометрических методов обнаружения повышенных концентраций урана в рыхлых образованиях применяются полевые  $\beta$ -съемки с поверхности и в шпурах и лабораторный  $\beta$ -анализ металлометрических проб, которые регистрируют суммарную активность всех  $\beta$ -излучателей урано-радиевого и торшевого рядов и калия.

Общим недостатком этих методов по сравнению с люминесцентным и хроматографическим анализами является их более низкая чувствительность при определении урана, связанная с колебаниями нормальных содержания радиопределителей ( $\beta$ -излучателей) в коренных породах и рыхлых образованиях.

Колебания нормального радиоактивного фона за счет изменчивости местных кларковых концентраций урана, радия, тория и калия, даже в пределах одной породы, иногда достигают  $(10-15) \cdot 10^{-4}\%$  эквивалентного равновесного урана. Отсюда ясно, что концентрации урана в рыхлых отложениях в диапазоне  $(6-20) \cdot 10^{-4}\%$ , присущие в некоторых случаях ореолам и потокам рассеяния урановых месторождений, не могут быть надежно зафиксированы радиометрическими методами.

Попытки использования измерений  $\alpha$ -активности уранометрических проб импульсным методом вместо люминесцентного анализа во многих случаях оказываются безуспешными из-за сильной зависимости  $\alpha$ -активности от вещественного состава проб и влияния эманирования.

Применение радиометрических методов, регистрирующих  $\beta$ -излучение, может быть успешным для выявления и оковтуривания достаточно интенсивных урановых ореолов рассеяния при детально-поисковых работах масштаба 1 : 10 000 и крупнее, в частности, при поисках на перспективных площадях, выделенных по данным мелкомасштаб-

вой уранометрической съемки. Лучшие результаты при этом достигаются в районах с низким и выдержанным радиоактивным фоном, например, в пределах заболоченных площадей или на участках развития некоторых осадочных пород.

Лабораторный  $\beta$ -метод широко используется для оценки радиоактивности металлометрических проб при массовых поисках урана. Его применение для выявления ореолов урановых месторождений в делювии, несмотря на меньшую по сравнению с люминесцентным анализом чувствительность, можно считать оправданным, так как он обеспечивает выполнение больших объемов работы с наименьшими затратами. Однако от метода группового измерения  $\beta$ -активности природы повышенной  $\beta$ -активности делювия и анализ проб аллювия и взвесей должны выполняться перлово-люминесцентным методом.

При поисках потоков и слабых ореолов рассеяния, когда обнаружение даже незначительных повышений концентрации урана может представлять поисковый интерес, применение радиометрических методов, не позволяющих надежно выявлять такие содержания урана, нерационально.

### 3. УСЛОВИЯ ПРИМЕНИМОСТИ УРАНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ И СОЧЕТАНИЕ ЕЕ С ДРУГИМИ ПОИСКОВЫМИ МЕТОДАМИ

Уранометрическая съемка отложений гидросети является экономичным и производительным методом первоначального опознавания территорий с целью выделения площадей под детально-поисковые работы и уступает в этом отношении лишь аэродиометрической съемке. Поэтому в целом ряде районов целесообразность ее применения в комплексе наземных рекогносцировочных методов поисков не вызывает сомнений.

С помощью уранометрической съемки отложений гидросети решаются следующие задачи: оценка ураноносности мало изученных в геологическом отношении районов; локализация по потокам рассеяния перспективных на уран участков; оценка ураноносности площадей при наземной проверке аэрогамма-аномалий.

Ореольная уранометрическая съемка в масштабах крупнее 1 : 25 000 является дорогостоящим методом по сравнению с радиометрическими съемками и применяется только в тех случаях, когда последние не способны решить поставленную задачу.

Уранометрическая съемка гидросети применима как в условиях физического выветривания урановых месторождений, так и в условиях преобладания химической миграции урана.

Надежность опознавания площади по потокам рассеяния зависит от густоты дренажной сети, размеров и интенсивности

рассеяния, развитых на водосборной площади. Этот вопрос теоретически разобран в работе А. П. Соловова (1959).

В гористых областях с развитой гидросетью по условиям формирования ореолов и потоков рассеяния выделяются: районы с преобладанием морозного выветривания; лесные и таежные районы с достаточным или избыточным увлажнением; районы с засушливым климатом. Эти области связаны между собой переходными зонами, которые также характеризуются своими специфическими условиями гипергенной миграции урана.

В районах с преобладанием морозного выветривания в аллювиально-делювиальном материале преобладает глыбовая и крупнообломочная фракция, что затрудняет применение уранометрической съемки. Ореолы и потоки имеют в этих условиях механический характер, развиты в виде шлейфа крупных обломков, содержащих неокисленные урановые минералы, и хорошо фиксируются  $\gamma$ -съемкой.

В лесных и таежных ландшафтах преобладает химическое рассеяние урана. Важнейшим фактором, определяющим высокую эффективность уранометрической съемки гидросети в таких условиях является заболоченность пониженных частей рельефа. Обилие на заболоченных площадях гумусового материала и неразложенных органических остатков, способных аккумулировать неустойчивый в маломинерализованных слабокислых и нейтральных водах уран, вынесенный из зоны выветривания месторождений, приводит к возникновению вблизи оруденения переотложенных солевых урановых ореолов, из которых в результате последующей эрозии и денудации обогащенного ураном материала образуются потоки рассеяния.

В горно-лесных и горно-луговых ландшафтах юга страны условия для аккумуляции урана на заболоченных площадях ухудшаются, так как более теплый климат способствует здесь разложению органического вещества.

Благодаря интенсивному развитию переотложенных ореолов урана на заболоченных участках вблизи месторождений, мелкомасштабная уранометрическая съемка может с успехом применяться в некоторых случаях даже в районах со сравнительно слабо развитой гидросетью. Надежность опосредования в этом случае достигается путем комбинирования опробования элементов гидросети с маршрутной съемкой по периферии заболоченных участков на границе с незаболоченным склоном. На рис. 51 приведен пример такой съемки. В районе, где густота гидросети составляет в среднем всего 0,4 поз. км на 1 км<sup>2</sup>, участок уранового месторождения хорошо отмечается уранометрическими аномалиями интенсивностью до 0,01 % и протяженностью до 1,5 км, обнаруженными на склоновых и пойменных болотах.

В горных районах с засушливым и сухим климатом ореолы рассеяния урана не подвергаются заметному выщелачиванию, поэтому формирование потоков здесь целиком подчиняется законам механического рассеяния. Мелкая фракция аллювия в этих условиях обычно

весьма представительна и металлометрические поиски по потокам рассеяния, как правило, дают хорошие результаты.

Таким образом, в горных и гористых районах уранометрическая съемка гидросети является в большинстве случаев эффективным методом выделения участков под детально-поисковые работы.

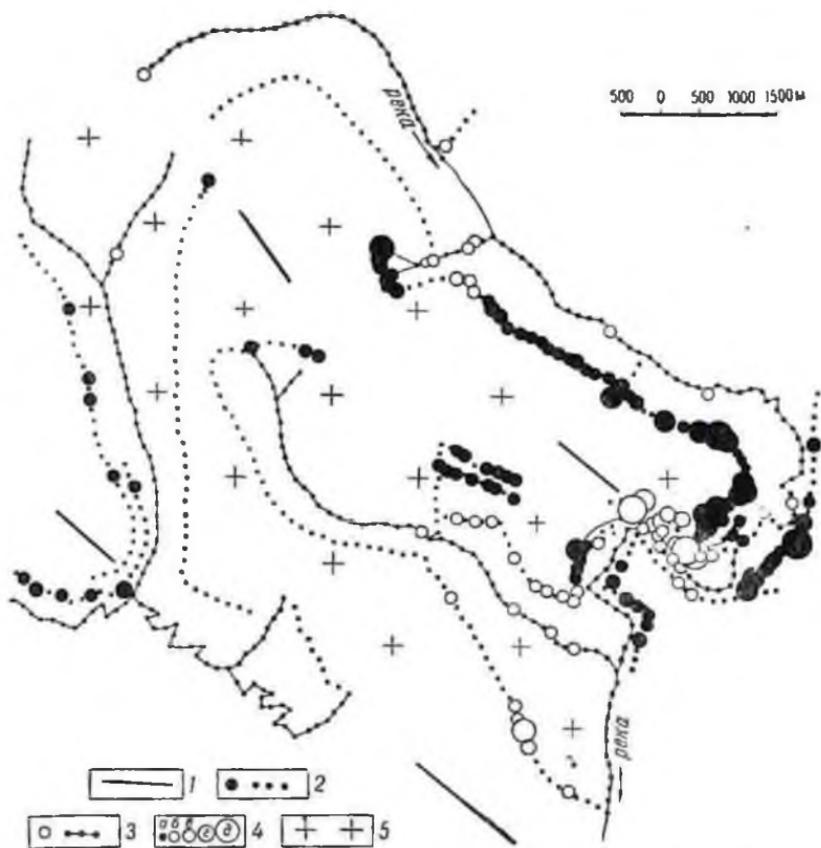


Рис. 51. Карта уранометрической съемки гидросети и заболоченных участков  
 1 — рудные тела; 2 — места отбора проб на периферии болот; 3 — места отбора проб аллювия; 4 — содержание урана в пробах (размеры кружков соответствуют следующим содержаниям урана в п.10 ‰: а — < 5, б — 5—10, в — 10—20, г — 20—30, д — 50—100); 5 — вмещающие граниты

В силу изменчивости ландшафтной обстановки, особенно в переходных по геохимическим условиям районах, мелкомасштабные геолого-радиометрические работы, проводимые на водоразделах и склонах, и уранометрическая съемка гидросети должны сочетаться, так как они существенно дополняют друг друга, повышая надежность поисковых работ при незначительном увеличении затрат.

Однако рациональное сочетание этих видов работ не предполагает дублирования. Например, если на площади запроектированы специальные радиометрические поиски масштабов 1 : 25 000 и 1 : 10 000, проведение уранометрической съемки гидросети теряет смысл, так как при правильном выборе горизонта  $\gamma$ -съемки большинство аномалий окажется расположенным на участках, выделяемых по потокам рассеяния. Наоборот, в тех случаях, когда планируются мелкомасштабные геохимические поиски урана, геологоразведочные радиометрические съемки масштабов 1 : 25 000 и 1 : 10 000 следует ориентировать на поиски участков развития уранометрических аномалий.

При проектировании поисковых работ в пределах намеченной к исследованию площади обычно возможно выделить одну или несколько ландшафтных зон (последний случай характерен для молодых горных сооружений с резко выраженной вертикальной климатической зональностью) и затем с учетом поисковой эффективности различных методов, а также экономических и организационных моментов, решить вопрос о целесообразности проведения уранометрической съемки гидросети и комплексирования ее с радиометрическими методами.

В табл. 10 приведены затраты средств на 1 км<sup>2</sup> уранометрической съемки гидросети с плотностью опробования 10 проб на 1 км<sup>2</sup>. Из приведенных данных очевидно, что в тех случаях, когда геохимические поиски урана эффективны и надежны, на первом этапе поисковых работ рационально проводить уранометрическую съемку гидросети, а дешесходную  $\gamma$ -съемку или более дорогостоящую эманационную съемку ориентировать на поиски участков развития уранометрических аномалий. При такой последовательности работ достигается экономический выигрыш, так как радиометрические поиски масштаба 1 : 25 000 и крупнее в этом случае проводятся на площади, составляющей 5—20% от исследуемой территории. Плотность уранометрического опробования 10 точек на 1 км<sup>2</sup> является наиболее распространенной при проведении съемки по аллювию в масштабе 1 : 50 000. При более мелких масштабах плотность опробования и стоимость квадратного километра съемки соответственно уменьшаются. Из всего этого следует, что поисковые работы должны быть организованы таким образом, чтобы результаты уранометрической съемки поступали в первую половину полевого сезона или с опережением других видов работ на целый год.

Таблица 10

Стоимость (в руб.) 1 км<sup>2</sup> уранометрической съемки гидросети

Категория местности Вид съемки	I	II	III	IV
	Уранометрическая съемка гидросети с плотностью опробования 10 проб на 1 км <sup>2</sup> . . . . .	3,65	3,85	4,90

Гидрохимический метод поисков едва ли целесообразно применять параллельно с уранометрической съемкой на первом этапе поисковых работ, так как во всех рассмотренных условиях он не имеет существенных преимуществ перед металлометрическим опробованием. В районах с резким преобладанием физического выветривания пород и руд радиогидрогеологические методы иногда оказываются практически малопригодными, а в гумидной зоне, где происходит интенсивная водная миграция урана, почти всегда имеются условия для образования интенсивных солевых урановых ореолов и потоков рассеяния в рыхлых образованиях, обнаруживаемых уранометрическими съемками. Однако в умеренно влажных горных районах с жарким климатом при наличии довольно интенсивного выщелачивания урана могут отсутствовать условия для его осаждения из вод, и поэтому здесь эффективным оказывается сочетание опробования аллювия и водных источников.

Сочетание гидрохимических и гидрогеологических исследований с уранометрической съемкой гидросети может быть полезно на этапе детально-поисковых работ, особенно в условиях интенсивного выщелачивания радиоэлементов при выветривании месторождений, когда изучение водных ореолов помогает в расшифровке уранометрических аномалий и выборе направления поисковых работ.

Вопрос о применимости геохимических поисков урана в платформенных условиях, денудированных районах с различным геологическим строением и северных районах изучен недостаточно.

По имеющимся данным, в платформенных равнинных областях в тех случаях, когда овражно-балочная сеть вскрывает рудоносные пласты осадочных месторождений, образуются короткие (длиной 50—100 м) потоки рассеяния урана. Уранометрическая съемка гидросети в этих условиях фактически выявляет аномалии только в пределах выхода рудного пласта, который фиксируется по балкам также и радиометрическими методами.

На урановых месторождениях аридной зоны, находящихся в подобных геолого-геоморфологических условиях, развиваются иногда интенсивные водные ореолы (до  $n \cdot 10^{-4}$  г/л), по эпитетические концентрации урана вблизи водных источников часто отсутствуют даже при наличии илесто-органических отложений. Здесь гидрохимические поиски следует отдавать предпочтение перед уранометрической съемкой гидросети.

Ореольные уранометрические съемки применимы во всех случаях, когда рудное тело или его первичный ореол образуют в песчано-глинистой или в мелкощебенистой фракции перекрывающих рыхлых отложений вторичный ореол рассеяния урана, доступный для наблюдения с поверхности в шпурах или мелких скважинах, но использование лито-геохимических съемок при поисках часто бывает экономически нецелесообразным, так как радиометрические методы позволяют выявить ореолы рассеяния и локализовать местоположение рудного выхода с меньшими затратами времени и средств. Вместе с тем важные преимущества уранометрических

съемки — высокая чувствительность и возможность комплексного изучения проб на уран и большинство других элементов — вызывают необходимость ее применения для решения частных вопросов.

На практике использование ореольной уранометрической съемки оказалось целесообразным для решения следующих задач: поиски вторичных ореолов, образованных за счет первичных ореолов слепых рудных тел в условиях аридного или полуаридного климата (при этом выявляются также ореолы рассеяния элементов, сопутствующих урану); обнаружение слабых наложенных ореолов урана в моренных отложениях и гумидной зоне путем определения в пробах «подшивного» урана чувствительным методом, позволяющим выявлять концентрации урана, начиная с  $2 \cdot 10^{-6}\%$ ; выявление переотложенных ореолов урана на заболоченных площадях; оценка радиометрических аномалий.

В последнем случае металлометрическая съемка на уран и другие элементы используется весьма широко, особенно в комплексе методов по оценке аномалий глубинных радиометрических съемок, вскрытие которых сопряжено с затратами больших средств. Геохимические методы при этом помогают по наличию ореолов рассеяния урана и сопутствующих элементов правильно оценить перспективность аномалий.

Эффективность ореольной уранометрической съемки снижается, когда фракция — 0,5 мм плохо представлена в обломочном рудном материале или обеднена ураном вследствие выщелачивания.

Слабое развитие мелкой фракции в элювиально-делювиальном покрове характерно для молодых ландшафтов, которые встречаются прежде всего в областях с преобладающим морозного выветривания. В лесных и таежных районах гумидной зоны устойчивость руд к выветриванию приводит к разубоживанию и без того слабо представленного мелкодисперсного рудного материала песчано-глинистыми образованиями (часто выщелоченными), возникающими при разрушении менее устойчивых вмещающих пород. В ряде случаев в этих районах наблюдается почти полное отсутствие значительных аномальных концентраций урана в принятой при металлометрических съемках фракции опробования ( $-0,5$  мм) рыхлых образований, перекрывающих выходы кварцевых жил с пастураном. В то же время крупные обломки кварца хорошо фиксируются  $\gamma$ -съемкой.

В этих условиях над неустойчивыми рудами также часто не удается обнаружить ореол рассеяния с поверхности из-за выщелоченности урана из верхних горизонтов покровных отложений.

#### 4. МЕТОДИКА УРАНОМЕТРИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Уранометрическая съемка представляет собой один из вариантов поисковой металлометрии, методика и техника проведения которой изложены в соответствующих инструкциях и монографиях (Инструкция по металлометрической съемке, 1957; Соловов, 1959).

В настоящей главе излагаются лишь некоторые особенности методики геохимических поисков урана, связанные со спецификой его гипергенной миграции и радиоактивными свойствами, а также рассматриваются методические вопросы, относящиеся к съемке по потокам рассеяния, которая была разработана авторами на уран раньше, чем на другие элементы.

Методика уранометрической съемки гидросети. В результате изучения ураноносности аллювиальных и пролювиальных образований становится возможным локализовать районы повышенного выноса урана в гидросеть и рационально направить дальнейшие геологические и геофизические поиски.

Уранометрическая съемка гидросети в зависимости от задач, которые перед ней ставятся, может применяться в масштабах 1 : 25 000—1 : 500 000, при этом плотность опробования соответственно составляет от 15—20 до 2—3 проб на 1 км<sup>2</sup>. Шаг отбора проб практически определяется длиной потоков рассеяния урана, наблюдаемых в районе работ. По многочисленным данным опытных и производственных работ, на известных объектах длина потоков рассеяния урана в пределах различных ландшафтных зон и на месторождениях различного генезиса колеблется от 200—300 м до 1—2 км, иногда достигая 5—6 км. Средняя длина потоков рассеяния составляет обычно 500—1500 м.

При рекогносцировочных работах опробование отложений гидросети проводится в масштабе 1 : 200 000—1 : 500 000 с расстоянием между точками по маршруту 300—500 м. Маршруты проходятся по рекам, текущим вкrest крупных геологических структур.

Выделение перспективных участков под детальные поиски осуществляется после проведения съемок в масштабах 1 : 100 000—1 : 50 000, реже 1 : 25 000, с шагом отбора проб, равным 100—300 м. При этом исследованию равномерно подвергается вся сеть сухих логов и ручьев, превышающих по длине шаг отбора проб. Обязательность опробования сети мелких боковых логов диктуется тем, что рудный материал в них еще мало разубожен, уранометрические аномалии четко выявляются и легче интерпретируются.

Для проектирования поисковых работ необходимо знать, кроме средней длины потока, степень развития гидросети, характеризующуюся суммарной длиной ее элементов (рек, ручьев, логов), приходящихся на 1 км<sup>2</sup>. При этом нужно иметь в виду, что плотность опробования гидросети меняется в зависимости от выбранного шага отбора проб (наименьшей длины опробуемых логов), так как суммарная длина гидросети определяется главным образом развитием сети мелких боковых логов (длиной 50—400 м).

При малой плотности гидросети на поисковом планшете (<0,7 пог. км на 1 км<sup>2</sup>), не обеспечивающей достоверной оценки ураноносности территории, отбор проб из логов и ручьев дополняется маршрутным опробованием рыхлых отложений нерасчлененных покровов. В общем случае маршрутное опробование деловых слесей вкrest линии водоразделов, на участках монотонных

расчлененных боковыми притоками. Развитие заболоченных участков на склонах или в долинах определяет направление маршрута вдоль верхней по рельефу границы (кромки) болота, с отбором проб из заболоченных мест на расстоянии 10—15 м от кромки.

Выполнение полевых работ по уранометрической съемке гидросети заключается в равномерном и систематическом отборе проб аллювиальных и пролювиальных отложений ручьев и сухих логов, согласно выбранному шагу отбора, в документации характера и местоположения уранометрических проб. В пробу отбирается мелкий глисто-глинистый, органический, реже песчаный материал современных русловых отложений (донных осадков) на участках русла ручья, благоприятных для накопления урана, в количестве 50—100 г. Опробование сухих логов ведется по их осевой части, являющейся ложом для стекания временных водотоков, транспортирующих рудный материал в твердой и жидкой фазе. От правильности выбора местоположения и материала пробы во многом зависит успех проводимых работ, особенно при мелкомасштабной съемке, когда одна-две пробы характеризуют ураносность больших участков площади водосбора.

Специальные исследования баланса урана в различных фракциях аллювиальных отложений вдоль русла в механических потоках рассеяния показывают, что относительное количество урана в наиболее мелкой фракции (—0,5 мм или —0,25 мм) к устью сильно возрастает за счет резкого уменьшения его в более крупных фракциях.

При солевом рассеянии урана мелкозернистая и тонкодисперсная часть донных осадков, особенно при обогащении их органическим веществом, является наиболее представительной и служит основным носителем урана в аллювии и, таким образом, определяет формирование солевых потоков рассеяния урана в твердой фазе. Практика показала, что мелкозернистый аллювиальный материал, отбираемый при уранометрической съемке отложений гидросети, является в общем случае достаточно представительным для выявления потоков рассеяния почти всех элементов.

Собранные в процессе съемки пробы донных осадков, помимо люминесцентного анализа на уран, должны подвергаться спектральному анализу на широкий круг элементов для комплексной оценки металлоносности исследуемой территории и выявления возможных элементов-спутников уранового оруденения.

Оценку ураносности малоисследованных регионов полезно начинать с изучения спектральным и люминесцентным методами взвесей рек, по которым для отдельных районов уверенно прослеживается вынос металлов из рудных месторождений на расстоянии многих километров.

При мелкомасштабных поисках и оценке ураносности больших территорий целесообразно заменять отбор проб радиометрическим прослеживанием потоков рассеяния; более рационально сопровождать металлометрическое опробование измерениями  $\gamma$ -активности по маршруту.

Выявленные в аллювии уранометрические аномалии подвергаются детализации с более частым шагом отбора проб при тщательном опробовании всех мелких элементов гидросети. Целью детализации является максимальное сужение площадей, выделяемых под крупномасштабные поисковые работы.

Методика ореольной уранометрической съемки. Ореольная уранометрическая съемка заключается в отборе проб рыхлых образований по заранее разбитой на местности топографической сети, ориентированной вкrest простирающихся рудовоспных структур (ореолов), с поверхности, из лунок, закопшек или специальных бурок и неглубоких скважин в зависимости от необходимой глубины отбора, с последующей обработкой проб и определением в них урана.

Основное применение ореольная уранометрическая съемка находит при работах в масштабах крупнее 1 : 25 000, однако в зависимости от поставленной задачи может быть использована и в более мелких масштабах.

Уранометрическая съемка может быть весьма эффективно применена для массовых поисков урана при относительно небольших затратах, которые сводятся к стоимости анализа на уран металлометрических проб. Использование с этой целью громадных ежегодных объемов металлометрической съемки позволит охарактеризовать ураноносность больших площадей. По комплексу сопутствующих элементов во многих случаях возможно достаточно однозначно интерпретировать выявленные уранометрические аномалии. Основная задача уранометрической съемки — выявление перспективных участков под поиски урановых месторождений — решается при этом наиболее полно и с необходимым опережением.

При выборе шага отбора проб по профилю необходимо учитывать, что ширина ореола, как правило, значительно превышает размеры рудных тел, что во многих случаях обусловлено не только рассеянием рудной залежи, выходящей под рыхлые образования, но и поступлением значительного количества металла при рассеянии ее первичного ореола.

Шаг отбора должен быть выбран с таким расчетом, чтобы зафиксировать ореол рассеяния в 2—3 точках по профилю. Обычно при работах масштаба 1 : 10 000—1 : 5 000 шаг отбора равен 10—20 м, реже 5—10 м (при малой мощности рыхлых образований). Выбранную сеть наблюдений необходимо корректировать в процессе работ с учетом размеров выявляемых ореолов.

Большое значение для эффективного применения ореольной уранометрической съемки имеет правильный выбор горизонта отбора или так называемого представительного горизонта. Его положение определяется вертикальными размерами ореолов, сохранностью их в данном геохимическом ландшафте, характером и мощностью рыхлых отложений и пр. В автономных ландшафтах аридных областей, в условиях мощности автохтонного покрова менее 2,5—3 м в полярных условиях и тундре, на крутопадающих склонах, а также в подчипенных

шафтах гумидных областей (заболоченные понижения рельефа, марш, поймы крутых заболоченных долин и т. п.) отбор проб осуществляется с поверхности (глубина 10—15 см).

В пределах автономных ландшафтов гумидных областей, в том числе в районах развития многолетней мерзлоты, при мощности деятельного слоя более 2 м представительный горизонт отбора залегает, как правило, на глубине 0,7—1,0, реже до 1,5 м, что связано с выщелачиванием урана из приповерхностной части ореолов.

При устойчивом типе урановых руд (например, кварц-пастураловый тип) механические ореолы и в гумидных районах могут иметь открытый характер. На участках, закрытых мощным покровом рыхлых образований, нередко аллохтонного происхождения, где возможны погребенные ореолы, глубина отбора проб увеличивается, и съемка производится путем опробования забоев мелких скважин, проходимых с помощью ручного и механического бурения или завалвания.\*

Опыт показывает, что наиболее представительной частью рыхлых образований являются фракции с размером зерен — 0,5 мм. Развитие урановых ореолов в мелкозернистых и тонкодисперсных образованиях обусловлено особенностями минералогии и гипергенной геохимии урана: неустойчивостью большинства урановых минералов и способностью их к измельчению, а также широким развитием процессов сорбции мигрирующего в водах урана илесто-глинистыми отложениями и гумусом. В некоторых случаях (при крупнообломочном характере разрушения рудных выходов) крупные фракции лучше представлены в рыхлых образованиях и содержат больше урана.

Однако проведение съемки с ориентировкой на крупные фракции (около 1—5 см) неэкономично и значительно более трудоемко, так как при этом вводятся дополнительные операции: дробление и квартование проб, представительный вес которых превышает 5 кг. Поэтому в общем при механическом рассеянии рудного вещества, если не происходит выщелачивания урана и отсутствует дальнеприосный лёссовидный материал, ореол рассеяния следует оконтуривать по мелкой фракции.

Правильность выбора фракции для анализа контролируется экспериментальными работами в пределах известных в районе поисков рудопроявлений или месторождений урана.

Обычный вес исходных уранометрических проб составляет 100—200 г, из которых через сито 0,5 мм высеивается навеска 10—20 г. В условиях сухого климата просеивание может выполняться на точке отбора пробы.

\* С этой целью применяются специальные механизированные средства: агрегат СВА-2, самоходные установки типа СУГП и т. п.

Обработка проб уранометрической съемки сводится к отсеиванию выбранной фракции с последующим пстиранием ее до состояния пыли на специальных растирочных станках.\*

Обнаруженные аномалии проверяются сначала путем повторного отбора проб в нескольких характерных точках с повышенным содержанием урана, а затем детализируются по более густой сети.

При проверке выявленных ореолов рассеяния горными выработками необходимо учитывать, кроме геологоструктурной обстановки участка аномалии и природы ореолов рассеяния, вероятное смещение эпицентра ореола вниз по склону, зависящее от угла наклона местности и мощности перекрывающих отложений. Иногда такое смещение наблюдается по простиранию пласта (рудной жилы) при почти горизонтальной поверхности участка.

## 5. ОБРАБОТКА И ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ УРАНОМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Обработка результатов уранометрической съемки. Этот вид работ имеет своей целью составление сводных карт и разрезов, отражающих распределение урана в русловых отложениях гидросети, элювиально-делювиальных и других рыхлых отложениях или коренных породах, в зависимости от модификации съемки. Соответствующими условными обозначениями на картах и разрезах различаются пробы с фоновым и аномальным содержанием.

В практике работ при построении карт уранометрического опробования гидросети принято обозначать пробы кружками с соответствующей штриховкой или закраской. Удобно при этом концентрации урана разбивать на ряд интервалов в соответствии с интенсивностью потоков, например,  $<5 \cdot 10^{-4}\%$  (фон),  $(5-10) \cdot 10^{-4}\%$ ,  $(10-20) \cdot 10^{-4}\%$  или на более крупные интервалы в случае богатых потоков. Помимо этого строятся карты распределения элементов-спутников.

При выполнении площадных поисков с целью выявления ореолов принято изображать результаты в виде графиков распределения урана по профилям и карты изолиний, реже в виде корреляционной карты или карты аномальных осей.

При построении карт изолиний может быть выбрана та или иная шкала условных обозначений, в зависимости от интенсивности ореолов, например 10, 10-25, 25-50, 50-100,  $100 \cdot 10^{-4}\%$ .

\* В некоторых случаях, при солевом характере ореолов и потоков, операция растирки проб исключается (если не предусматривается специальный анализ) и отсеивание из пробы фракция  $-200$  меш поступает на люминесцентный анализ.

После составления графических материалов производится интерпретация и оценка выделенных аномалий.

**Геохимический фон.** Для выделения металлометрических аномалий на картах и разрезах необходимо знать величину местного геохимического фона урана и других металлов для коренных пород и рыхлых отложений данного участка. Фон определяется при обработке полученных данных с помощью вариационной статистики. Методика определения фона основана на представлении о логнормальном законе распределения элементов в горных породах (Ра-зумовский, 1948; Аггевс, 1954).

С помощью вариационной кривой или кривой накопленных частот, построенной в полулогарифмическом масштабе, определяется величина преобладающих концентраций (местный геохимический фон), соответствующая абсциссе максимума вариационной кривой или медиане кривой накопленных частот. Верхняя граница колебаний фона строго определяется величиной  $M + 3\sigma$ , где  $M$  — средний логарифм распределения,  $\sigma$  — стандартное отклонение.

При отсутствии оруденения вариационная кривая отражает распределение нормальных концентраций урана в коренных породах, элювиально-делювиальных или аллювиальных отложениях. Наличие на исследованной площади уранового оруденения, сопровождающегося ореолами и потоками рассеяния, приводит к асимметрии кривой, вызываемой влиянием проб с аномальными концентрациями. В этом случае нижняя граница аномальных содержащий оценивается величиной  $M + 2\sigma$ .

Таким образом, построение вариационных кривых служит одним из приемов интерпретации, позволяющих установить наличие аномального распределения металлов на поисковой площади и пределы колебания величины фона. Сложная кривая, имеющая два или более максимумов, может указывать на наличие нескольких видов распределений, обусловленных различными по природе источниками выноса урана.

При обработке необходимо сопоставлять данные по содержаниям урана для проб одинакового состава (ил, глина, песок, почва), что имеет существенное значение при интерпретации сложных кривых, в особенности в условиях развития солевых ореолов и потоков рассеяния, когда распределение урана в песчаных пробах может весьма значительно отличаться от распределения его, например, в болотных почвах.

Выделенные на карте (по аномальным значениям концентрации урана в пробах) ореолы и потоки рассеяния урана, подтвердившиеся после лабораторного и полевого контроля, детализируются и подвергаются дополнительным исследованиям с целью их интерпретации и оценки поисковых перспектив.

Интерпретация результатов уранометрических съемок. Как и всякий другой геофизический или геохимический метод, уранометрическая съемка не может одно-

значно ответить на вопрос о характере и параметрах источника, обусловившего появление аномалии, без дополнительных сведений о геологической и геохимической обстановке, в которой находится этот источник.

Уранометрическая съемка наряду с ореолами и потоками рассеяния урановых месторождений может фиксировать геохимические аномалии, связанные с отдельными фациями пород, зонами гидротермального изменения, грейзенами, пегматитами и другими геологическими образованиями, которые не содержат уранового оруденения, но несут повышенные содержания урана, а также ореолы в потоки рассеяния месторождений нерадиоактивных металлов, в которых уран является геохимическим спутником. Такие аномалии, кроме последнего случая, обычно не имеют поисковой ценности и должны исключаться из дальнейшего рассмотрения.

На практике для конкретных условий часто удается установить ряд характерных признаков рудных и нерудных аномалий, которые выявляются в результате дополнительных исследований. К таким исследованиям относятся: изучение вещественного состава рыхлых отложений в пределах аномалий, распределения урана и радия в различных по крупности, удельному весу и другим свойствам фракциях этих отложений и некоторых изотопных соотношений; определение подвижности соединений урана и геохимической ассоциации урана с другими элементами; выяснение геометрических параметров аномалии (формы, размеров, горизонтального и вертикального градиента изменения концентраций); математическая оценка продуктивности потоков; расчет запаса урана в рудном выходе (Соловов, 1959), установление геологической позиции аномалии и проведение гидрохимического опробования.

Некоторые из перечисленных исследований достаточно просты и возможны в условиях полевых работ при наличии полевой лаборатории; другие, как, например, изучение изотопного состава, представляют значительные трудности.

Объем дополнительных исследований в различных геолого-геохимических условиях и на разных этапах поисковых работ неодинаков. Наиболее сложной обычно является оценка перспективности участков, выделяемых по солевым оторванным ореолам и по потокам рассеяния урана, особенно в тех случаях, когда другие признаки уранового оруденения на поверхности отсутствуют.

Механические ореолы при детальных поисковых работах, как правило, не требуют вспомогательных исследований, так как имеющиеся сведения о связи таких ореолов с оруденением и данные других методов позволяют переходить непосредственно к проектированию и проходке горных проверочных выработок.

Ниже рассматриваются некоторые вопросы интерпретации потоков рассеяния и эпигенетических оторванных ореолов урана

Интерпретация и проверка уранометрических аномалий в ложениях гидросети существенно отличаются от расчленения и вскрытия геохимических и радиометрических аномалий

автономного ландшафта \*, поскольку по потокам рассеяния оконтуривается как потенциально перспективная достаточно обширная водосборная площадь аномального участка ручья или реки.

Необходимость предварительной оценки аномалий вызывается трудоемкостью и значительной стоимостью последующих детальных поисков, которые поэтому должны ориентироваться на водосборную площадь только рудных потоков.

Расшифровка аномалии начинается со знакомства с геологическим строением участка на местности для определения связи аномалии с типом пород, структурами, поднятыми источниками и выяснении ландшафтных особенностей местности. Для получения наиболее полных сведений о геологии аномального участка используются имеющиеся данные аэрофото-, аэромагнитной и аэрогамма-съемок и других методов.

Важнейшим этапом интерпретации является определение типа уранометрической аномалии. Принадлежность аномального участка к той или иной ландшафтной зоне позволяет лишь ориентировочно предсказать возможный тип выщелоченных потоков и ореолов рассеяния. В табл. 11, 12, 13 перечислены основные признаки потоков и вторичных ореолов рассеяния урана различного происхождения и простейшие приемы их диагностики.

Таблица 11

*Признаки механических и солевых потоков рассеяния урана и способы их распознавания*

Признаки	Методы определения
----------	--------------------

### Механические потоки

Сравнительно равномерные содержания урана в различных по крупности минеральных фракциях аллювия

Отсутствие связи местоположения аномалии с постоянными или переменными водосточниками

Несоответствие переход урана в водную вытяжку ( $< 60-70\%$ )

Сравнительно равномерное распределение урана по вертикальному разрезу потока или обогащение им приотливочной части

Разделение аномальных проб на фракции путем ситования (с предварительной отмывкой) и люминесцентный анализ выделенных фракций

Устанавливается в процессе детализации аномалий

Люминесцентный анализ аномальных проб с обработкой 1%-ным раствором углекислого натрия и сопоставление полученных данных с результатами анализа на основе кислотного разложения пробы

Обробование стенок шурфов в необходимых местах в пределах аномалий

\* Подробнее см. в гл. V.

Признаки	Методы определения
<p>Близкое к равновесному соотношение урана и радия</p>	<p>Радиохимический анализ аномальных проб. Приближенная оценка коэффициента радиоактивного равновесия может производиться также на основе сопоставления данных люминесцентного анализа с эквивалентными содержаниями урана по данным бета-измерений</p>

## Солевые потоки

Резкое преобладание урана в илесто-органической или илесто-глинистой частях в голове потока или эпицентре ореола по сравнению с крупнообломочным материалом аллювия или делювия

Приуроченных максимальных концентраций урана в вертикальном разрезе к торфам, болотным прослоям органического, реже глинистого вещества

Приуроченность пачала потока к местам постоянных или сезонных выходов вод (источникам, мочажинам, заболоченным участкам и т. п.)

Полный или почти полный переход урана в содовую вытяжку (80—100%)

Резкое смещение равновесия в сторону недостатка радия (коэффициент радиоактивного равновесия в пределах 1—40%)

Разделение аномальных проб из ореола или головной части потока ситованием, выделение органической фракции путем отмывки или деления в тяжелой жидкости (уд. вес 2,2) с последующим люминесцентным анализом

Опробование стенок шурфов или канав в необработанной части ореолов и потоков

Устанавливается при детализации аномалий

Люминесцентный анализ аномальных проб с извлечением урана 1%-ным раствором углекислого натрия и сопоставление полученных данных с результатами анализа на основе кислотного разложения проб

Радиохимический анализ аномальных проб. Для приближенной оценки коэффициента радиоактивного равновесия можно сопоставлять содержания урана по данным люминесцентного анализа с эквивалентными содержаниями урана, определенными по  $\beta$  лучам

Оценка перспективности уранометрических аномалий. Критерии рудности уранометрических аномалий вырабатываются для каждого конкретного района. В табл. 12 и 13 приведены некоторые общие признаки связи потоков и эпигенетических оторванных ореолов с оруденением или безрудными породами.

Перспективность территории, выделенной по солевым потокам и эпигенетическим оторванным ореолам, снижается при наличии

Таблица 12

*Признаки рудных и нерудных механических потоков  
и способы их распознавания*

Признаки	Методы определения
<b>Рудные механические потоки</b>	
<p>Наличие обломков руд, первичных или вторичных урановых минералов</p> <p>Присутствие аномальных концентраций элементов, характерных для возможного типа урановых месторождений</p> <p>Локальность аномалий и заметное убывание интенсивности потоков по мере удаления от источника выноса</p>	<p>Разделение аномальных проб по удельному весу в тяжелых жидкостях (статически или в центрифуге) с предварительным отмучиванием. Магнитная и электромагнитная сепарация. При необходимости отбор зерен под бинокляром и минералогический анализ</p> <p>Спектральный анализ уранометрических проб или их отдельных фракций на 25—30 элементов с применением методики, обеспечивающей максимальную чувствительность</p> <p>Устанавливается в результате детализации аномалий</p>

### Нерудные механические потоки

Многочисленность и значительная длина потоков, слабая интенсивность (обычно  $10^{-12}$ — $10^{-4}\%$ ) при небольшом градиенте изменения концентраций урана вдоль потока

Присутствие в аномальных пробах характерных для вмещающих пород акцессорных ураносодержащих минералов, количество которых объясняет повышенные содержания урана в шлахтах по сравнению с отмученным материалом

Отсутствие подвижных форм урана. В соловую вытяжку уран почти не переходит ( $< 10^{-6}\%$ ). Значительное повышение извлечения урана при использовании жестких методов разложения

Корреляция концентраций урана с содержанием Zr, Y и других элементов, характерных для акцессорных минералов, или наличие элементов типоморфных для пород, слагающих площадь водосбора

Устанавливается по результатам съемки и детализации аномалий

Разделение аномальных проб на фракции по удельному весу, минералогическое изучение и анализ тяжелой фракции на уран. Составление полученных данных с результатами минералогических определений в протоочках коренных пород

Люминесцентный анализ аномальных проб на основе извлечения урана: а) 1%-ным раствором соды; б) смесью серной и соляной кислот с фтористым аммонием или сплавлением с содой либо с пиросульфатом калия

Спектральный анализ проб методом полного испарения в канале угольных электродов

*Признаки рудности солевых потоков и эпигенетических  
оторванных ореолов урана*

Признаки	Способы распознавания
Локальность площади развития уранометрических аномалий. Приуроченность аномалий к структурам, которые могут рассматриваться как рудоконтролирующие	Устанавливается по результатам уранометрической съемки и данным о геологическом строении аномального участка
Наличие повышенных концентраций элементов, могущих сопутствовать урановому оруденению	Спектральный анализ на широкий круг элементов с применением методик, обеспечивающих максимальную чувствительность на микроэлементы
Аномальные содержания $\text{Pb}$ , $\text{Ra}$ , $\text{Rn}$ и элементов-спутников в подземных и поверхностных водах	Опробование водных источников или подземных вод в имеющихся или специально проходимых небольших шурфах и законушках (при неглубоком залегании урания подземных вод). Определение химического состава вод. Спектральный анализ сухих остатков или другие виды анализа на различные элементы
Коэффициент радиоактивного равновесия 40—60% и более *	Радиохимический анализ аномальных проб на радий и люминесцентный анализ на уран

\* Часто за счет наложения механических потоков (ореолов) радия.

развитии на площади, измеряемой многими десятками и первыми сотнями квадратных километров, чисто урановых (без сопутствующих элементов) аномалий, приуроченных к области развития пород с повышенным содержанием урана при отсутствии рудоконтролирующих структур.

Наиболее эффективным оценочным критерием чаще всего оказывается ассоциация элементов, сопутствующих урану. В практике работ в потоках рассеяния гидротермальных урановых месторождений фиксировались следующие элементы (в %): свинец (до 1), молибден (до 0,2), мышьяк (0,003—0,1), фосфор (до 0,1—0,2), медь (до 0,2), цинк (до 0,5). Осадочные месторождения урана и пластовые месторождения неясного генезиса в осадочных породах, по имеющимся данным, сопровождаются ореолами и потоками  $\text{As}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{Te}$ ,  $\text{Hg}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Th}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Zn}$ .

В некоторых случаях сопутствующие элементы обнаруживаются в водном ореоле урановых месторождений, например, молибден — до  $160 \cdot 10^{-6}$  г/л при фоне  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л, мышьяк — до  $n \cdot 10^{-3}$  г/л при фоне  $n \cdot 10^{-5}$  г/л и т. п.

Интерпретация по элементам-спутникам возможна не так как некоторые месторождения урана не имеют ясно выраженных спутников или содержание их настолько мало, что...

разубоживание в рыхлых отложениях, они не выделяются над фоном. Кроме того, для многих элементов чувствительность методики количественного спектрального анализа недостаточна.

Иногда полезно с помощью микрохимических методов определять в общем содержании сопутствующих элементов, а только ту их часть, которая находится в подвижной форме и переходит в водные слабощелочные или слабощелочные вытяжки, указывая на важные рудообразующие процессы. В значительно меньшей доле такая форма присутствует в составе вмещающих пород, обуславливающих геохимический фон данного элемента (Ahrens, 1954).

Помимо перечисленных приемов интерпретации в наиболее сложных случаях для оценки природы уранометрических аномалий могут быть использованы способы, основанные на изучении соотношения изотопов уранового и ториевого рядов, а также спинда\*.

Для интерпретации геохимических аномалий некоторые авторы рекомендуют использовать следующие изотопные отношения:

$$\frac{AcX}{ThX}; \frac{Ra}{MsTh_1}; \frac{AcX}{Ra}; \frac{UI}{UI}; \frac{ThX}{Ra} \text{ и т. п.}$$

Использование этих соотношений основано на предположении о различном поведении радиоактивных изотопов при воздействии гипергенных процессов на руды и вмещающие породы. Обнаружение в водах или рыхлых образованиях аномальных для данного района изотопных соотношений предполагает наличие рудного источника урана.

Приведем пример изучения отношений  $ThX : Ra$  для нескольких уранометрических аномалий в пределах гранитных массивов, для чего использованы данные обычного радиохимического анализа 160 проб коренных пород и рыхлых образований (табл. 14).

Из приведенных в табл. 14 данных видно, что валожная урановая минерализация обуславливает понижение отношения  $ThX : Ra$  в коренных породах от 2,4—3,6 до 0,2—1,0. Соответственно в связанных с рудными телами ореолах и потоках рассеяния рассматриваемое отношение также уменьшается от 1,4—2,0 до 0,3—0,9 в делювии и до 0,7—1,5 — в аллювии.

Очевидно, что наличие в металлометрических пробах  $ThX$  отражает в общем случае присутствие равновесных количеств материнского элемента  $RdTh$ . В свою очередь присутствие  $RdTh$  в ореоле и в потоке рассеяния может характеризовать наличие ториевых либо торийсодержащих акцессорных минералов или сорбированного  $MsTh_1$ .

\* Исследованию естественных изотопов применительно к задачам геологии и геохимии посвящены работы Н. Е. Старика, В. В. Чердынцева, И. П. Кошелева, Н. Г. Сыромятникова, А. П. Тугарникова, А. С. Вершнина, В. С. Глебовской, М. С. Каштана и др. (Н. Старик, Ф. Старик, Михайлов, 1958).

Поэтому отношение  $T_{Hx} : Ra$  является функцией геохимических и минералогических факторов, которые должны учитываться при расшифровке уранометрических аномалий.

Таблица 14

Отношение  $T_{Hx} : Ra$  для уранометрических аномалий

Объект исследования	Число образцов	$T_{Hx} : Ra$ в единицах равновесного тория, относительного к единице равновесного урана
Незмещенные вмещающие граниты	18	2,4—3,6
Граппты с урановой минерализацией . . . . .	5	0,2—1,0
Дельтовый с фоновым содержанием урана . . . . .	37	1,4—2,0
Рудные солевые ореолы . . . . .	73	0,3—0,9
Рудные солевые потоки . . . . .	17	0,7—1,5*
Нерудный поток . . . . .	6	2,5—4,4

\* В хвостовой части потока.

Связь ореолов и потоков с коренным оруденением. В зависимости от геолого-геохимических особенностей района поисков форма связи ореолов и потоков с коренным оруденением может быть различной. В простейшем случае механический поток обязан своим происхождением открытому механическому ореолу, связанному с рудным выходом. Значительно более сложная связь потоков рассеяния с оруденением наблюдается для слепых рудных тел, особенно в условиях химического выветривания, когда появляются промежуточные звенья (водный ореол, эпигенетический ореол в твердой фазе, выщелоченный первичный ореол и т. п.).

Приведем два примера, иллюстрирующие случаи сравнительно простой связи ореолов и потоков рассеяния урана и элементов-спутников с месторождениями.

*Месторождение 1.* Урановое оруденение приурочено к тектоническим зонам дробления изверженных пород щелочного состава. Руды с поверхности представлены вторичными минералами урана: отенитом, карпотитом, цейверитом и др. В составе руд минералогическим и главным образом спектральным анализом отмечаются в повышенных количествах  $Tl$ ,  $Pb$ ,  $Cu$ ,  $Ag$ ,  $Ba$ ,  $Sr$ .

Участок месторождения относится к гольцовому типу ландшафта, характеризуется слабым развитием растительного и почвенного покрова и сплошной многолетней мерзлотой (действующей с 0,4—1,0 м).

Дельтапальные образования имеют щебенчатый характер. Дельта рек слабо заболочены, аллювий представлен крупнозернистым материалом без видимого наличия органической и илесто-глинистой составляющей. Ореолы и потоки рассеяния месторождения четко выражены, имеют механический характер и несут тот же комплекс элементов-спутников, который отмечается в рудах. Содержание урана и других элементов в рудах, ореолах и потоках рассеяния соответственно уменьшаются (кроме Pb, см. табл. 15).

Таблица 15

*Содержание урана и элементов-спутников в рудах, ореолах и потоках рассеяния*

Наименование объекта	Концентрация элементов					
	U	Tl	As	Ba	Ag	Pb
Руда . . . . .	0,п	0,03—0,1	0,03—0,1	0,п—п	—	0,0п—0,п
Вторичные ореолы рассеяния . . . . .	0,0п	0,01—0,03	0,01—0,03	—	Сл.	0,00п—0,0п
Потоки рассеяния	0,00п	0,001—0,01	0,005—0,01	0,п—п	*	0,0п—п

Протяженность потоков для различных элементов колеблется и составляет в среднем 1—3 км (рис. 52). Пример показывает, что интерпретация подобных уранометрических аномалий в гидросети проводится сравнительно просто по наличию характерного комплекса элементов-спутников.

**Месторождение 2.** Развитие ореолов и потоков рассеяния связано со слепым урановым месторождением властового типа в осадочных породах. Месторождение характеризуется широким развитием первичных ореолов U, As, Ge и Hg. Первичные ореолы имеют мощность порядка 50—110 м по урану и 100—200 м по мышьяку (рис. 53).

На выходе первичных ореолов под рыхлые образования формируются вторичные ореолы рассеяния этих же элементов и при дальнейшей миграции рудного вещества потоки рассеяния (рис. 54). Комплекс элементов, наблюдаемый в рудных телах (U, As, Ge, Hg), четко прослеживается в зоне первичных ореолов, во вторичных ореолах и потоках рассеяния. Процесс рассеяния рудного вещества по отдельным элементам несколько различен: более подвижные из них мигрируют солевым путем (U) с последующей сорбцией на органическом материале довых отложений, менее подвижные (Hg и частично As) рассеиваются в основном механически, формируя обломочные ореолы и потоки рассеяния.

Пример иллюстрирует непрерывность связи рудных тел с ореолами и потоками рассеяния и показывает возможность поисков урановых месторождений по элементам-индикаторам, чему способствует вертикальная зональность в распределении урана, мышьяка и германия в зоне первичного уранового ореола рассеяния.

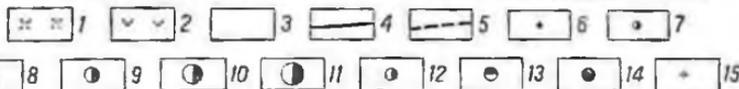
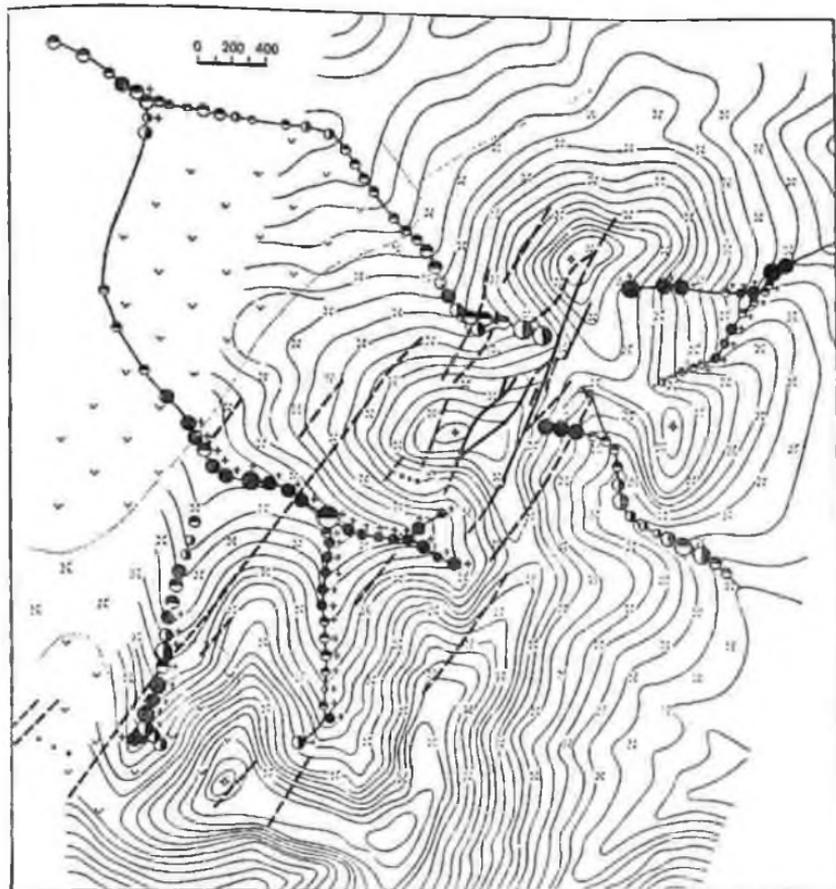


Рис. 52. Поток рассеяния урана и элементов-спутников гидротермального уранового месторождения

1 — сенинты; 2 — породы эффузивно-туфогенной толщи; 3 — породы карбонатовой толщи; 4 — ураноносные зоны, проследенные горными выработками; 5 — ураноносные зоны, предполагаемые по данным  $\gamma$ -съеми; 6 — точки высокой  $\gamma$ -активности дельювия; 7—11 — размеры кружочков отвечают содержаниям урана в пробах аллювия в  $10^{-4}\%$ ; 7 —  $< 5$ , 8 — 5—10, 9 — 10—20, 10 — 20—50, 11 — 50—500; 12—14 — содержание таллия в тех же пробах аллювия (обозначения 7—11 и 12—14 на рисунке совмещены); 12 —  $< 0,001\%$ , 13 — 0,001—0,005%, 14 — 0,005—0,01%, 15 — потоки рассеяния мышьяка (0,005—0,01%)

Промысел № 20 и № 21  
восточная часть

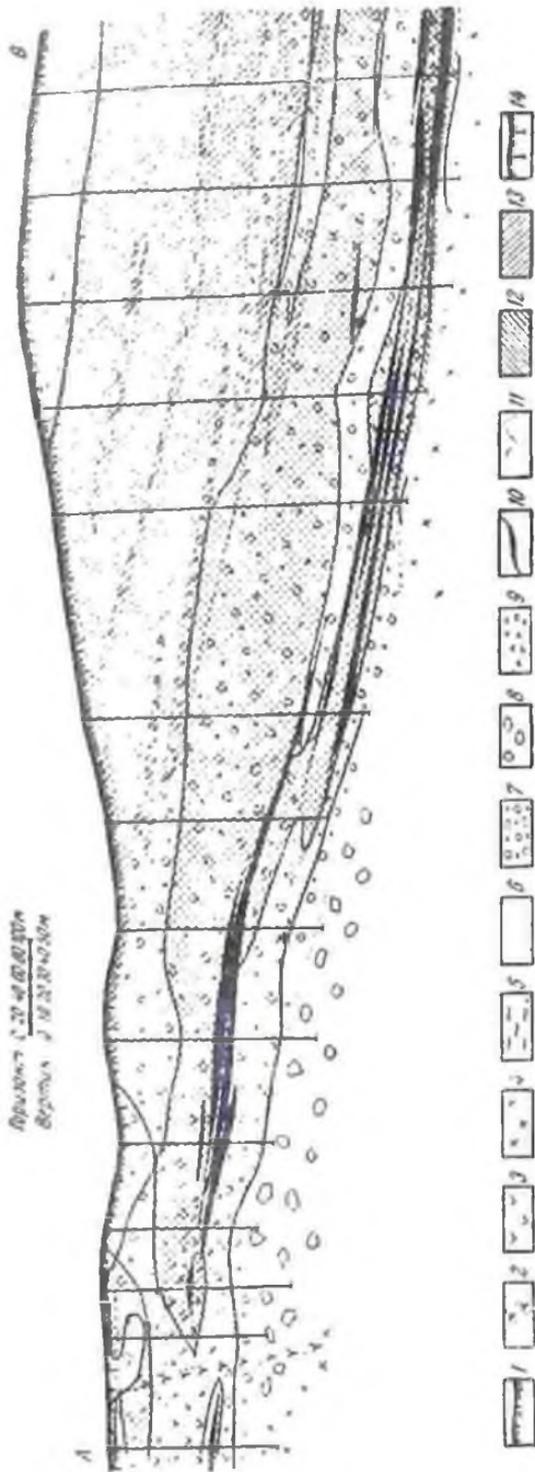


Рис. 53. Геолого-геохимический разрез по линии АВ (план см. на рис. 51)

1 — почвенно-делювиальный шпороф; 2 — далак систит-диоритового порфира; 3 — туфославы; 4 — гранодиориты; 5 — алевриты и аргиллиты; 6 — песчаники и туфоссапунки; 7 — конгломераты и гравелиты; 8 — глыбовые конгломераты; 9 — конгломераты; 10 — рудные тела; 11 — геологически-граниты; 12 — первичный ореол рассеяния (содержание  $5-100,10-4\%$ ); 13 — первичный ореол рассеяния мышьяка (содержание  $0,02-3\%$ ); 14 — сважины разведочного бурения

Детальные поиски на перспективных участках, выделенных по потокам рассеяния урана, проводятся с помощью комплекса геолого-геофизических и геохимических методов обычно в масштабах 1:25 000 или крупнее. Выбор поисковых методов определяется

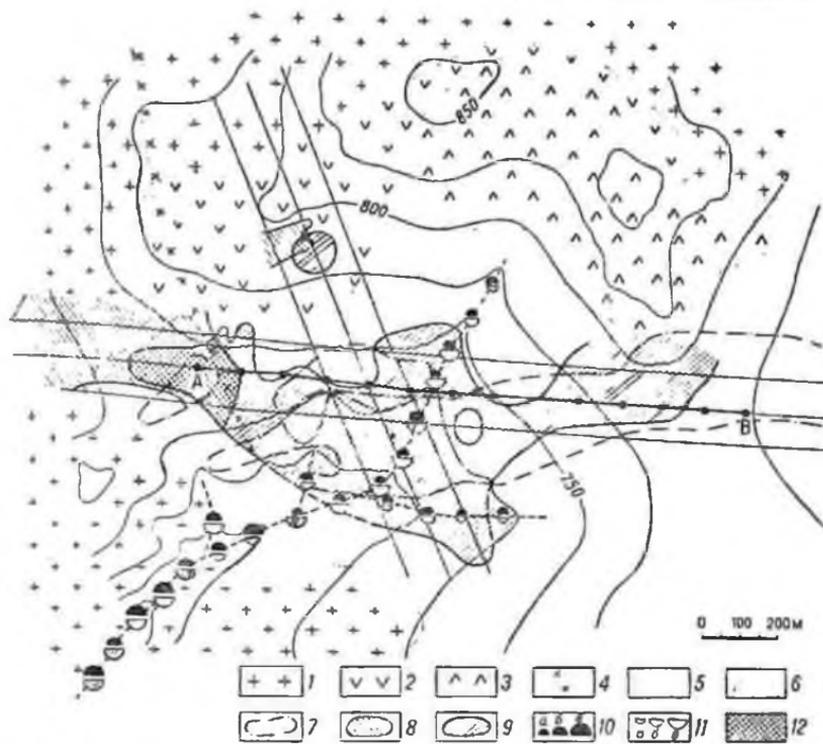


Рис. 56. Вторичный ореол и поток рассеяния слепого уранового оруденения пластового типа (разреза см. на рис. 53)

1 — биотитовые граниты и гранодиориты; 2 — туфоплавы; 3 — андезит-базальты; 4 — дайка спесит-диоритового порфира; 5 — осадочно-туфовые породы; а — геологические границы; 7 — контуры рудных тел, залегающих на глубинах 50—200 м; 8 — вторичный ореол рассеяния урана (содержание урана 5—17,10—4%, глубина отбора проб 10 см); 9 — вторичный ореол рассеяния мышьяка (содержание 0,007—0,07%, глубина отбора проб 10 см); 10 — содержание урана в пробах аллювия в н·10<sup>-4</sup>%: а — < 5, б — 5—10, в — 10—30; 11 — содержание мышьяка в пробах аллювия: а — < 0,003%, б — 0,003—0,01%, в — 0,01—0,03%; 12 — система ипробованных профилей

степенью обнаженности изучаемой площади и характером развитых на ней ореолов рассеяния, обусловленных биоклиматическими, геологическими и геоморфологическими особенностями местности.

Отметим основные моменты, касающиеся техники проведения поисков на участках, выделенных по данным ураниметрической съемки гидросети. Для правильного выбора методики поисковых работ исследуемый участок должен быть подвергнут геологическому осмотру, сопровождаемому радиометрическими наблюдениями. При этом устанавливается также характер почвенного покрова, наличие альпийских и делювиальных образований и другие особенности

Сеть наблюдений при проведении радиометрических и ореольных геохимических съемок разбивается полунструментальным способом, в залесенных районах просеки прорубаются только по магистралям. Расстояния между профилями и точками наблюдений обычно варьируют в пределах от  $250 \times 20$  до  $50 \times 10$  м.

В остальном методика и техника проведения съемок при проверке уранометрических аномалий в аллювии не отличаются от общепринятой.



Дальнейшее развитие уранометрической съемки должно заключаться прежде всего в усовершенствовании аналитических методов определения урана на основе автоматизации существующих способов (люминесцентный, хроматографический анализы). Такое усовершенствование позволит повысить производительность работ и удешевить уранометрическую съемку.

Развитие методов γ-спектрометрии, дающих возможность производить раздельное определение радия, тория и калия, начиная с кларковых содержаний, позволит широко применять радиометрический экспресс-анализ при геохимических съемках.

Разработка производительных и чувствительных методов радиометрического анализа на различные радиоэлементы открывает новые перспективы в развитии геохимических поисков месторождений урана. Кроме того, простые способы определения радиоактивных изотопов уранового, ториевого и актинового рядов помогут успешно развивать методы интерпретации геохимических аномалий путем выявления характерных для различных типов аномалий изотопных соотношений. Представляет интерес также разработка металлометрической съемки на повний.

Накопление материала по изучению изотопных отношений и элементов-спутников, а также других характерных особенностей процессов рассеяния рудных месторождений позволит разработать дополнительные критерии рудности геохимических аномалий.

## ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ПОИСКИ

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Гидрохимический метод поисков урановых месторождений основан на выявлении повышенных концентраций радиоактивных элементов в поверхностных и подземных водах, омывающих рудные тела и их литохимические ореолы. Характерной особенностью водных ореолов рассеяния является их динамичность, смещение относительно рудных залежей, сезонные изменения размеров и концентрации радиоактивных элементов в водах. Исследованиями последних лет установлено, что в водных ореолах рассеяния урановых месторождений в тех или иных количествах могут присутствовать уран, радон, радий, гелий, радиоактивные изотопы урана, радия и тория, различные металлы-спутники уранового оруденения, такие как молибден, мышьяк, свинец, ванадий, фосфор, селен и др.

Главными элементами, повышенное содержание которых в водах имеет основное поисковое значение, являются уран, радон и радий. Остальные элементы играют роль косвенных поисковых признаков и используются по мере необходимости при оценке и интерпретации выделенных радиоактивных аномалий.

Относительное поисковое значение элементов-индикаторов, присутствующих в водных ореолах рассеяния урановых месторождений, определяется миграционными свойствами этих элементов в различных геохимических условиях, типом уранового оруденения, условиями циркуляции вод и геологоструктурными особенностями района исследований.

Ниже приводится краткая характеристика условий обогащения вод радиоактивными и некоторыми сопутствующими элементами.

**У р а н.** В окислительных условиях зоны гипергенеза уран обладает высокой миграционной способностью. В восстановительной обстановке его подвижность резко снижается. Это обуславливает, с одной стороны, интенсивный вынос урана из пород и руд и рассеяние его в окислительных условиях активного водообмена, с другой — осаждение и концентрацию урана из вод в восстановительных условиях.

На рис. 55 показаны расчетные поля устойчивости четырех- и шестивалентного урана в водном растворе в зависимости от значений pH и Eh. На этом рисунке нами схематично выделены три типовые обстановки миграции урана: 1) окислительная, в которой он мигрирует наиболее интенсивно; 2) переходная, характеризующаяся неустойчивыми условиями миграции, и 3) восстановительная, где миграция урана затруднена.

Геохимические обстановки при поисковых работах могут быть установлены как путем непосредственных измерений Eh и pH так



прочих равных условиях могут иметь кислые сульфатные воды зон окисления сульфидов, щелочные и слабощелочные воды карбонатного и бикарбонатного состава и воды, содержащие органические вещества. Абсолютное содержание урана в водах определяется степенью растворимости природных соединений урана и химическими свойствами простых и комплексных соединений уранил-иона в водных растворах. Концентрация и устойчивость этих соединений в природных водах в окислительных условиях зависит главным образом от значения рН. На величину рН подземных вод оказывает стабилизирующее воздействие состав вмещающих пород, поэтому она преимущественно находится в пределах 5—8. При этих значениях рН содержание урана в водах в устойчивой растворенной форме может составлять не более  $n \cdot 10^{-3}$  г/л. Более высокие концентрации урана в водах, порядка  $n \cdot 10^{-2}$  г/л, наблюдаются только в контурах рудных залежей с черпчевым оруденением и за их пределы не распространяются вследствие неустойчивой формы урана в растворе. Другие вторичные минералы урана и настурал растворяются медленнее, чем черны, и содержание урана в омывающих водах составляет  $n \cdot 10^{-3}$  —  $n \cdot 10^{-5}$  г/л.

Уран в природных водах находится в шестивалентном состоянии. Формы его существования в водном растворе обуславливаются значениями рН и химическим составом вод. В слабо кислых водах уран может находиться в виде уранил-иона, сульфатных и органических соединений. В нейтральных и слабо щелочных водах он присутствует в виде комплексных уранил-карбонатных соединений. Кроме этого, уран может переноситься водами в виде золь, полимеризованных и коллоидных молекул, а также в сорбированном виде на взвешях и коллоидах других веществ. При рН вод, близком к нейтральному значению, уран может присутствовать одновременно в нескольких формах.

В условиях переходных от окислительных к восстановительным, содержание урана в водах нерудоносных пород составляет  $n \cdot 10^{-7}$  —  $n \cdot 10^{-6}$  г/л, ураноносных —  $n \cdot 10^{-6}$  —  $n \cdot 10^{-5}$  г/л, нередко достигая  $(1-5) 10^{-4}$  г/л. В восстановительных условиях содержание урана в водах как рудоносных, так и безрудных пород составляет в большинстве случаев  $n \cdot 10^{-7}$ , иногда  $(1-3) 10^{-6}$  г/л.

Формирование общего радиохимического состава подземных вод существенно зависит от ландшафтно-климатических условий, что отмечалось многими исследователями (Батулия, 1962; Германов и др., 1959; Лопаткина, 1964; Перельман, 1965 и др.).

В разных биоклиматических зонах воды одинаковых по литолого-петрографическому составу водовмещающих пород характеризуются разной радиоактивностью. Особенно четко влияние климатического фактора проявляется на величинах фоновых концентраций урана в подземных водах, циркулирующих в самой верхней части зоны гипергенеза, характеризующейся интенсивным выщелачиванием. Для этих вод является закономерным увеличение фоновых содержаний урана с ростом общей минерализации вод при переходе

от районов избыточного увлажнения к районам засушливого климата (Германов и др., 1959). Эта закономерность прослеживается как в условиях горизонтальной климатической зональности в направлении с севера на юг, так и в горных районах, имеющих вертикальную климатическую дифференциацию.

Практически выделяются две климатические зоны — гумидная и аридная, — существенно отличные по величинам фоновых содержания урана в грунтовых водах, а также по протяженности водных ореолов рассеяния урана.

Гумидная зона характеризуется повышенной водообильностью и проницаемостью пород в условиях избыточного увлажнения, неглубоким залеганием подземных вод от поверхности. Подземные воды этой зоны, даже в верхних частях разреза, обеднены кислородом, который быстро затрачивается на окисление органики. Большое влияние на выщелачивание урана из горных пород, особенно в лесостепных районах оказывает образование органических кислот при повсеместных процессах окисления растительных остатков. В целом природные условия гумидной зоны являются благоприятными для интенсивного выноса урана из пород верхней части разреза, а общая высокая водообильность районов данной зоны приводит к рассеиванию и разубоживанию выщелоченного из месторождений урана. В случае выхода подземных вод на поверхность происходит частичное закрепление урана в рыхлых образованиях многочисленными осадителями. Подземные воды на безрудных участках характеризуются низкими содержаниями урана порядка  $n \cdot 10^{-7}$  —  $n \cdot 10^{-6}$  г/л.

На значительной территории гумидной зоны развита многолетняя мерзлота, обуславливающая специфические гидрогеологические условия этих районов. В верхнем оттаивающем слое пород образуются надмерзлотные подземные воды, которые в отличие от мерзлотных могут быть не связаны с рудами и их литохимическими ореолами. Для этого слоя характерны общая тенденция рассеивания рудных элементов и низкие фоновые содержания их в природных водах.

Аридная зона характеризуется значительно большей глубиной залегания подземных вод, меньшей водообильностью и преимущественно щелочным характером выщелачивания пород. Глубина проникновения кислородсодержащих вод здесь значительно больше, чем в районах гумидной зоны. В условиях недостатка влаги и процессов испарительного концентрирования подземные воды характеризуются повышенной минерализацией и более высокими фоновыми концентрациями урана ( $n \cdot 10^{-6}$  г/л), изменяющимися в течение года в несколько раз.

Высокая миграционная способность урана в окислительных условиях и низкая в восстановительных, зависимость устойчивости его в водных растворах от ландшафтно-климатических условий, подверженность адсорбции и осаждению из природных вод с другими солями, способность образовывать труднорастворимые соединения с кремниевой кислотой, фосфором, ванадием, мышьяком и многими

другими компонентами пород и вод — все эти свойства обуславливают аномально высокие содержания урана в водах не только вблизи месторождений, но и в безрудных породах, в особенности если последние характеризуются повышенной радиоактивностью. Выделение таких «ложных» аномалий представляет довольно сложную задачу и будет рассмотрено ниже.

**Р а д и й.** Фоновые концентрации радия в водах кислых магматических пород составляют  $5 \cdot 10^{-12}$  г/л, в водах осадочных, метаморфических и основных магматических пород (любого состава, кроме хлоридно-натриево-кальциевых) они не превышают  $1 - 2 \cdot 10^{-12}$  г/л. Более благоприятны условия обогащения радием высокоминерализованных бессульфатных хлоридно-натриевых и кальциевых вод глубоких горизонтов, находящихся в восстановительной обстановке, где содержание радия достигает  $n \cdot 10^{-9}$  г/л.

В породах с концентрациями рассеянного радия  $n \cdot 10^{-12} - n \cdot 10^{-10}\%$  (некоторые сланцы, бурые угли, известняки, песчаники и т. п.) обогащение им подземных вод наблюдается в зоне затрудненного водообмена (до  $n \cdot 10^{10}$  г/л). В зоне интенсивного водообмена такого обогащения вод радием не происходит вследствие значительной скорости движения подземных вод и быстрой сорбции радия из растворов различными природными сорбентами. Более интенсивное обогащение вод радием наблюдается на рудных участках, причем в большей степени им обогащаются бессульфатные воды зоны затрудненного водообмена (до  $n \cdot 10^{-8}$  г/л). В зоне интенсивного водообмена в водах урановых месторождений содержание радия до  $n \cdot 10^{-11}$  г/л.

**Р а д о н.** Повышенные содержания радона в водах не всегда вызваны присутствием в породах урановой минерализации, так как источником радона может явиться частично или полностью отделившийся от урана радий. При отсутствии уранового оруденения повышенные концентрации радона в подземных водах могут объясняться следующими причинами: 1) высоким коэффициентом эмиграции пород, обусловленным их интенсивной тектонической раздробленностью; 2) вторичным обогащением пород радием в результате сорбционных процессов; 3) обогащением пород акцессорными радиоактивными минералами (монацитом, ортитом и др.).

Фоновые содержания радона в водах осадочных и основных магматических и метаморфических пород не превышает 10 эман, в водах кислых магматических пород 30—40 эман. Повышенные содержания радона, не связанные с урановой минерализацией, отмечаются на участках распространения пород, обогащенных акцессорными радиоактивными минералами (до 300—350 эман) и вблизи тектонических нарушений, благоприятных для сорбции радия на стенках водопроводящих трещин (до 100—200 эман). При наличии в породах урановых руд концентрации радона в водах могут колебаться в пределах от 100 до 400 000 эман.

В табл. 16 показаны средние содержания урана, радия и радона в подземных водах рудоносных и безрудных пород.

Концентрации радиоактивных элементов в подземных водах

Условия формирования вод	Тип вод	Сравнение в подземных водах			Геохимические условия
		радон, л/л	радий, з/л	Урана, з/л	
1	2	3	4	5	6
Воды, циркулирующие в породах с нормальным кларком урана	Воды коры выветривания кислых магматических пород	До 75	До $1 \cdot 10^{-11}$	От $n \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-4}$	Окислительные То же Восстановительные
	Воды тектонических трещин Высокоминерализованные хлоридно-натриево-кальциевые воды зоны затрудненного водообмена в осадочных породах	До 100 До 10	До $1 \cdot 10^{-11}$ До $1 \cdot 10^{-9}$	До $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-3}$ До $1 \cdot 10^{-4}$	
Воды, циркулирующие в породах, содержащих повышенное количество рассеянных радиоактивных элементов	Воды магматических пород, обогащенных акцессориями	До 300—350	До $1 \cdot 10^{-11}$	От $n \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-3}$	Окислительные То же
	Воды осадочных и метаморфических пород, обогащенных рассеянными радиоактивными элементами	До 300	До $1 \cdot 10^{-11}$	До $1 \cdot 10^{-4}$	
Воды, циркулирующие в породах, содержащих вторичные концентрации радия	Воды эмануирующих коллекторов на безрудных участках	До 300	До $n \cdot 10^{-10}$	$n \cdot 10^{-6}$	» » » »
	Воды эмануирующих коллекторов на рудных участках	До 400 000	До $n \cdot 10^{-9}$	От $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$	
Воды, циркулирующие в породах с рудными концентрациями радиоэлементов	Воды гидротермальных месторождений урана	От 100 до 200 000	До $1 \cdot 10^{-9}$	От $n \cdot 10^{-5}$ до $n \cdot 10^{-2}$	» » » »
	Воды урановых месторождений в осадочных породах	До 10 000	До $5 \cdot 10^{-9}$	От малых до держаний до $n \cdot 10^{-6}$	
		От 50 до 10 000 До 3 000	До $1 \cdot 10^{-8}$ До $n \cdot 10^{-8}$	От $n \cdot 10^{-5}$ до $n \cdot 10^{-2}$ От $n \cdot 10^{-6}$ до $n \cdot 10^{-7}$	Восстановительные Окислительные Восстановительные

геохимических условиях. Из приведенных данных видно, что в окислительных условиях важными индикаторными элементами являются уран и радон, в восстановительных — радий и радон.

**Металлы-спутники урана.** Подъемные воды, омывающие урановые месторождения, обогащаются не только радиоактивными элементами — ураном, радием и радоном, но и различными микрокомпонентами, в том числе так называемыми элементами-спутниками урана. Последние могут быть использованы в качестве косвенных признаков уранового оруденения при интерпретации и оценке радиогидрохимических аномалий. Элементы-спутниками уранового оруденения, имеющими устойчивую связь с ураном, могут быть молибден, ванадий, фосфор, мышьяк, медь, свинец, цинк и др.

**Молибден.** Наиболее частым спутником урана в ореолах является молибден. Аномально высокие его концентрации (до  $2,2 \times 10^{-3}$  г/л при фоновом содержании  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л) присущи водам различного химического состава урано-ванадиевых, урано-мышьяковых, урано-молибденовых, урано-флюорито-баритовых и урано-полиметаллических месторождений. Высокие концентрации молибдена в водах встречаются не только в окислительной, но и в переходной геохимической обстановке. Увеличение количества урана в подземных водах обычно сопровождается и ростом концентраций в воде молибдена. Содержание последнего в водах кислых магматических и осадочных пород не превышает тысячных долей миллиграмма на литр; в водах гидротермальных сульфидных и урано-ванадиевых месторождений оно составляет 0,5—2,0 мг/л.

**Ванадий.** Этот элемент встречается в повышенных концентрациях в водах урано-ванадиевых и других осадочных и осадочно-метаморфогенных месторождений. При фоновом содержании ванадия в подземных водах около  $1 \cdot 10^{-5}$  г/л концентрации его на рудных участках увеличиваются до  $2,6 \cdot 10^{-3}$  г/л в окислительной обстановке и до  $1 \cdot 10^{-4}$  г/л в слабо восстановительной. Подобно молибдену, ванадий проявляет устойчивую связь с ураном. В зоне окисления содержания урана в воде всюду больше, чем ванадия, а в зоне восстановления, наоборот, содержания ванадия выше, чем урана.

**Фосфор.** Обогащение подземных вод фосфором (до  $8 \cdot 10^{-4}$  г/л при фоновом содержании  $2,8 \cdot 10^{-5}$  г/л) наблюдается на участках урано-фосфорных рудопроявлений. Увеличение количества урана в водах одновременно сопровождается и ростом в воде концентраций фосфора.

**Мышьяк.** В повышенных количествах мышьяк встречается в подземных водах урано-арсенидных рудопроявлений. При фоновом его содержании в подземных водах, равном  $1 \cdot 10^{-5}$  г/л, на рудных участках оно повышается до  $2 \cdot 10^{-3}$  г/л (в окислительной обстановке).

Кроме указанных элементов в водах урановых месторождений часто присутствуют в повышенных количествах свинец, цинк, медь, барит, цинк. Миграционная способность металлов

так же как и радиоактивных элементов, определяется рядом факторов, среди которых важное место занимают геохимическая обстановка и состав урановых руд и вмещающих пород. Для каждого типа месторождений характерны свои металлы-спутники урана, и выявление их в водах является задачей первого этапа гидрохимических исследований. Поля устойчивости некоторых металлов-спутников в водных растворах в зависимости от pH и Eh среды показаны выше (рис. 55).

Наибольшее количество металлов-спутников урана в водах характерно для окислительных условий и наименьшее — для восстановительных. Спутниками урана в водах в наиболее широком диапазоне геохимических условий являются молибден, ванадий, фосфор.

## 2. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ

Формирование гидрохимических ореолов рассеяния радиоактивных элементов определяется природными условиями исследуемого района: геологической структурой, геоморфологическим строением района, геохимической обстановкой, гидрогеологическими условиями и др. Перечисленные факторы по-разному влияют на параметры ореолов рассеяния отдельных радиоактивных элементов.

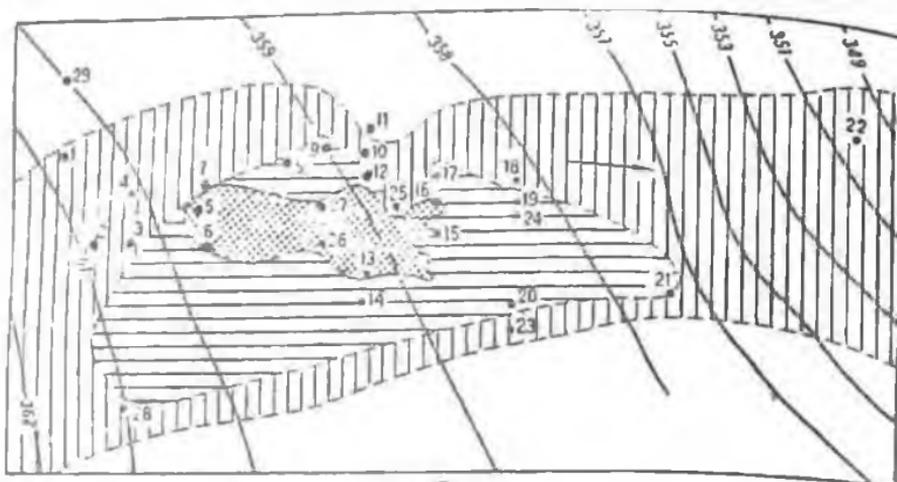
Основными факторами, определяющими контрастность, размеры и прочие особенности водных ореолов рассеяния являются: 1) характер рудных тел (минералогический состав, форма, размеры); 2) литологический состав водоносных пород; 3) структурные особенности участка уранового оруденения; характер водопроницаемости пород и интенсивность водообмена; 5) степень расчлененности рельефа; 6) климатические особенности района; 7) химический состав вод и геохимические условия их циркуляции.

Анализ материалов по водным ореолам рассеяния урановых рудопоявлений в различных природных условиях позволяет отметить следующие общие их особенности.

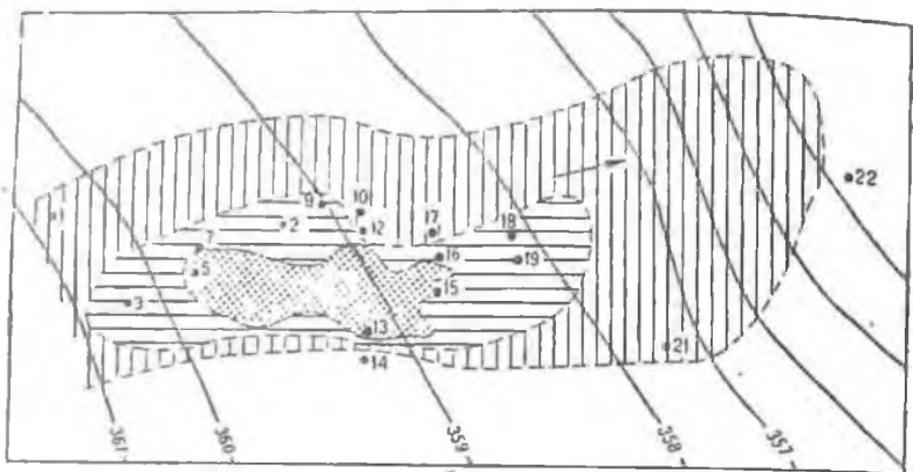
1. Форма ореолов рассеяния радиоактивных элементов в природных водах обуславливается в основном структурными условиями рудного участка и направлением движения подземных вод относительно местного базиса эрозии. Обычной формой водных ореолов рассеяния является эллипсоидная, вытянутая в направлении движения подземных вод. В тех случаях, когда направление движения подземных вод определяется зонами тектонических нарушений и интенсивной трещиноватости пород, ореолы приобретают форму сильно вытянутую вдоль этих зон. При движении подземных вод вкrest простирания тектонических нарушений ореол рассеяния вытянут в основном вдоль тектонических зон и в меньшей степени по направлению движения подземных вод. Если движение

Миграция урана в подземные воды некоторых типов андизитово-кварцевых месторождений в зависимости от геохимических условий

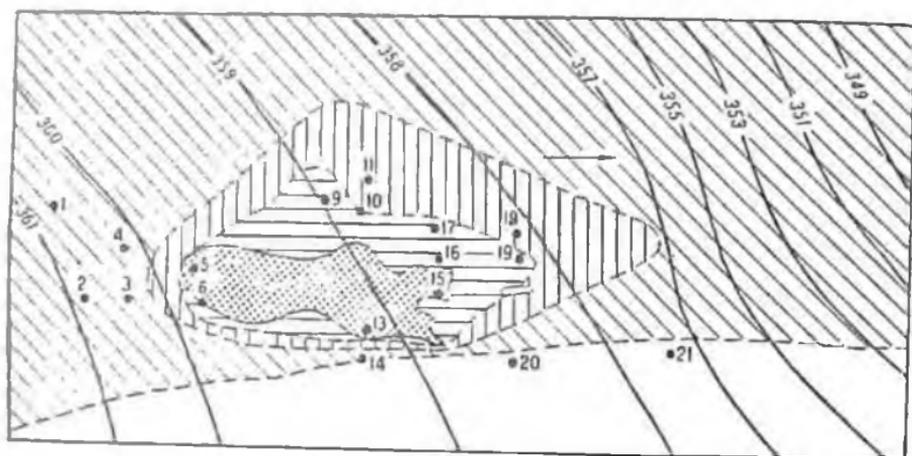
Ландшафтно-климатическая зона	Рельеф	Тип рудопроявления	Тип урановой минерализации	Геохимические условия водно-среды	Распространение аномальных концентраций, превышающих натуральной фонов в 2—3 раза в направлении потока грунтовых вод, м	
Зона сухих степей и пустынь	Горные районы	Гидротермальный	Собственно урановый	Окислительная	900	
	Равнинные районы	То же	То же	То же Окислительно-восстановительная	500 150	
Зона черноземных степей и лесостепей	Горные районы	Осадочно-метаморфогенный	Ураново-фосфорный	Окислительная	150	
		Инфильтрационный	Собственно урановый	Окислительно-восстановительная	100	
	Равнинные районы	Гидротермальный	То же	То же	50	
		То же	То же	Окислительно-восстановительная	80	
	Мощная зона открытого тектонического нарушения	Горные районы	Гидротермальный	То же	Восстановительная	50
		Равнинные районы	То же	То же	Восстановительная	200—250
Равнинные районы	Равнинные районы	Осадочно-метаморфогенный	Железо-урановый	Окислительная	1200	
		То же	То же	То же	150 230 60	
Горные районы	Гидротермальный	Собственно урановый	Собственно урановый	Восстановительная	20	
				Окислительная	300—400	



a



b



b



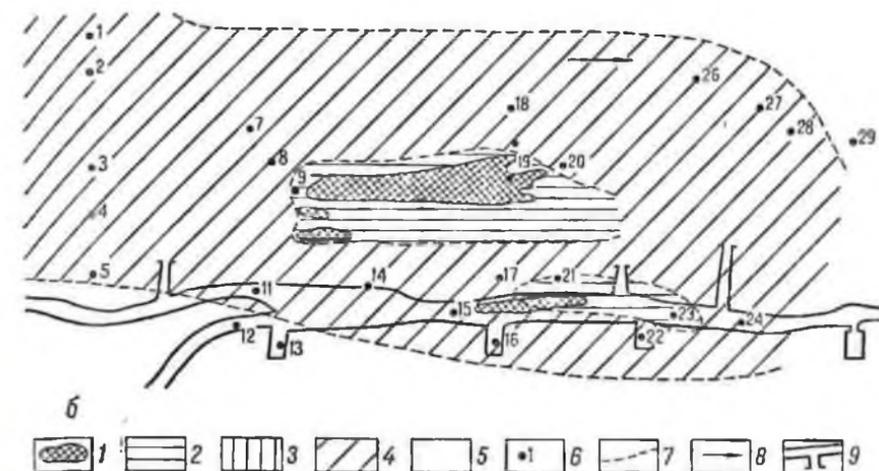
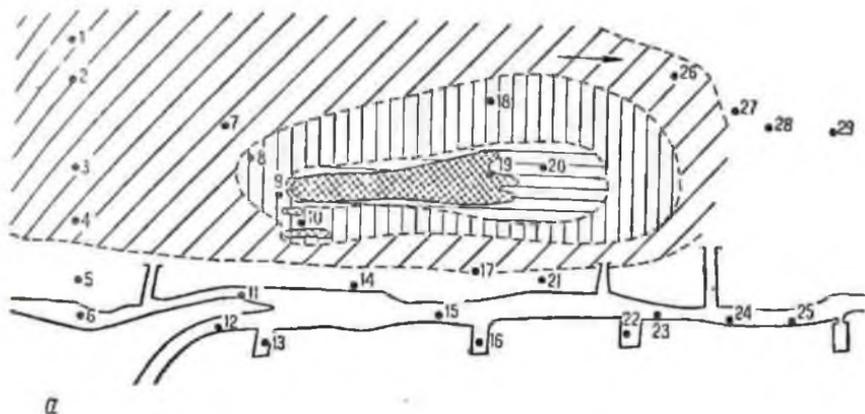


Рис. 57. Ореолы рассеяния радиоактивных элементов в подземных водах зоны окисления осадочно-метаморфогенного рудопроявления (в плане)

а — ореолы урана; б — ореолы радона, 1 — рудная залежь; 2—4 — ореолы рассеяния радиоактивных элементов; 2 — концентрация урана больше  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона 500—1000 эман; 3 — концентрация урана  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л— $5 \cdot 10^{-6}$  г/л; 4 — концентрация урана  $(1-5) \cdot 10^{-6}$  г/л, радона 100—500 эман; 5 — фоновые воды с концентрациями урана меньше  $5 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона меньше 50 эман; 6 — водоупоры; 7 — границы различных концентраций радиоактивных элементов; 8 — направление движения водного потока; 9 — подземные выработки

Рис. 58. Ореолы рассеяния радиоактивных элементов в подземных водах зоны окисления гидротермального месторождения (в плане)

а — ореол урана; б — ореол радона; в — ореол радона, 1 — рудная залежь; 2—3 — ореолы рассеяния радиоактивных элементов; 2 — концентрация урана выше  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона выше  $1 \cdot 10^{10}$  эман, радона — выше 1000 эман, 3 — концентрация урана от  $1 \cdot 10^{-6}$  г/л до  $5 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона от  $5 \cdot 10^{10}$  до  $0 \cdot 10^{11}$  эман, радона от 500 до 1000 эман; 4 — концентрация урана до 500 эман; 5 — воды с фоновыми концентрациями, равными: урана до  $5 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона — 30 эман; 6 — водоупор и его границы; 7 — зеркала грунтовых вод; 8 — направление движения грунтовых вод; 9 — подземные выработки

Размеры ореолов рассеяния урана в водах

Тип рудопроявления	Тип Урановой минерализации	Характер геохимической обстановки	Аномальные содержания урана в водах, $\mu\text{g/l}$	Концентрация в аномальной зоне, $\mu\text{g/l}$	Размеры радиохимических ореолов по элементу-донору и элементу-акцептору, м
Гидротермальный	Собственно урановый	Окислительная	$n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$	От 10 до 40 2—10	Точечные ореолы в пределах рудной залежки 500/2000
Гидротермальный (в условиях мощной тектонической зоны)	То же	*	$n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$	От 10 до 60 2—10	680/250 1800/300
Осадочно-метаморфогенный	Урано-фосфорный	*	$n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$	10 3—10	300/180 500/300
То же	То же	Окислительно-восстановительная	$n \cdot 10^{-4}$	65	Точечные ореолы в пределах рудной залежки
* *	* *	Восстановительная	$n \cdot 10^{-5}$ $n \cdot 10^{-6}$	От 10 до 25 3—10	300/150 400/250
Осадочно-метаморфогенный	Железо-урановый	Восстановительная	$n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$ $n \cdot 10^{-6}$	2—5 30—40 15	Точечные ореолы в пределах рудной залежки 300/110
То же	То же	Окислительная	$n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$ $n \cdot 10^{-6}$	2—10 От 50 до (60—100) 2—50	300/300 650/200 750/250 80/30
* *	* *	Окислительно-восстановительная	$n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$	2—50	150/90
Инфлюзионный	Собственно урановый	Восстановительная	$n \cdot 10^{-4}$	2—5	Точечные ореолы в пределах рудной залежки
* *	То же	Окислительно-восстановительная	$n \cdot 10^{-3}$ $n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-4}$ $n \cdot 10^{-5}$ $n \cdot 10^{-6}$	20—200 2—20 3—10	Точечные ореолы в пределах рудной залежки Ширина 100—150 Точечные ореолы в пределах рудной залежки

подземных вод происходит в нескольких направлениях, водный ореол рассеяния имеет сложные очертания.

2. Контрастность ореолов рассеяния, определяющаяся отношением максимального содержания элементов в ореоле к фоону, зависит главным образом от вещественного состава руд и геохимической

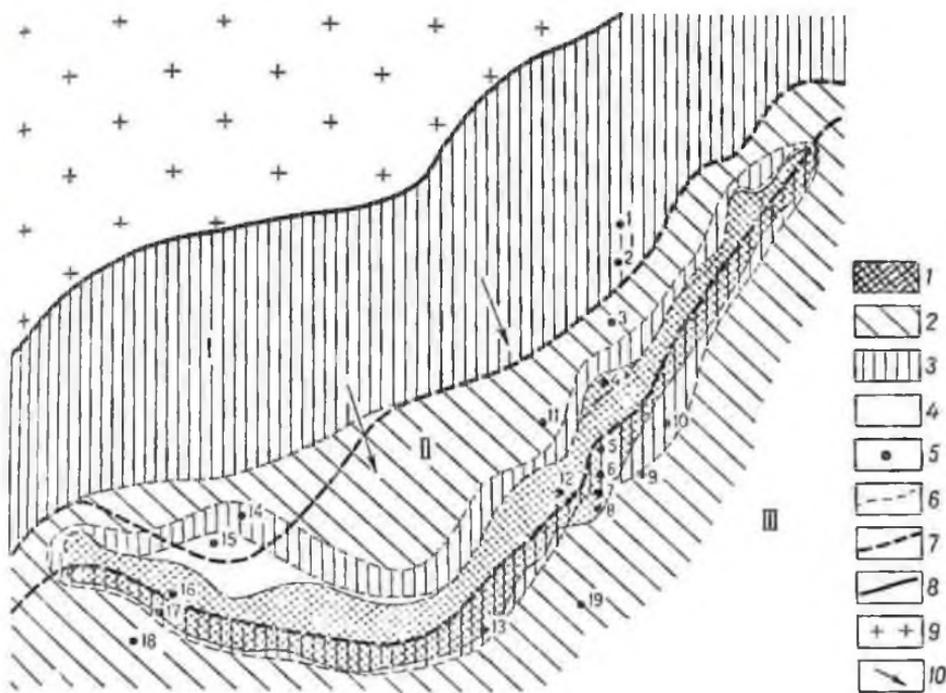


Рис. 58. Ореол рассеяния урана в подземных водах инфильтрационного месторождения (в плане)

1 — воды зоны пластового окисления с окислительными условиями; 11 — то же, с окислительно-восстановительными условиями; 111 — воды зоны цементации с восстановительными условиями; I — рудная залежь; 2 — водный ореол урана 2 — концентрации  $1 \cdot 10^{-4}$  г/л и выше, 3 — концентрации  $1 \cdot 10^{-5}$  г/л; 4 — фоновые воды с концентрациями урана меньше  $5 \cdot 10^{-6}$  г/л; 5 — водоупоры; 6 — границы разных концентраций урана в ореоле; 7 — границы зон с различными геохимическими условиями водной среды; 8 — выход подошвы исследуемого водоносного горизонта; 9 — площадь распространения пород, подстилающих исследуемый водоносный горизонт; 10 — направление движения пластовых вод

обстановки. Так, в условиях питецпвного окисления сульфидов и органических веществ коэффициент контрастности ореолов рассеяния урана достигает 500 и более. Контрастность ореолов рассеяния урана в подземных водах уменьшается с изменением окислительной обстановки на восстановительную. В восстановительных условиях ореолы рассеяния урана практически не образуются. С изменением окислительного характера среды на восстановительный контрастность водных ореолов рассеяния радиуса увеличивается.

3. Протяженность ореолов рассеяния урана в подземных водах зависит в основном от интенсивности водообмена

обстановки. Наибольшие размеры ореолов характерны для зон активного водообмена горноскладчатых областей. Здесь уран в количестве  $n \cdot 10^{-4}$  г/л мигрирует от источника обогащения на расстояние до 600—800 м. В равнинных областях водные ореолы с содержанием урана порядка  $n \cdot 10^{-4}$  г/л прослеживаются лишь на 20—50 м (в нестационарных условиях).

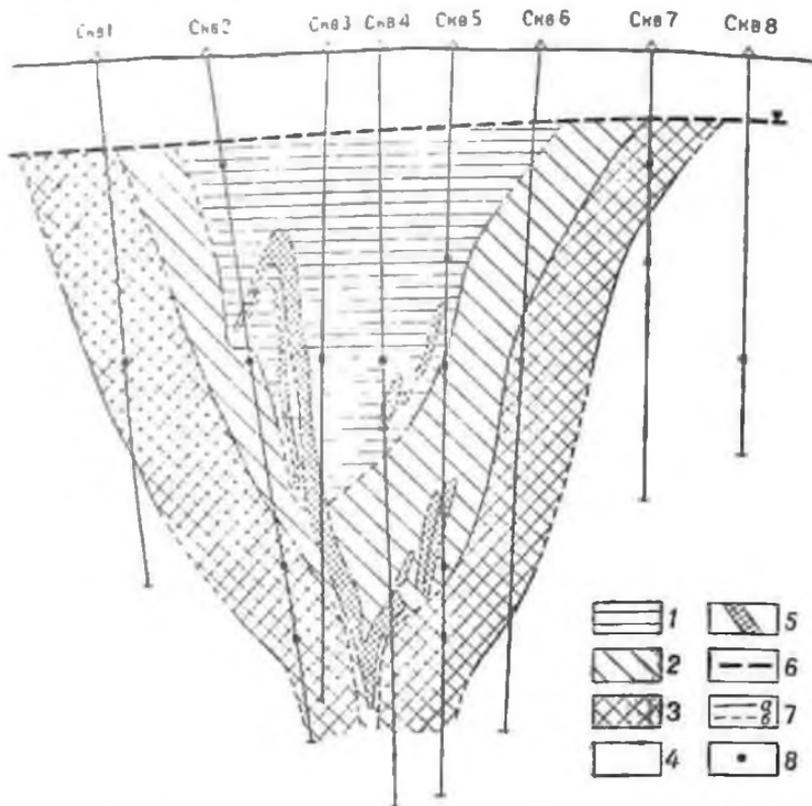


Рис. 59. Формирование ореолов рассеяния урана в подземных водах  
 Воды с концентрацией урана: 1 — более  $1 \cdot 10^{-4}$  г/л; 2 — от  $0 \cdot 10^{-5}$  до  $1 \cdot 10^{-4}$  г/л; 3 —  $(1-5) \cdot 10^{-5}$  г/л; 4 — менее  $5 \cdot 10^{-6}$  г/л; 5 — рудная залежь; 6 — уровень грунтовых вод; 7 — границы различных концентраций урана в ореоле; а — установленные, б — предполагаемые; 8 — места отбора проб воды

Протяженность путей миграции радона в подземных водах зависит в основном от интенсивности водообмена. В горноскладчатых областях воды с содержанием радона более 1000 зман прослеживаются от рудопроявлений на расстоянии до 100 м, с содержанием более 500 зман — до 200 м, с содержанием 100 зман — до 300 м. В равнинных областях в условиях более замедленного водообмена воды с содержанием радона более 1000 зман прослеживаются только в пределах рудопроявлений, с содержанием более 500 зман — на расстоянии до 100 м и более, с содержанием 100 зман — до 150—180 м.

Дальность миграции радия в подземных водах зависит в основном от минерализации подземных вод и интенсивности водообмена. В зоне интенсивного водообмена ореолы с содержанием радия более  $5 \cdot 10^{-12}$  г/л обычно не выходят за пределы рудопроявлений, что объясняется главным образом наличием большого количества сорбентов, образующихся в результате окисления пород и руд. Только в зоне весьма затрудненного водообмена, где эти процессы затухают, воды с содержанием радия  $n \cdot 10^{-11}$  г/л мигрируют на расстояние до нескольких сотен метров от рудопоявлений.

Сравнительная характеристика размеров и контрастности ореолов рассеяния некоторых рудопоявлений в различных природных условиях дана в табл. 17 и 18.

На рис. 56, 57, 58, 59 приведены примеры формирования водных ореолов рассеяния радиоактивных элементов на некоторых месторождениях урана. Наиболее сложный ореол рассеяния урана установлен в водах инфильтрационного месторождения в свите песчано-глинистых пород, слагающих питающее крыло артезианского бассейна (рис. 58). В связи с привнесом урана водами из области питания и постепенной сменой в породах окислительной обстановки на восстановительную вблизи месторождения формируется как бы двойной ореол, имеющий «обратную» конфигурацию, т. е. распространяющийся в направлении, обратном движению пластовых вод.

### 3. РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ СССР ПО УСЛОВИЯМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА

Проведение гидрохимических поисков по поверхности возможно не повсеместно, а лишь на площадях, где геологоструктурные и геоморфологические условия наиболее благоприятны для вывода водных ореолов рассеяния на дневную поверхность. На остальной территории для опробования подземных вод требуется их искусственное вскрытие поисковыми скважинами.

Подземные воды, выходящие на поверхность в слабо расчлененных равнинных и пещерализованных районах, характеризуют зону неглубокой циркуляции, охватывающую первые десятки метров. В горных районах в условиях резкой расчлененности рельефа и наличия глубоко промываемых структур на дневную поверхность могут выходить воды зоны более глубокой циркуляции, охватывающей несколько сотен метров. В соответствии с этим глубинность гидрохимических поисков в первом случае достигает нескольких десятков метров, а во втором — нескольких сотен метров. Повышенная глубинность метода является его главным преимуществом перед другими поисковыми методами. Кроме того, преимущество гидрохимического метода заключается в возможности проведения поисков урана на закрытых площадях путем опробования подземных вод буровыми скважинами по более разветвленной сети скважин.

сравнению с другими методами. Выявлению уранового оруденения в этом случае способствует то обстоятельство, что в зоне гипергенеза водные ореолы рассеяния превышают по своим размерам рудные залежи и сопровождающие их литохимические ореолы. Опробуя подземные воды, вскрываемые скважинами в районах с мощным покровом рыхлых образований, можно выявить слепые или выщелоченные с поверхности залежи, которые часто не обнаруживаются другими поисковыми методами.

Сопоставление результатов гидрохимических поисков в разных ландшафтно-климатических зонах показывает, что наибольший геологический и экономический эффект этот метод дает в горных районах с резко расчлененным рельефом и хорошо развитой гидросетью, а также в пределах расчлененных пещерных и равнин с молодой развивающейся гидросетью.

При оценке поисковых возможностей и эффективности применения гидрохимического метода по степени благоприятности природных условий для гидрохимических поисков можно выделить четыре группы районов.

Районы, наиболее благоприятные по природным условиям для постановки гидрохимических поисков характеризуются большим количеством естественных выходов подземных вод (в том числе и вод глубиной циркуляции) и короткими путями их фильтрации от источника обогащения радиоактивными элементами до места выхода на поверхность.

К этой группе можно отнести горные районы и поднятые расчлененные нагорья всех климатических зон, аналогичные по гидрогеологическим и биоклиматическим условиям, исключая высокогорные районы выше линии снегов и ледников и площади распространения многолетней мерзлоты. По характеру водопроницаемости водопородных пород подземные воды таких районов обычно относятся к типу грунтовых трещинных, трещинно-пластовых, трещинно-карстовых. Как правило, они характеризуются высоким фоновым содержанием урана в условиях избыточного увлажнения и несколько повышенным фоновым содержанием (для высокогорных массивов) в условиях недостаточного увлажнения вследствие повышения общей минерализации вод. В этих условиях гидрохимические ореолы урана часто выходят на поверхность и характеризуются значительными размерами (сотни метров) и достаточной контрастностью. В районах этой группы целесообразно проводить площадное гидрохимическое опробование выходов подземных и поверхностных вод.

Районы, благоприятные по природным условиям для постановки гидрохимических поисков характеризуются значительным количеством выходов и близким залеганием от поверхности (до 10 м) грунтовых вод в осадочных, осадочно-метаморфизованных, метаморфических и интрузивных породах.

К этой группе относятся открытые районы платформ гумидной зоны вне площадей распространения многолетней мерзлоты (дену-

дационные равнины, плато, плоскогорья), горные районы и расчленившиеся пагорья с островным распространением многолетней мерзлоты. Эти районы характеризуются неглубокой расчлененностью поверхности в пределах платформ и довольно густой гидрографической сетью. Выходы подземных вод на поверхность здесь сравнительно часты и приурочены к долинам водотоков, предгорным шлейфам и конусам выноса. Подземные воды проходят обычно длинные пути от источников обогащения их радиоактивными элементами до места выхода на поверхность. Фоновые концентрации урана в подземных водах, как правило, низкие, по контрастности ореолы урана аналогичны ореолам предыдущей группы. Поскольку гидрохимическое опробование поверхностных водотоков и выходов подземных вод не всегда выявляет ореолы рассеяния, необходимо дополнительное вскрытие подземных вод неглубокими скважинами с последующим их опробованием.

Р а й о н ы м а л о б л а г о п р и я т н ы е по природным условиям для постановки гидрохимических поисков характеризуются глубоким залеганием подземных вод (первые десятки метров) в осадочных, осадочно-метаморфизованных, метаморфических и интрузивных породах и малым числом выходов вод на поверхность.

К этой группе относятся открытые районы платформ (денудационные равнины и плато), частично перекрытые четвертичными отложениями предгорные и низкогорные массивы складчатых областей аридной зоны. Фоновые концентрации урана в подземных водах этих районов повышены, а его водные ореолы характеризуются достаточно большой протяженностью и высокой контрастностью, однако выходы вод на поверхность довольно редки.

К рассматриваемой группе можно отнести также открытые районы платформ и складчатых областей на площадях развития многолетней мерзлоты с отдельными выходами подмерзлотных вод по руслам рек и зонам тектонических нарушений. Подмерзлотные воды в отличие от вод активного слоя характеризуются несколько повышенными фоновыми концентрациями урана. Формирующиеся здесь водные ореолы рассеяния урана изучены недостаточно; по имеющимся данным размеры их превышают рудные залежи незначительно. В описанных условиях целесообразно проводить гидрохимическое опробование поверхностных водотоков и выходов подземных вод в долинах рек. Однако поверхностное опробование вод не всегда обеспечивает выявление водных ореолов рассеяния, в связи с чем требуется дополнительное вскрытие подземных вод бурением средней глубины с опробованием вод по скважинам.

Р а й о н ы по природным условиям недоступные для гидрохимических поисков без искусственного вскрытия подземных вод бурением, характеризуются глубоким залеганием пластовых и пластово-трещинных вод (порядка многих десятков и сотен метров) в осадочных и осадочно-метаморфических породах, перекрытых толщей рыхлых аллохтонных пород. В геоморфологическом отношении районы пре...

расчлененные аккумулятивные и аккумулятивно-денудационные равнины.

К районам этой группы относятся закрытые площади платформы с наиболее глубоко погруженными участками кристаллического фундамента, межгорные и предгорные впадины и прогибы в пределах складчатых областей, перекрытые четвертичными отложениями, являющимися значительную мощность. Подземные воды, являющиеся объектом изучения в этих районах, характеризуются преимущественно застойным гидродинамическим режимом и близкими фоновыми и аномальными концентрациями урана при повышенной общей минерализации вод. В этих условиях формируются подземные гидрохимические ореолы рассеяния радия, некоторых элементов-спутников урана и иногда радона.

#### 4. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОИСКАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Гидрохимические исследования с целью поисков урановых месторождений проводятся, как правило, в комплексе с геолого-геофизическими и геохимическими работами. В зависимости от детальности опробования природных вод различают: 1) рекогносцировочные гидрохимические исследования; 2) площадные гидрохимические исследования разных масштабов; 3) детальные гидрохимические исследования при изучении и оценке выявленных аномалий.

Важным условием эффективного проведения гидрохимических поисков при любом масштабе и на любой стадии является детальный анализ природных условий района работ. В первую очередь анализируется гидрогеологическая обстановка. Для этого выделяются области питания, трапзита и разгрузки вод; определяется интенсивность водообмена в различных водоносных комплексах пород, выясняется характер влияния ландшафтно-климатических факторов на условия циркуляции и химизм вод. На основе изучения гидрогеологии района, а также данных о химическом и газовом составе вод могут быть определены геохимические условия циркуляции вод в отдельных литолого-структурных комплексах. На первом этапе исследования геохимические зоны выделяются схематично, при дальнейших работах оно дополняется и уточняется.

Масштаб гидрохимических исследований определяется их назначением и сложностью природных условий района.

Рекогносцировочные гидрохимические исследования проводятся при геологических съемках масштаба 1 : 200 000 — 1 : 500 000 и заключаются в картировании на местности естественных водопоявлений и их гидрохимическом опробовании: в первую очередь на уран и радон, в выборочном порядке — на радий и общий химический и газовый состав. Указанные работы ведутся отдельными маршрутами с отбором одной водной пробы с площади 3,5—35,0 км<sup>2</sup>. Указанная детальность опробова-

вия вод обеспечивает сравнительную оценку степени обогащенности природных вод радиоактивными элементами, что и используется, как критерий при выделении площадей для постановки дальнейших поисков урановых месторождений.

В результате проведения рекогносцировочных гидрохимических исследований составляются схематические гидрогеологические карты распределения радиоактивных подземных вод в масштабе 1 : 200 000—1 : 500 000.

Площадные гидрохимические съемки в масштабах 1 : 100 000—1 : 50 000 путем картирования на местности и гидрохимического опробования всех водопунктов района исследования (источники, небольшие ручьи, колодцы, скважины, шурфы и т. д.) с определением содержания урана и радона во всех пробах в радиусе — в пробах с повышенными концентрациями урана и радона. На этой стадии поисковых работ отбирается не менее 1 пробы воды с площади 0,5—2,5 км<sup>2</sup>. Указанные исследования имеют целью получение характеристики химизма и радиоактивности вод разных литолого-стратиграфических комплексов пород и выявление приуроченности повышенных концентраций радиоактивных элементов в водах к определенным водовосным комплексам.

В результате проведения площадных гидрохимических исследований составляются карты распределения радиоактивных вод в различных литолого-стратиграфических комплексах водовосных пород с выделением аномальных участков. Данные гидрохимических исследований служат дополнительным (площади категории I—IV), а в ряде случаев (площади категории V) основным критерием при выделении перспективных участков для постановки на них работ по оценке аномалий и более детальных поисков урановых месторождений.

Детальные гидрохимические исследования при изучении и оценке выявленных аномалий включают проведение крупномасштабной площадной гидрохимической съемки (1 : 25 000—1 : 5 000) и детальных разведочных работ (бурение, шурфование) с целью изучения природы радиоактивности водовмещающих пород на участках повышенной радиоактивности вод. В обязательном порядке проводятся наблюдения за изменениями режима подземных вод в течение года и изучаются связанные с ними изменения содержания радиоактивных элементов в водах. Эти наблюдения позволяют установить нижние пределы аномальных концентраций, по которым можно оконтуривать водные ореолы рассеяния.

Кондиционное гидрохимическое опробование на данном этапе работ предусматривает отбор не менее 1 пробы на площади 0,05—0,35 км<sup>2</sup> и требует проведения дополнительного разведочного бурения с картированием подземных вод по скважинам с опробованием их на уран, радий, радон. Одновременно уточняются геохимические условия циркуляции вод.

Целями гидрохимических исследований этого этапа являются:

1) определение контуров повышенных содержания

элементов в подземных водах в плане и на глубину; 2) установление условий залегания, питания, стока и разгрузки подземных радиоактивных вод; 3) установление условий формирования радиоактивных вод и очагов их обогащения радиоактивными элементами. В состав полевых гидрохимических исследований входят следующие основные работы:

1) картирование на местности природных водопроявлений (источники, мочажинны, ручьи, небольшие озера, болота) с их описанием и нанесением на карту;

2) дополнительное вскрытие подземных вод буровыми скважинами и шурфами (при несоответствии количества естественных водопроявлений нормам кондиционного опробования подземных вод при данном масштабе поисковых работ); 3) отбор проб воды и газа из подземных и поверхностных вод в процессе изучения естественных и искусственных водопунктов района; отбор образцов пород;

4) определение химического состава вод (по схемам сокращенных химических анализов) содержания в них урана, радона, радия и элементов-спутников (Mo, Pb, As, суммы тяжелых металлов и др.), а также окислительно-восстановительного потенциала подземных вод (Eh); радиометрические измерения активности образцов пород основных водоносных горизонтов;

5) проведение необходимого комплекса гидрогеологических наблюдений (замеры колебаний уровня, температуры, систематический отбор проб воды) на бурящихся скважинах и водопунктах, выбранных для стационарных режимных наблюдений;

6) полевая камеральная обработка материалов, включающая составление предварительного отчета, графическое изображение результатов полевых анализов, составление опорных разрезов, профилей с нанесением на них данных гидрохимического опробования.

Методика опробования естественных и искусственных водопроявлений, а также организация работ изложены в ряде инструкций, поэтому здесь останавливаться на ней не будем.

Отчет о гидрохимических исследованиях должен включать краткое изложение методики и основных результатов выполненных работ и давать представление о физико-географических условиях района, его геологическом строении, тектонике, гидрогеологических условиях, химическом составе и радиоактивности подземных вод. В заключении даются оценка перспективности выявленных гидрохимических аномалий и рекомендации по дальнейшему направлению поисково-разведочных работ на уран и комплексированию различных методов исследований.

В результате работ (в зависимости от масштаба и степени изученности района) составляются:

1) гидрогеологическая карта химического состава, глубин залегания подземных вод и водоносности пород;

2) карта фактического материала гидрохимического опробования вод;

3) карта радиоактивности вод района исследований с выделением участков гидрохимических аномалий;

4) гидрогеологические карты участков выделенных гидрохимических аномалий (крупномасштабные);

5) гидрохимические профили по опорным разрезам;

6) сводные таблицы средних содержаний радиоактивных элементов в водах разных литолого-стратиграфических комплексов пород района (нормальный фон природных вод);

7) каталог опробования поверхностных и подземных вод на содержание радиоактивных элементов;

8) графики изменения содержаний радиоактивных элементов в химического состава вод в связи с изменением режима последних в течение года.

Оборудование, необходимое при проведении гидрохимической съемки, включает:

1) технические средства для отбора проб воды и газа из различных естественных водопоявлений и искусственных выработок (проботборники, бутылки, промывалки, насос для откачки промывалок и др.);

2) портативные полевые лаборатории с набором необходимой химической посуды и реактивов для анализа проб воды на компоненты их химического и газового состава;

3) наиболее простую радиометрическую и люминесцентную аппаратуру для определения радиоактивности вод и пород (эманометр, полевой радиометр, уранометр и портативный источник ультрафиолетовых лучей);

4) оборудование для деминерализации (обессоливания) воды;

5) потенциометр для определения активной кислотности и окислительно-восстановительного потенциала подземных вод;

6) термометры для определения температуры воды.

В полевых условиях широко применяются портативные полевые гидрохимические лаборатории, позволяющие провести анализ на ряд компонентов химического и газового состава вод непосредственно в исследуемом районе. Вся аппаратура, применяемая при гидрохимических исследованиях, очень портативна и проста в работе. Освоение ее рассчитано на средний технический персонал.

## 5. ВЫДЕЛЕНИЕ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

В основу выделения и интерпретации данных гидрохимического опробования природных вод положен принцип аномальности, заключающийся в том, что при оценке того или иного водоемкости учитываются не столько абсолютные содержания элементов и в воде, сколько их превышения над нормальным гидрохимическим фоном. Под последним обычно понимается среднее содержание радиоактивных элементов в подземных водах, приходящее из заведомо нерудоносных породах. Гидрохимическое

привычно называть повышенное (по сравнению с фоновым) содержание урана, радия, радона (всех вместе или по отдельности) в подземных водах на том или в том участке. Аномальные значения содержания радионуклидов в водах отдельных районов различны и зависят от природных особенностей изучаемых площадей. В связи с этим универсальные цифровые характеристики аномальных вод дать невозможно. Ориентировочно, по данным В. Н. Попова и Е. Н. Купель (1959), в водах кислых магматических пород аномально высоким можно считать содержание радона более 100 зман при фоновом до 30—50 зман, а в водах осадочных, основных магматических и метаморфических пород — более 50 зман при фоновом до 10 зман. В случае более низких фоновых содержаний радона аномальным можно считать концентрации, превышающие фон на 30—40 зман. По предварительным данным, аномальными по радню и урану условно можно считать воды, в которых содержание их на полпорядка и более выше величины фона.

Повышенные концентрации урана в подземных водах часто являются показателем уранового оруденения, однако поиски урановых руд только по содержанию урана в подземных водах затрудняются следующими обстоятельствами: а) миграционные свойства урана обуславливают образование аномалий в водах и вне связи с урановыми рудами (ложные аномалии); б) вследствие хорошей миграционной способности в окислительных условиях уран в повышенных концентрациях может переноситься водами на большие расстояния от места их обогащения (обычно на сотни метров, а в горных районах на 1—2 км и более); в) в восстановительных условиях миграционная способность урана резко снижается.

Поэтому для установления связи подземных вод с рудными концентрациями урана по аномальным его содержаниям в подземных водах необходимо учитывать геолого-структурные и гидрогеологические условия, химический и газовый состав вод, геохимический характер среды, содержание в водах других радиоактивных и сопутствующих индикаторных элементов.

Высокие концентрации радона в водах во многих случаях являются надежным подтверждением связи этих вод с урановым оруденением. Наиболее показательными являются концентрации радона в водах более 400 зман. Меньшие концентрации радона в подземных водах (100—400 зман в водах кислых магматических пород и 50 — 300 зман в водах других комплексов) не во всех случаях указывают на связь вод с радиоактивным оруденением. Для установления этой связи необходимо, во-первых, выяснить, является ли данное повышенное содержание радона в воде аномальным по отношению к окружающему фону и, во-вторых, не вызвано ли оно местными сорбционными происхождением концентрациями радия или наличием урансодержащих акцессорных минералов. Однако необходимо иметь в виду, что отсутствие повышенных концентраций радона в водах не свидетельствует об отсутствии оруденения на исследуемом участке.

Повышенные концентрации радия в водах различного химического состава в зоне неглубокой циркуляции и интенсивного водообмена встречаются только на участках скопления урановых руд, причем максимальные концентрации его выше на месторождениях, приуроченных к осадочным породам (до  $1 \cdot 10^{-9}$  г/л), и ниже на гидротермальных (до  $5 \cdot 10^{-10}$  г/л). В зоне интенсивного водообмена радий мигрирует в водах лишь на небольшие расстояния, вследствие чего присутствие его в повышенных количествах в водах одновременно с ураном является важным поисковым признаком. Воды глубокой циркуляции при соприкосновении с урановой минерализацией обогащаются радием на осадочных месторождениях в количестве до  $n \cdot 10^{-8}$  г/л и на гидротермальных — до  $n \cdot 10^{-9}$  г/л. Как указывалось выше, высокоминерализованные хлоридно-натриево-кальциевые воды могут обогащаться радием до  $n \cdot 10^{-9}$  г/л и в безрудных осадочных породах. Поэтому при интерпретации высоких концентраций радия в водах необходимо учитывать химический состав вод и содержание в них других индикаторных элементов. Присутствие в водах в повышенных количествах всех трех элементов — урана, радона и радия — является одним из важных поисковых признаков, позволяющих расценивать гидрохимическую аномалию как возможный ореол рассеяния уранового месторождения.

Оценка перспективности гидрохимических аномалий, установленных по повышенному содержанию в водах одного или двух радиоэлементов, представляет довольно сложную задачу. Обычно она производится путем отбраковки ложных аномалий (образование которых не связано с выщелачиванием руд) от аномалий, имеющих признаки генетической связи с урановым оруденением. Для этой цели используются косвенные поисковые гидрохимические признаки и анализ условий обогащения вод радиоэлементами в данных природных условиях. Так, для выявления ложных урановых аномалий в аридных условиях А. И. Германов и другие (1959) предложили использовать корреляцию содержания урана в водах с общей концентрацией растворенных солей. Этот метод позволяет считать генетически связанными с урановыми рудами только те водные аномалии, в которых увеличение концентрации урана не пропорционально общей минерализации, а значительно выше.

В гумидной зоне и областях с умеренно континентальным климатом в слабо минерализованных водах в ряде случаев наблюдается корреляционная зависимость между содержанием урана и пона бикарбоната. В этом случае признаком связи аномалии с урановыми породами является повышенное содержание урана, не пропорциональное росту содержания пона бикарбоната. Очевидно, в гумидных районах может иметь место повышение концентрации урана в водах также за счет присутствия органических кислот. В этом случае изучение зависимости содержания урана в водах от присутствия органики может оказать существенную помощь в поиске перспективных аномалий. К сожалению, возможности использования этого способа для гумидных районов еще не изучены.

В некоторых районах содержание урана в водах источников, связанных с оруденением, сильно колеблется в зависимости от времени года. В то время как источники с фоновым содержанием отличаются более постоянным составом. Так, согласно А. И. Германову и другим (1959), в одном из районов сезонные колебания содержания урана в фоновых источниках не превышали 200%, в то время как для аномальных источников эта величина была в 5 раз выше. Это объяснялось тем, что во влажный период, когда происходило интенсивное просачивание атмосферных вод, последние растворяли ионы урана, сохранявшиеся в зоне аэрации. В результате воды обогащались ураном. Чередование влажных и сухих сезонов приводило в этом районе к периодическому обогащению и обеднению ураном вод, связанных с оруденением.

Темп же авторами на одном из участков были установлены периодически возникающие ореолы. Урановая минерализация здесь развита только в зоне просачивания и поэтому в период инфильтрации атмосферных вод, когда последние обогащены этим элементом, образуется ореол. В остальные же периоды основной групповой поток не соприкасается с оруденением и воды имеют фоновое содержание урана, поэтому ореол отсутствует.

Одны из приемов, позволяющих установить признаки генетической связи водной аномалии с урановыми рудами, заключается в выявлении и изучении в ореолах, кроме урана, радона, радия, сопутствующих урану элементов — Mo, V, Pb, Sn, As, Zn, Cu, Fe и др. В зависимости от состава урановых руд обнаружение в водах повышенных количеств тех или иных элементов-спутников может указывать на связь гидротермической аномалии с рудной залежью.

Кроме U, Rn, Ra и радиоактивных элементов в природных водах обнаруживаются Th, Ac, UX, AcX, RaTh, MsTh, ThX и др. Использование этих элементов как индикаторных для поисков месторождений урана пока еще затруднено из-за сложности массовых аналитических определений, но, по-видимому, со временем оно даст положительный результат. Интересные данные получены Н. Г. Сыромятниковым (1961), изучавшим миграцию изотопов урана, радия и тория в зоне гипергенеза урановых месторождений. Величина отношения  $U^{231} : U^{238}$  оказалась разной в водах, дренирующих изверженные, осадочные и метаморфические породы, а также урановые месторождения различных типов. Изучение трещинных подземных вод гранитоидов и эффузивов показало, что содержание урана в них колеблется от  $5 \cdot 10^{-6}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  г/л, pH — от 5 до 8,5, общая минерализация — от 0,05 до 3,5 г/л. Несмотря на столь большие различия в химическом составе, отношение  $U^{231} : U^{238}$  колебалось незначительно и составляло 2—2,5 (в водах гранитов чаще 3—3,5).

В водах, дренирующих эндогенные урановые месторождения в изверженных породах, указанное отношение близко к единице, т. е. к равновесному, а в водах, связанных с метасоматическими урано-молибденовыми и урано-фосфорными рудами, оно нередко выше 5.

Весьма существенна для методики гидрохимических поисков, как указывает Н. Г. Сыромятников, зависимость изотопного отношения урана от гидрохимических особенностей вод. Это отношение определяется только свойствами горных пород и руд, что исключает возможность появления ложных аномалий в результате испарительной концентрации и других явлений метаморфизма вод.

Предполагается, что первоначальное разделение в минералах изотопов  $U^{238}$  и  $U^{234}$  происходит за счет энергии радиоактивного распада. Миграционная способность  $U^{234}$  выше, так как часть его атомов попадает в нарушенные части минерала, откуда они легко выщелачиваются. Именно этим объясняет Н. Г. Сыромятников повышенное отношение  $U^{234} : U^{238}$  в водах гранитоидов, содержащих данный элемент в рассеянном состоянии. В урановых гидротермальных месторождениях, содержащих более крупные скопления урана, условия для перехода в воды  $U^{234}$  и  $U^{238}$  примерно одинаковы.

При интерпретации радиевых аномалий в водах автор предлагает использовать отношение  $Ra : MsTh$ , что позволяет отличать урановую аномалию от ториевой. Отношение  $I_0 : Th$  может быть использовано для интерпретации аномалий обоих типов — урановых и радиевых. Н. Г. Сыромятниковым приводятся явно аномальные и явно фоновые значения изотопных соотношений в аномальных водах изученных районов (табл. 19).

Таблица 19

*Изотопные отношения радиоактивных элементов в водах с различным из содержанием*

Изотопные отношения	В водах изверженных пород		В водах осадочных и метаморфических пород	
	явно аномальные	явно фоновые	явно аномальные	явно фоновые
$U^{234} : U^{238}$	1—1,5	$\geq 3$	$\geq 5$	Не выделены
$Ra : MsTh$	$\geq 2$	$\leq 0,5$	$\geq 2$	$\leq 0,5$
$I_0 : Th$	$\geq 20$	$< 1$	$> 20$	$< 1$

Таким образом, изучение изотопных отношений помогает отбраковывать ложные гидрохимические аномалии, отмеченные высоким содержанием в водах урана или радия.

Недостатки предполагаемой методики связаны со сложностью аналитических определений и малой их производительностью (три техника за 1 месяц выполняют около 100 определений главных изотопных отношений).

При оценке гидрохимических аномалий очень важным является анализ геолого-структурных, гидрогеологических и геохимических условий района как в современную, так и в более древние геологические эпохи. Большое внимание должно уделяться

условий циркуляції вод на участку: паправлення движення, глыбы водообмева, удалення от области питания, водопроницаемости пород и др. Выявление и анализ палеогидрогеологических и палеоклиматических условий района играет особенно важную роль при поисках месторождений эпигенетического инфильтрационного происхождения.

В районах с малой обважешностью коренных пород обычным геогноспрочным обследованием часто не удается выявить характер геологических структур, с которыми связаны выявленные гидрохимические аномалии (наличие зон тектонических разломов, их положение и ориентировка, условия залегания осадочных пород, их литологический состав, наличие древних погребенных долин и пр.). В таких случаях требуется предварительное проведение на участках аномалий детальной геологической съемки с расчистками, зондировочным и разведочным бурением. Зоны тектонических разломов и погребенные долины (и их структурные особенности) в отдельных случаях целесообразно выделять геофизическими методами.

Заключительной и самой ответственной частью радиогидрогеологических исследований является проверка перспективных гидрохимических аномалий. На этом этапе работ должны проводиться разведочные буровые и горные работы,  $\gamma$ -съемки, эманационная съемка участка, а также  $\gamma$ -каротаж скважин.

В пределах радиогидрогеологических аномалий, связанных с зонами тектонических разломов, поисковые скважины целесообразно бурить в зонах этих разломов, в первую очередь в пределах оперяющих их трещин. Предварительно целесообразно бурить неглубокие скважины для выявления пунктов с наибольшей радисактивностью подземных вод, вблизи которых затем проходятся глубокие скважины. При бурении мелких зондировочных и глубоких поисковых скважин пробы воды после прокачки скважин необходимо отбирать с различных глубин и производить определение в них урана, радия, радона, элементов-спутников, потенциалзадающих компонентов, величины рН. В каждой скважине следует также проводить  $\gamma$ -каротаж.

При проверке радиогидрогеологических аномалий, выявленных в пределах антиклиналей, куполов и выступов в рельефе фундамента древних пород, поисковые скважины следует располагать по профилям, ориентированным перпендикулярно простиранию крыльев указанных геологических структур.

На участках монокливалей с дисъюнктивными нарушениями, фациальным переходом водопроницаемых пород в водонепроницаемые (по восставию) или несогласным перекрытием моноклиналино залегающих пород водонепроницаемыми поисковые скважины целесообразно располагать по профилям, ориентированным перпендикулярно простиранию пород; во всех других случаях поисковые скважины располагаются в соответствии с характером геологической структуры аномального участка.

## 6. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА

*Радиогидрогеологическая аномалия № 1.* Район представляет собой холмисто-увалистую равнину, рассеченную небольшими речками и ручьями с глубиной вреза относительно водоразделов до 20—30 м.

Аномальные содержания радиоактивных элементов были установлены в источнике, выходящем в основании берегового уступа реки на контакте нормальных микроклиповых гранитов с плагиогравитами, между которыми зажаты в виде узкой полосы гнейсы и сланцы, сильно измененные процессами контактного метаморфизма. Вода источника гидрокарбонатно-хлоридно-кальцево-натриевая с минерализацией 0,56 г/л. Содержание урана в воде  $2,6 \cdot 10^{-4}$  г/л при фоне до  $3 \cdot 10^6$  г/л, радона — от 96 до 385 эман при фоне до 30 эман и радия  $1 \cdot 10^{-12}$  г/л. На участке выхода радиоактивного источника автогамма-съемкой была отмечена аномалия в породах. Все это послужило основанием для постановки здесь поисково-разведочных работ.

Поиски велись на левом берегу реки выше радиоактивного источника. В связи с тем что ранее в пределах рассматриваемого района по выходам радиоактивных вод было выявлено урановое оруденение в аллювиальных отложениях, поиски первоначально велись путем проходки шурфов и шнекового бурения в четвертичных отложениях. Всего было заложено 18 профилей и скважин с расстоянием между ними 100 м. Шурфы проходились до уровня грунтовых вод, шнековые скважины бурились через 50 м на всю мощность четвертичных отложений. В результате были выявлены значительные по площади и мощности рудопроявления урана в аллювиальных отложениях и коре выветривания коренных пород. Радиохимические исследования показали высокие концентрации в подземных водах урана — до  $5,2 \cdot 10^{-3}$  г/л, радона до 2244 эман и радия до  $2,83 \cdot 10^{-10}$  г/л. Концентрации радона в водах свыше 100 эман четко оконтурили зону тектонического нарушения, которая затем была вскрыта бурением. К этой зоне приурочен источник с аномальной радиоактивностью. Из нескольких шурфов, заложенных вдоль зоны разлома, была произведена откачка воды, показавшая увеличение содержания радона в 2—4 раза против исходного (с 97 до 460 эман и с 1180 до 2132 эман).

В местах наибольшей концентрации радиоэлементов в подземных водах, а также повышенной активности элювиальных и аллювиальных отложений были заложены две линии колодезных скважин глубиной до 120—130 м, вскрывших гнейсы, сланцы, кварциты с многочисленными раздробленными зонами и участками гидротермально измененных пород. В одной скважине на глубине 63—64 м была выявлена урановая минерализация, представленная уранитом.

В дальнейшем одновременно с более детальными поисково-разведочными работами на левом берегу реки была проведена аэрационная съемка по правому берегу. После этого выяснилось, что и здесь на протяжении более 3,5 км тянутся

спвностью от 40 до 960 эман. При бурении глубоких скважин по профилю, расположенному выше по потоку вод, была выявлена вторая зона гидротермально измененных пород с тонкой вкрапленностью уранинита в тесной ассоциации с сульфидами молибдена, никеля и меди.

*Радиогеологическая аномалия № 2.* Аномалия расположена в пределах горноскладчатой области; превышения водоразделов над тальвегами небольших долин здесь составляют 100—150 м. Климат резко континентальный, засушливый. Годовое количество осадков 120—150 мм. Постоянных водотоков на площади аномалии нет. Участок сложен спенитами, прорванными дайками порфиритов и снейт-порфиритов. Территория характеризуется широким развитием трещинных вод. Аномалия приурочена к группе источников с концентрацией урана  $4 \cdot 10^{-4} - 9 \cdot 10^{-3}$  г/л при фоновом содержании урана  $1,2 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона до 30 эман и радия меньше  $1 \cdot 10^{-12}$  г/л.

В результате детального геологического обследования и  $\gamma$ -съемки были выявлены зоны гидротермально измененных пород с повышенной  $\gamma$ -активностью (до 400 гамм при фоне 16—20 гамм). Все источники с высокими концентрациями урана оказались расположенными примерно по одной линии, простирающейся вдоль зоны гидротермально измененных пород.

В дальнейшем исследование были направлены на изучение структурно-геологических условий аномального участка и выявление источника обогащения подземных вод радиоактивными элементами. С этой целью были проведены детальная геологическая съемка и геофизические исследования (электроразведка и магниторазведка) с применением необходимого объема буровых работ и радиогеологического опробования скважин.

В результате установлено, что площадь аномалии представляет собой очень сложный в структурном отношении участок. Буровыми скважинами, пройденными выше по рельефу от выходов источников с аномальными концентрациями радиоактивных элементов, выявлены рудоуплотняющие структуры, в которых отмечены три слепо-залегшие. В той части рудоносной структуры, где на глубине фиксировалось урановое оруденение, скважинами вскрылись высоко-радиоактивные подземные воды с содержанием урана порядка  $n \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$  г/л и радона до 300 эман. В тех же структурах, но на участках, где оруденение не фиксировалось, содержание урана в воде было  $n \cdot 10^{-6}$  г/л, радона 50 эман.

В результате поисково-разведочных работ было выявлено урановое месторождение, расположенное на расстоянии около 0,8 км (вверх по потоку подземных вод) от первоначально зафиксированных источников с повышенной радиоактивностью.

*Радиогеологическая аномалия № 3.* Рельеф района аномалии среднегорный, умеренно расчлененный. Гидрографическая сеть развита слабо. Климат резко континентальный со среднегодовым количеством осадков 200—300 мм при величине испаряемости 500—600 мм и среднегодовой температурой 1°C. Распространена многолетняя мерзлота островного характера. В районе развиты палеозойские граниты.

Аномалия приурочена к источнику в делювиальных отложениях, перекрывающих граниты. Источник функционировал летом и пересыхал к осени. Вода гидрокарбонатно-натриево-магниева с минерализацией 37 мг/л. Содержание в воде урана  $1,5 \cdot 10^{-6}$  г/л при фоне  $2,4 \cdot 10^{-6}$  г/л и радона 980 эман при фоне 30 эман. Радиогидрогеологическая аномалия сопровождалась  $\gamma$ -аномалией в увлажненных наносах интенсивностью 1200—1500 гамм.  $\gamma$ -аномалия также имела сезонный характер.

На участке аномалии были произведены детальные геофизические исследования, в результате которых по склону выше источника выявлены тектонические зоны дробления с эманационными и  $\gamma$ -аномалиями. Для разведки этих зон была заложена штольня. В 80 м выше источника в штольне встречено первое водопроявление с содержанием урана  $1 \cdot 10^{-4}$  г/л, радона до 1200—1800 эман и радия до  $7 \times 10^{-11}$  г/л. В 40 м выше по потоку от этого водопроявления была подсечена первая тектоническая зона с урановой минерализацией, в пределах которой содержание урана в воде доходило до  $n \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-3}$  г/л.

Далее за первой зоной содержание радиоактивных элементов в воде резко снизилось (урана до  $1,5 \cdot 10^{-6}$  г/л, радона до 575 эман), а затем снова стало постепенно повышаться. В 200 м от первой рудной зоны штольня вскрыла вторую рудную зону, в пределах которой содержание урана в воде достигало  $n \cdot 10^{-4}$  г/л и радона 1000 эман.

## 7. ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОИСКОВ

В результате проведенных в последние годы исследований доказана целесообразность использования гидрохимического метода при поисках урановых месторождений. Однако в разработке и применении этого метода имеются некоторые трудности.

1. Эффективность метода все еще низкая, что объясняется сложностью интерпретации и оценки выявленных аномалий. Необходимы для этого буровые работы, опытные откачки и другие исследования выполняются в недостаточном объеме.

2. При проведении радиогидрогеологических исследований, особенно при интерпретации выявленных водных аномалий, нередко недоучитываются физико-географические, геологические, геохимические и палеогидрогеологические условия, что существенно снижает эффективность поисков.

3. Не выяснены возможности и условия применения метода в районах распространения многолетней мерзлоты.

4. Недостаточно изучены особенности миграции и поведения радиоэлементов в подземных водах различного химического состава и минерализации в различных климатических геологических и геохимических условиях.

Изучение особенностей водной миграции урана в сопутствующих ему элементах обеспечит более определенную и надежную оценку концентрации в водах отдельных элементов (в их комплексе) как поисковых признаков на равновесное оруденение в разных природных условиях. Учет сезонных изменений концентраций этих элементов в водах позволит более правильно оценивать нормальный фон и главное количественно определить нижний предел аномальных содержащий элементов при орографировании водных ореолов рассеяния в разное время года. Этот вопрос изучен слабо и требует постановки специальных режимных наблюдений. Четкое представление об особенностях формирования водных ореолов рассеяния урановых месторождений в определенных ландшафтно-геохимических условиях поможет правильно выбрать размеры сети при гидрохимическом опробовании вод, применять соответствующую методику работ и оценивать выявляемые аномалии при значительном сокращении числа различных дополнительных определений геохимических показателей и сопутствующих элементов. Это обеспечит более высокую геологическую эффективность гидрохимических поисков и в то же время значительно снизит их стоимость. Особенно важным является усиление опытно-методических работ по изучению водных ореолов рассеяния в горно-таежных районах и на закрытых площадях с большой мощностью рыхлых образований. Чрезвычайно актуальна разработка метода применительно к районам распространения островной и особенно сплошной многолетней мерзлоты. Необходимо также разработка поисковых радиогидрогеологических критериев для водоносных горизонтов, в пределах которых преобладают восстановительные условия; дальнейшее уточнение критериев оценки радиогидрогеологических аномалий для разделения истинных (рудных) аномалий от ложных (безрудных); разработка метода гидрохимического опробования поисковых скважин без предварительной обсадки и прокачки, а также дальнейшие работы по усовершенствованию и упрощению методики определения радиоактивных и сопутствующих элементов в подземных водах. Учитывая большую важность определения показателей окислительно-восстановительных условий среды и общей минерализации вод, необходимо шире внедрять в практику гидрохимических поисков урана лучшие образцы потенциометров, солемеров и резистивметров.

## БИОГЕОХИМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

### 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА

Теоретической основой биогеохимических методов служит зависимость химического и видового состава органического мира от химического состава питающей его среды. Основоположниками биогеохимии как науки, изучающей связь между химическим составом почв, растений и животных и ее применением для решения геологических вопросов, являются В. И. Вернадский, А. П. Виноградов, А. Е. Ферсман и др. Из зарубежных ученых, много сделавших в этой области, в первую очередь нужно назвать В. М. Гольдшмидта и работающую над методикой биохимических поисков руд урана Е. Л. Каннон.

Рассматриваемые методы привлекают внимание геологов возможностью повышения глубины наземных поисков руд благодаря способности корневой системы растений проникать в почвогрунты нередко на значительные глубины (табл. 20). Наибольшая глубина проникновения корневой системы наблюдается у растений фреатофитов (до 4 м и более), растущих преимущественно в аридных условиях. К таким растениям относятся саксаулы, верблюжья колючка, посчаная акация и др. (см. табл. 20).

В случае, когда корневая система растений поглощает воду из капиллярной каймы грунтовых вод, глубинность показаний растений повышается на мощность пород, омываемых грунтовыми водами и высоту их капиллярной каймы.

В настоящее время существует несколько биогеохимических методов — геоботанический, метод индикаторных растений, морфометрический (тератологический), собственно биогеохимический и почвенно-металлометрический. Но последний обычно, как и в настоящем руководстве, рассматривается как уранометрическая съемка (гл. VII). Разрабатывается также микробиологический метод.

Перечисленные методы, за исключением биохимического и почвенного, являются косвенными методами, так как показателями рудности площади служат видовой состав растительного покрова или отклонения в морфологии растений, вызываемые высоким содержанием рудных элементов в корнеобитаемом слое.

Биогеохимический или, как мы его далее будем называть, флорометаллометрический метод является прямым методом, так как о рудности площади здесь свидетельствует содержание рудных элементов в золе изучаемых растений.

Для поисков руд урана наибольшее применение из этих методов получил лишь флорометаллометрический, отдаваемое геологами флорометаллометрические

Таблица 20

Глубина проникновения корневой системы растений в почву-грунты  
в различных климатических зонах (по литературным данным)

Растение	Глубины проникновения корней, м	Место произрастания
<i>Betula nana</i> — береза карликовая	1,6	Лесотундра и тайга
<i>Picea vulgaris</i> — ель 60 лет	0,95—1,15	
<i>Calamagrostis Langsdorffii</i> Trip — вейник	0,58	
<i>Rosa acicularis</i> L. — шиповник	0,56	
<i>Carex globularis</i> L. — осока	0,47	
<i>Larix sibirica</i> L. — лиственница сибирская	0,3—0,4	
<i>Larix daurica</i> — лиственница даурская	0,3—0,4	
<i>Vaccinium uliginosum</i> — голубика	0,15—0,16	
<i>Ledum palustre</i> L. — багульник болотный	0,15—0,16	
<i>Quercus robur</i> L. — дуб черешчатый	3,5	Лесостепь
<i>Egopium verrucosum</i> Scop. — бересклет бородавчатый	2,5	
<i>Lonicera tataricum</i> — жимолость татарская	2,5	
<i>Rhamnus frangula</i> — крушина ломкая	2,0	
<i>Spiraea crenata</i> — спирея горючатая	2,0	
<i>Statice latifolia</i> Smith — кермек (длинноуши широколистный)	2,0	Степь (европейская)
<i>Festuca sulcata</i> — типчак	2,0	
<i>Pimpinella saxifraga</i> — бедренец камнеломковый (камнеломка)	1,5	
<i>Stipa capillata</i> — ковыль	1,4	
<i>Stipa ucrainica</i> — ковыль украинский	1,4	
<i>Stipa stenophylla</i> Czern. — ковыль узколистный	1,2	
<i>Veronica spuria</i> L. — перовиянка ложная	1,2	
<i>Artemisia maritima</i> — полынь	2,0	Степь (среднеазиатская) То же » » » »
<i>Salix rosmarinifolia</i> — ива розмариннолистная	1,6	
<i>Euphorbia Gerardiana</i> — молочай	1,2	
<i>Festuca sulcata</i> — типчак	1,8	
<i>Haloxyton persicum</i> — саксаул белый	4—6—8 (средна 16)	Полупустыня (песчаная) То же » » » »
<i>Haloxyton aphyllum</i> — саксаул черный	4,0	
<i>Artemisia Terrae albae</i> — полынь сероземная	0,8	
<i>Salsola Lariciifolia</i> — боялыч (казахский)	0,5	
<i>Alhagi Kirghisorum</i> — верблюжья колючка	10,0	
<i>Alhagi pseudalhagi</i> — верблюжья колючка	2,0	
<i>Eremopis flaccidum</i> — куйрук	4,1	Пустыня (барханские пески) То же » »
<i>Ammodendron Conollyi</i> Вге. — песчаная акация	4,0	
<i>Salsola Richteri</i> Karel. — черкез	2,8—4,0	
<i>Calligonum caput Medusae</i> Schrenk. — далайгун	2 (средна 5—7)	

Растение	Глубина проникновения корней, м	Место произрастания
<i>Astragalus ammodendron</i> Вге. — астрагал песчаный	0,6—2,0	Пустыня
<i>Rheum turkestanicum</i> J. — ревень	1,1	(бугристые пески)
<i>Amygdalus spinosissima</i> — миндаль колючий	3—4	Пустыни (низкогорная)
<i>Ephedra distachia</i> — эфедра обыкновенная	2	То же
<i>Atraphaxis karataviense</i> — к урчавка	1,5	" "
<i>Salsola arbuscula</i> Pall. — боялыч белый	0,6—1,25	Пустыня
<i>Salsola Laricifolia</i> Turcz — боялыч черный	1,0	(бугристо-грядовые пески)

две причины. Первая состоит в недостаточной надежности геоботанического и морфометрического методов, обусловленной взаимозависимостью экологических факторов (условий роста), вследствие чего одни и те же изменения в составе растительных сообществ и морфологии растений могут быть вызваны различными факторами. Эта особенность растений позволяет использовать геоботанический и морфологический методы лишь в качестве вспомогательных. Вторая причина заключается в возможности применения для анализа золь высокочувствительных химических и радиометрических методов. Так, порог чувствительности перлюво-люминесцентного метода определения урана в настоящее время равен примерно  $0,5 \cdot 10^{-6} \%$ , а при определении суммарной радиоактивности пробы по  $\alpha$ -излучению около  $3,0 \cdot 10^{-4} \%$  эквивалентного урана; эти величины близки к фоновым содержаниям радиоактивных элементов в почве и растениях.

В противоположность относительно высокой чувствительности аналитических методов физиологическая реакция растений на токсичность урана начинает проявляться при значительно более высоких его содержаниях в корнеобитаемом слое. Так, судя по данным Е. Кэвон, это явление наблюдается при содержаниях урана, превышающих  $0,01 \%$ , что в 2000 раз выше верхнего порога чувствительности перлюво-люминесцентного метода.

Еще сложнее использовать для поисков руд урана метод индикаторных растений, поскольку для их развития требуется одновременное присутствие в корнеобитаемом слое больших количеств ряда элементов. В районе плато Колорадо такими элементами, определяющими интенсивное поступление урана в растения, оказались селен, сера и кальций\*.

\* Метод индикаторных растений здесь не рассматривается, так как достаточного материала в этой области еще нет, а ранее установленные на Колорадском плато, оказались т. е. не встречающимися и других районах.

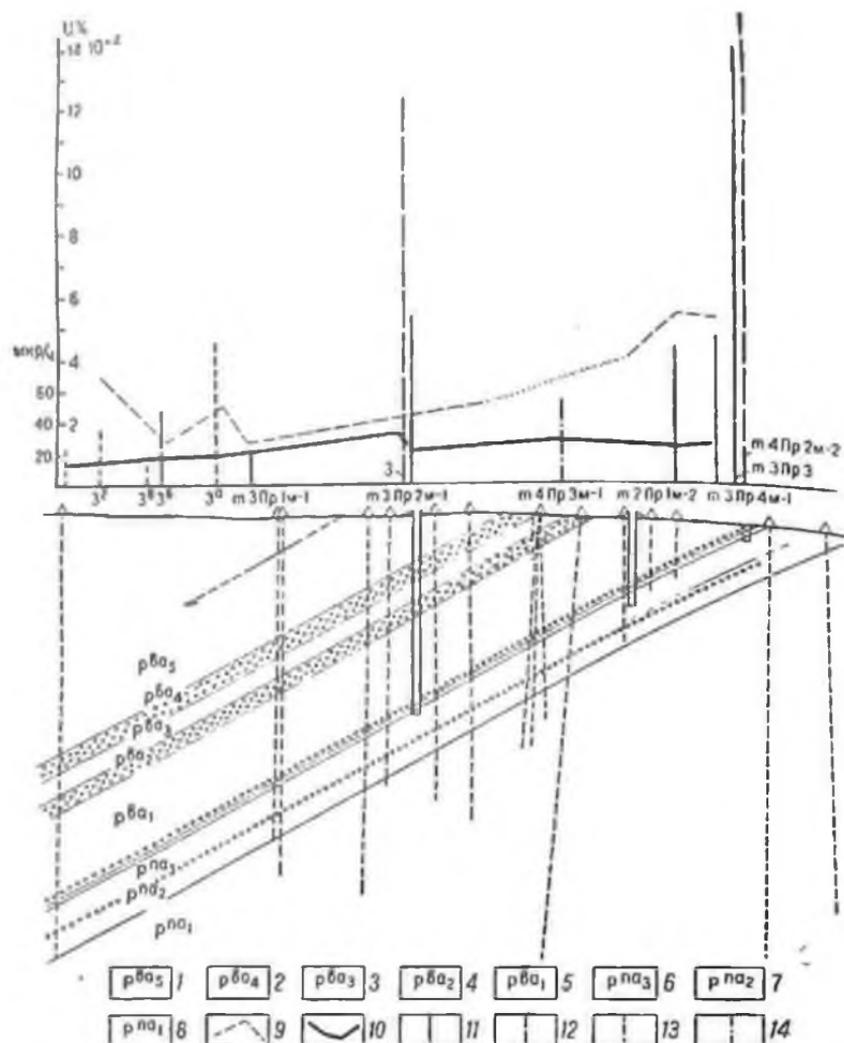


Рис. 60. Сравнительные данные поазанний уранофлуорометрии и радиометрических методов в условиях пустыни (по Д. П. Малюге, 1963)

1 — верхний аргиллитовый горизонт; 2 — верхний горизонт конкредий; 3 — промежуточный аргиллитовый горизонт; 4 — нижний горизонт конкредий; 5 — нижний аргиллитовый горизонт; 6 — песчаниковый горизонт; 7 — алевалито-аргиллитовый горизонт; 8 — аргиллитовый горизонт; 9 — содержание урана в почвах; 10 — кривая  $\gamma$ -съемки. Содержание урана: 11 — в золе саялки кустарниковой; 12 — в золе астрагала; 13 — в золе полыни; 14 — в золе других растений

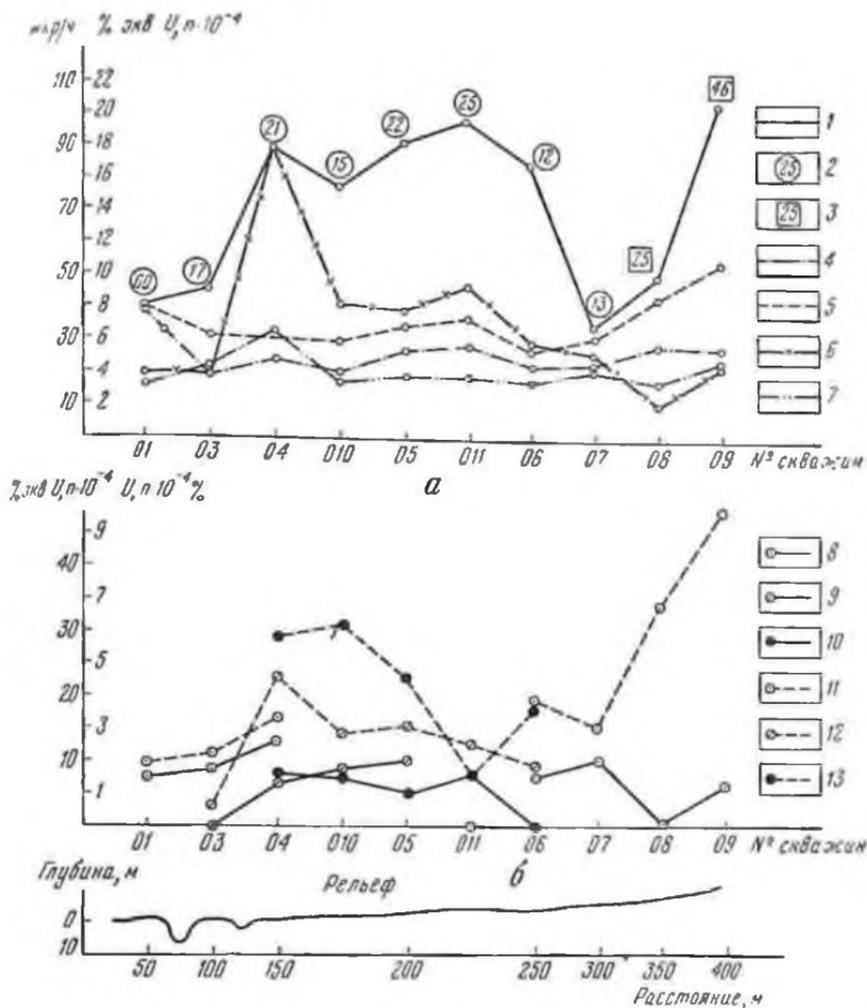


Рис. 61. Сравнительные данные радиометрических (а) методов и флуориметрии (б) в условиях гумидного климата при залегании радиоактивных делювиально-аллювиальных отложений (сква. 01—07, 010, 011) и коры выветривания фельзит-порфиров (сква. 08, 09) на разных глубинах

1 —  $\gamma$ -активность радиоактивных делювиально-аллювиальных отложений; 2 — глубина залегания радиоактивных делювиально-аллювиальных отложений (в м); 3 — то же, коры выветривания фельзит-порфиров; 4 —  $\gamma$ -активность горизонта  $A_1$ ; 5 — то же, горизонта В/С; 6 — уранометрия горизонта  $A_1$ ; 7 — то же, горизонта В/С; 8—10 —  $\alpha$ -активность коры выветривания; 8 — дуба, 9 — березы, 10 — осины; 11—13 — содержание урана в коре деревьев; 11 — дуба, 12 — березы, 13 — осины

Отмеченное преимущество флорометаллометрии перед другими биогеохимическими методами обусловило широкое изучение ее поисковых возможностей в различных климатических зонах — от субтропических во Франции и в Японии в полупустынных условиях в США до таяжских ландшафтов Канады и СССР. При этом метод изучался не только для поисков руд урана, но более широко для поисков руд цветных и редких металлов.

При поисках руд урана оказалось, что для применения метода необходимо нахождение урана в почвенном растворе или грунтовых водах (в зависимости от того, откуда растение поглощает воду)

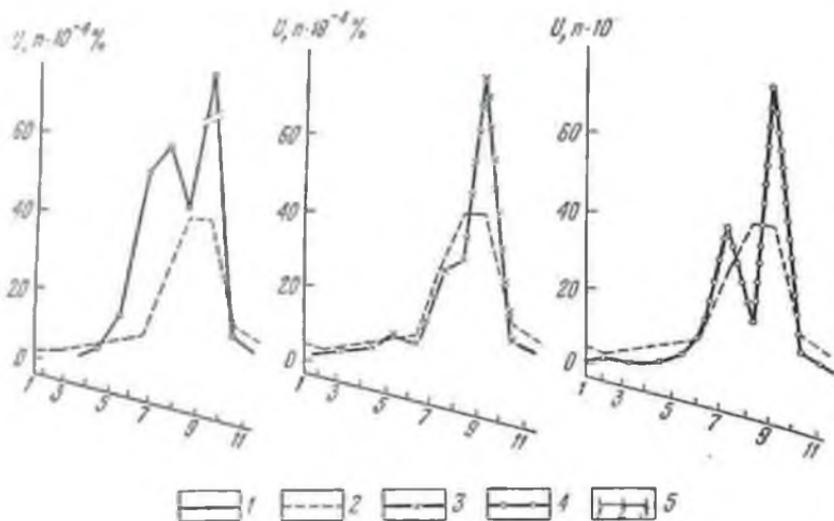


Рис. 62. Сравнительные данные флорометаллометрии и почвенной уранометрии в условиях субтропиков по разным участкам (Goldstein, 1957)  
1, 3 и 4 — уран-флорометрия; 2 — почвенная уранометрия; 5 — точки опробования

в окисленной форме. Флорометаллометрия при поисках руд урана в условиях элювиальных ландшафтов с маломощным покровом рыхлых отложений оказалась по эффективности близкой к более простым методам, таким, как наземные виды  $\gamma$ -съемки и эманационный метод.

Преимущество флорометаллометрии по сравнению с наземными видами  $\gamma$ -поисков проявляется пока лишь при поисках слепых рудных тел экзогенного происхождения, сложных в какой-то мере вторичными минералами и перекрытых обводненными нормальными или слабо метаморфизованными осадочными породами (Cannon, Starret, 1956; Кэнон и Клейнхемпл, 1958).

Известны примеры положительного применения флорометаллометрических поисков в указанных условиях в различных климатических зонах. Для условий полупустыни плато Колорадо эффективность флорометаллометрии показана в работах Е. Кэнон с со-

трудностями и Фрелиха (Froelich, Kleinhampl, 1960), для пустыни Средней Азии — Д. П. Малюгой (1963), для условий гумидного климата — Гольдштейном (1957) и М. Н. Яковлевой (1963). Однако отсутствие единой методики в проведенных исследованиях

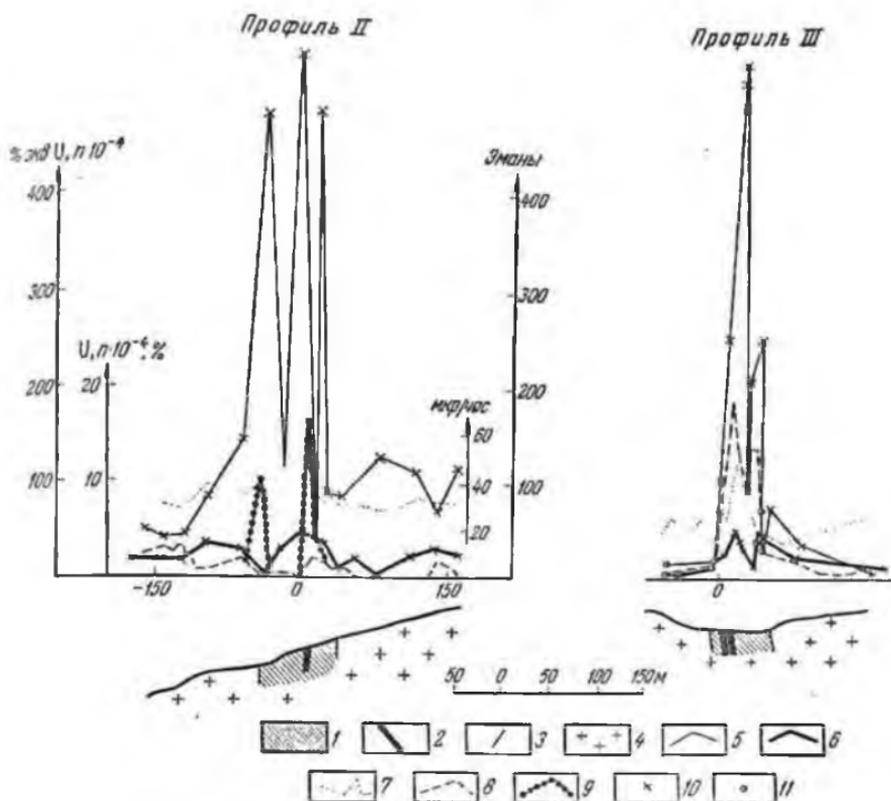


Рис. 63. Сравнительные данные флуориметрии и радиометрических методов в условиях трансэкваториального ландшафта лиственничной тайги

1 — ореол рудного тела; 2 — рудные тела; 3 — границы ореолов уранового оруденения; 4 — граниты; 5 —  $\alpha$ -флуориметрия; 6 — уран-флуориметрия; 7 —  $\gamma$ -активность на поверхности почвы; 8 — содержание радона во влажном почвенном воздухе; 9 — то же, в сухую погоду; 10 — побеги березы; 11 — побеги осины

п ограниченность данных затрудняют обобщение имеющегося материала.

Некоторые примеры применения флуориметрии приведены на рисунках 60, 61, 62 и 63. На рис. 60 — для пустынных условий, на рис. 61 — для условий гумидного климата горно-таежной зоны без многолетней мерзлоты, на рис. 62 — для субарктических условий, на рис. 63 — для таежной зоны с многолетней мерзлотой.

## 2. ОСОБЕННОСТИ БИОГЕОХИМИИ УРАНА И РАДИЯ В РАСТЕНИЯХ И ФОРМИРОВАНИЕ ФЛОРОМЕТАЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Биогеохимия урана и радия широко освещена в работах В. И. Баранова (1939), К. Г. Кувашиевой (1939) и др. и в специальных журналах по биохимии. Биогеохимические особенности урана применительно к поискам урановых руд рассматриваются в работах А. Л. Ковалевского (1962), Д. П. Малюги (1963), Д. Я. Суражского (1960), М. И. Яковлевой (1963), Е. Кэннон (Сэннон, 1952).

Установлено, что поступление радиоактивных элементов из почво-грунтов в растение, как и других элементов, определяется физико-химическими процессами на границе контакта поверхности корня и почво-грунта. Главными из этих процессов являются диффузия, обменные реакции и сорбция.

Полное соответствие состава золы растений составу среды питания наблюдается сравнительно редко, так как растения обладают свойствами, регулирующими соотношения и количества проникающих в них элементов в благоприятном для их развития направлении. Вместе с тем вследствие непосредственного контакта тканей и клеточного сока корня с почво-грунтами и насыщающими их растворами этих свойств часто недостаточно для защиты растений от вредных элементов.

Основным барьером на пути движения рудных элементов в растения служит их корневая система. Избыток элементов против физиологической потребности растения и вредные элементы корни задерживают. Поэтому максимальное содержание химических элементов, в том числе урана и радия, у большинства растений наблюдается в корнях. По данным Е. Кэннон (Сэннон, 1952), содержание урана в корнях дуба (*Quercus Gambelii*), растущего над рудной зоной, превышает его содержание в листьях в 19 раз ( $10,0 \cdot 10^{-4}\%$  и  $190,0 \times 10^{-4}\%$  соответственно), в то время как в условиях фона всего в 4 раза ( $0,5 \cdot 10^{-4}\%$  и  $2,0 \cdot 10^{-4}\%$ ).

Чем выше способность растений к избирательному поглощению химических элементов, тем выше его индикаторные свойства, т. е. тем выше соответствие состава его золы составу питающей среды.

Избирательная способность растений по отношению к урану и продуктам его распада неодинакова: выше по отношению к радию и выше по отношению к урану, что объясняется токсичностью последнего. Вследствие этого кларк урана в растениях имеет одно из наиболее низких значений по сравнению с другими химическими элементами (Малюга, 1963). Коэффициент биологического поглощения КБП\* урана снижается с повышением его содержания в кор-

\* А. И. Перельман, 1961.

необитаемом слое. Так, если в условиях фова ( $3-4 \cdot 10^{-4}$  %) КБП урана колеблется от 0,03 до 0,3 (Ковалевский, 1962), то при повышении содержания урана в корнеобитаемом слое до  $n \cdot 10^{-3}$  % и снижения КБП урана приведены в табл. 21. По данным М. Н. Яковлевой (1963), это явление характерно главным образом для молодых

Таблица 21

*Изменение коэффициента биологического поглощения радиоактивных элементов в растениях в зависимости от их содержания в корнеобитаемом слое (расчеты выполнены М. Н. Яковлевой по литературным данным)*

Радиоактивный элемент	Растение	Содержание элемента в корнеобитаемом слое, %	Содержание элемента в растении, %	Коэффициент биологического поглощения	Автор
Уран	Польдь	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$0,26 \cdot 10^{-4}$	0,29	(Саннон, 1952)
		$3,0 \cdot 10^{-4}$	$0,20 \cdot 10^{-4}$	0,07	То же
		$290,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	0,007	» »
		$2400,0 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	0,0024	» »
		$3070,0 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	0,0009	» »
Уран *	Верхушки ветвей можжевельника	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$	0,05	(Саннон, Starrot, 1956)
		$400,0 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$	0,001	То же
		$4200,0 \cdot 10^{-4}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	0,00012	» »
Уран *	Верхушки ветвей сосны	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$	0,030	» »
		$200,0 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$	0,002	» »
		$400,0 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$	0,001	» »
		$1500,0 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-4}$	0,00058	» »
Радий	Горох	$0,28 \cdot 10^{-11}$	$0,50 \cdot 10^{-11}$	1,7	В. И. Баранов, 1939
		$2,1 \cdot 10^{-11}$	$3,37 \cdot 10^{-11}$	1,6	То же
		$7,5 \cdot 10^{-11}$	$50,7 \cdot 10^{-11}$	6,8	» »

\* Уран в указанных содержаниях находился на глубине 21 м.

верхушечных частей ветвей. Более старые части ветвей менее реактивны по отношению к радиоактивным элементам (табл. 22).

КБП радия, как элемента менее токсичного для растений, чем уран, увеличивается с повышенном его содержания в почве и нередко превышает единицу, особенно для растений-концентраторов — карликовая береза (*Betula nana*), горох.

Общей биохимической особенностью урана и радия, отличающей их от такого парагенетического спутника урана в урановых рудах, как молибден, является акропетальный тип распределения в растениях, характеризующийся тем, что процент их содержания в растении уменьшается в направлении от корней к надземным частям (стволу, ветвям, листьям), а также от старых органов к молодым. В случае древесных растений на это указывает и то, что содержание урана в листьях по сравнению с содержанием в

Содержание урана в ветвях деревьев в зависимости от возраста анализируемой части ветви и места произрастания и градиент содержания урана между однолетними и последующими по возрасту отрезками ветвей (Яковлева, 1963)

Растение	Место и условия произрастания	Возраст анализируемого отрезка ветвей, годы	Содержание урана (п · 10 <sup>-4</sup> %)	Значение градиента содержания урана между однолетним и последующим по возрасту побегам
Листоенница даурская	В условиях фоновой площади	1	0,3	0,70 0,87 0,81
		2	0,20	
		3	0,26	
		4	0,25	
То же	Над вторичным ореолом	1	0,2	2,5 — 10,50
		2	0,5	
		3	—	
		4	2,1	
" "	Над рудным телом	1	0,5	0,4 6,6 10,4
		2	0,2	
		3	3,3	
		4	5,2	
Рябшопливник	В условиях фоновой площади	1	2,0	1,0 4,0
		3	2,0	
	Над вторичным ореолом	1	15,0	
		3	60,0	

(табл. 23). Содержание радия в листьях часто в 3—5 раз меньше, чем в ветвях (Ковалевский, 1962).

Неравномерность распределения урана и радия в растении наблюдается не только для различных органов, но и в пределах одного органа. Это свойство особенно важно учитывать при исследовании растений с рудных площадей. Как уже отмечалось выше, содержание урана в отрезках ветвей деревьев трех- и четырехлетнего возраста с рудной площади в несколько раз выше (до 10 раз), чем в их однолетних верхушечных отрезках (см. табл. 22). Кроме того, на величину содержания урана в опробуемой части растения влияет вид растения, время отбора растительных проб и радиальный характер питания растений. Чтобы избежать влияния времени опробования растений ведут в период их условного физиологического покоя. Влияния вида растения, возраста и радиального характера питания, отражающего неоднородность состава почвы, избежать нельзя и его следует учитывать, основываясь на экспериментальных данных (табл. 24 и 25).

В отличие от урана и радия молибден, бор, бериллий, циркон и ряд других имеют базипетальный тип распределения в растении, т. е. концентрируются в молодых частях растения (см. табл.), что

Распределение рудных элементов (в  $10^{-4}\%$  от сырой золы) в различных органах растений (по литературным данным)

	U	Pb	Mo	Zn	Cu	Be	B	Zr
Ильм листья ветви							943 22	
Дуб листья ветви кора	2; 18* 30; 70* 70; 74*							
Береза листья ветви кора		100; 20; 350** 50 100; 330; 430**	10 — 1	2800 — 6400	250 — 270	53 53 23		73 26 23
Листовенница хвоя ветви кора					720 — 870	90 90 37		88 88 70
Осица листья ветви кора		30 15 10				62 53 23		70 39 23
Саксаул чер- ный листья кора	1,2 11,0							
Астрагал листья кора	2,7 6,7							
Жимолость листья кора			10 0,3					

\* Данные двух наблюдений.

\*\* Данные трех наблюдений.

необходимо учитывать при интерпретации флорометаллометрии урановых аномалий по элементам-спутникам.

Флорометаллометрические аномалии, будучи связаны с локальными химическими и гидрохимическими аномалиями, как источник снабжения растений повышенными количествами рудных элементов подчинены им и пространственно. В соответствии с этим флорометаллометрические аномалии могут как совпадать с пространственным распространением рудного тела так и быть смешанными с аномалиями от них.

Таблица 24

Содержание урана и  $\alpha$ -активность в различно ориентированных по отношению к рудному телу ветвях можжевельника и лиственницы

Растение	Место отбора растительной пробы		Автор
	со стороны рудного края	со стороны, противоположной рудному телу	
Можжевельник . . .	3,2 *	0,53 *	Е. Кэноп, (Сяппо, 1956) Разумова В. Н., (1959) ***
Лиственница . . . .	45,0 *	22,0 *	
• . . . .	158,0 **	73,0 **	То же

\* Содержание урана в л · 10<sup>-4</sup>%.

\*\*  $\alpha$ -активность золы растений в экв. U (л · 10<sup>-4</sup>%).

\*\*\* Устные сообщения.

Таблица 25

Реакция различных растений на радиоактивные элементы в зависимости от типа ландшафта (составлено М. Н. Яковлевой по материалам А. Л. Ковалевского, 1962)

Растение	Тип ландшафта	Относительное содержание (среднее)	
		урана	радия ( $\alpha$ -активность)
Береза	Независимо от типа ландшафта	1,0	1,0
Лиственница даурская	Автономный (элювиальный)	3,5	1,1
Рододендрон даурский	То же	5,0	2,0
Сосна, обыкновенная	Подчешенный (супераккумулятивный)	5,5	0,25
Рябинолистник	То же	6,0	0,2
Ива (карликовая)	» »	1,5	0,3
Осина	» »	0,9	0,3

### 3. УСЛОВИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ФЛОРОМЕТАЛЛОМЕТРИИ

Роль флорометаллометрии в комплексе поисковых руд урана определяется условиями, в которых могут проявиться его преимущества перед металлометрическими и наиболее экономичными методами — радиометрическими. В соответствии с этим условием намечаются четыре варианта задач, для решения которых применение флорометаллометрии имеет преимущества перед другими наземными методами.

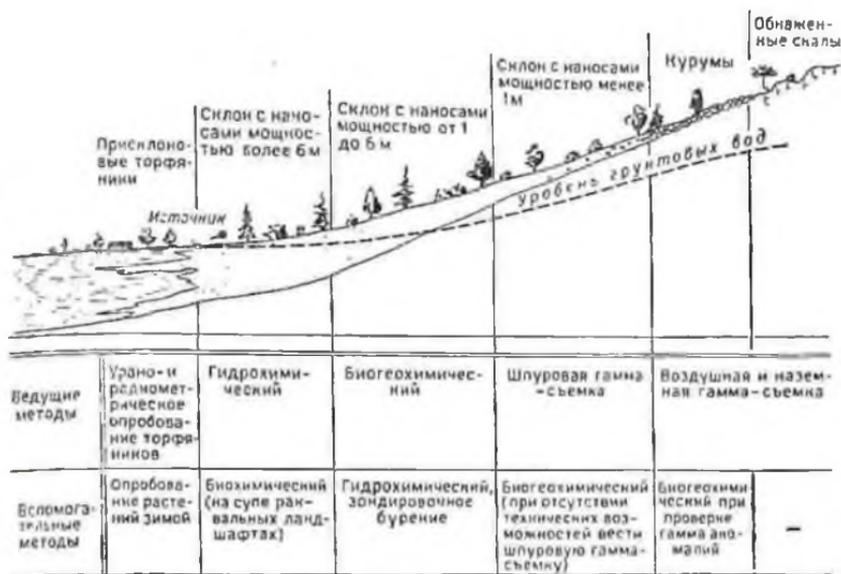


Рис. 64. Пример применения биогеохимического метода в комплексе с другими поисковыми методами

Первый вариант — поиски по неглубоко погребенным ореолам на площадях категорий II—III с каменистыми почво-грунтами, когда шпуровая съемка исключается по техническим причинам, а наземная радиометрическая неэффективна.

Второй вариант — поиски на площадях категорий I, II и III в зимних условиях, когда наземные радиометрические методы не могут быть применены.

Третий вариант — поиски в пустынных условиях на площадях с незакрепленным рыхлым покровом.

Четвертый вариант — прослеживание рудоносных структур над обводненным рыхлым покровом.

Флорометаллометрия рекомендуется при проведении и детальных исследований. Масштабы биогеохимических исследований определяются масштабами одновременно проводимых поисковых работ с учетом размеров

шафтов. Необходимо, чтобы биохимическим опробованием были охвачены все пересекаемые профилями элементарные ландшафты не менее чем с трехкратной повторностью для каждого, особенно в условиях фоновой и предположительно рудовосной площади.

Пример применения биогеохимического метода в комплексе с другими поисковыми методами показан на рис. 64.

#### 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ БИОГЕОХИМИЧЕСКИХ (ФЛОРОМЕТАЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ) ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Флорометрические поиски включают ряд этапов: подготовительный, выбор растений и опробуемой их части (органа), выбор масштаба поисков и опробование. Комплекс перечисленных работ изложен в «Инструкции по геохимическим методам поисков рудных месторождений» (1965). Ниже приводятся только некоторые дополнительные сведения, которые необходимо учитывать при опробовании растений на содержание в них урана.

**Отбор растительных проб.** При поисках руд урана по ослабленным ореолам с помощью опробования древесной растительности оптимальными органами для опробования являются трех- и четырехлетние отрезки ветвей, выделяемые по узлам роста. Листья и иглы с ветвей удаляются в поле.

Радиоактивность растений в настоящее время определяется главным образом по содержанию в золе урана или по  $\alpha$ -активности. В первом случае на анализ требуется 0,2 г золы, во втором — 7—10,2 г, что отвечает в среднем соответственно 50 и 300 г сухого веса растений.

**Подготовка проб к анализу. Измельчение.** Степень измельчения пробы зависит от применяемого метода ее сжигания. При мокром сжигании и при проведении спектрального анализа неозоленных растений необходимо тонкое измельчение проб, а при сухом озолении — крупное измельчение, т. е. до 5—7 см. Тонкое измельчение мешает доступу воздуха и для полного озоления требуются повышенные температуры.

**Озоление растительных проб** — одна из самых ответственных подготовительных операций\*. Специальные приборы для этой цели отсутствуют. В лабораторных условиях для сушки проб исполь-

\* При сухом озолении получаемый продукт представляет главным образом карбонатами, которые при повышенной температуре выше 450—470° С начинают диссоциировать с образованием оксидов, причем карбонаты различных элементов диссоциируют при разных температурах. Отсутствие контроля температурного режима может привести к несопоставимым результатам.

зуют термостаты, а для озоления — муфели. Расход электричества и дров для озоления можно значительно сократить, если высушенные пробы предварительно обжигать на алюминиевых лотках, раскладывая их по правилам сложения костра. В этом случае муфель используется только для доозоления всплывших угольков. Для этого зола, полученная на лотках, сыпается в фарфоровые тигли и еще горячая ставится в муфель с едва заметным темно-красным накалом. Производительность работы по озолению зависит от наличия муфельей и площади вытяжного шкафа, где размещаются лотки. При одном муфеле на 10 тиглей диаметром 8 см в трех сковородах производительность равна 20—25 пробам.

Наиболее удобна для полевых условий печь Медведова (Полыкарповичи, Полыкарповичина, 1964). Недостатком полевых печей является отсутствие контроля температурного режима обжига проб и применение для проб железных стаканов, дающих окалину, что засоряет пробу и вызывает необходимость просеивания получаемой золы. Производительность полевых печей зависит от диаметра печи, определяющего количество загружаемых в печь стаканов.

Зола растений после небольшого охлаждения пересыпается в пакеты из восковки и хранится в эксикаторе над силикагелем. Последнее необходимо для предохранения золы от влаги, так как зола очень гигроскопична.

Изучение почвенного покрова при проведении флуориметрии имеет две задачи. Первая — установление степени автономности водного режима ландшафта, определяемого уровнем грунтовых вод, который не всегда связан с наземными формами рельефа, но находит отражение в составе растительности и особенно в характере почвенного покрова. Вторая задача — уточнение ландшафтных границ эффективного и экономичного применения флуориметрии и более простого метода — металлотрии почвенных горизонтов.

Первая задача решается путем установления типа, вида и разновидности почвенного покрова исследуемой площади по данным изучения почвенных разрезов, закладываемых на основных элементах мезо-рельефа и микрорельефа.

Вторая задача решается путем сопоставления показателей радиоактивности золы растительных и почвенных проб. Почвенные пробы отбираются на местах опробования растений из верхней части гумусового горизонта, непосредственно из-под лесной подстилки или травянистого войлока. Для анализа берут фракцию менее 0,5 мм. Радиоактивность проб определяют по  $\alpha$ -активности и по содержанию в них урана. Первый показатель рекомендуется как наиболее простой при высокой точности его определения. Вторым показателем непосредственно отражает геохимию урана в данных ландшафтных

Анализ радиоактивности растений. Наиболее распространенными приемами определения содержания урана в золе растений являются люминесцентный метод и метод измерения

золе. Второй метод более простой в выполнении. В литературе имеется указание о применении для измерения радиоактивности неозеленных растений (Кэввой и Клейнхемпль, 1958). Прямое определение содержания урана в золе растений проводят по методу В. С. Быковой (1955). Точность этого метода составляет 20—30%, чувствительность  $0,5 \cdot 10^{-6}$  г, производительность 25—30 анализов в смену на одного аналитика и препаратора. Измерение люминесценции перлов проводят или визуальным путем сравнения со шкалой или на специальных приборах типа ЛЮФ-57, ЛЮФ-58.

Анализ  $\alpha$ -активности золе выполняется с помощью сцинтилляционного прибора РАЛ-1 или радиометра ЛАС со сцинтилляционной приставкой П-349-2. Точность метода определяется активностью пробы, чувствительностью датчика и размерами площади тарелочки для образца, чувствительность метода около  $3,0 \cdot 10^{-4}$  %.

Чем выше значение этих параметров, тем точнее измерение. Время, необходимое для измерения пробы при заданной ошибке, вычисляется по формуле

$$t = \frac{1 + \frac{2 \cdot I_{\text{нф}}}{I - I_{\text{нф}}}}{(I - I_{\text{нф}}) \cdot \sigma^2}, \quad (38)$$

где  $t$  — время измерения при заданной ошибке, мин;  
 $I_{\text{нф}}$  — число импульсов в 1 мин естественного фона;  
 $I$  — число импульсов пробы и естественного фона;  
 $\sigma$  — заданная ошибка, отнесенная к единице.

Пользуясь формулой (38), можно найти ошибку измерения  $\alpha$ -активности пробы при биохимических исследованиях выражается в процентах эквивалентного урана, вычисляемого по формуле

$$\% \text{-экв. U} = \frac{\% \text{ U в эталоне } (I - I_{\text{нф}})}{I_2 - I_{\text{нф}}}, \quad (39)$$

где  $I_2$  — число импульсов эталона; значения остальных символов те же, что и в формуле (38).

Поскольку  $\alpha$ -активность определяется совокупным действием  $\alpha$ -излучения урано-радиевого и ториевого рядов, аномально радиоактивные пробы должны выборочно анализироваться на содержание радия, урана, мезотория и тория.

Измерение  $\alpha$ -излучения золе проводят через 7—15 дней после ее получения; это время требуется для восстановления достижения ее равновесного состояния.

**Документация.** От правильной документации проводимой работы зависит правильность интерпретации полученных данных. Образец полевой книжки для документации отбора биогеохимических проб следует дополнить характеристикой двух показателей — рельефа и почвы, необходимых для выделения элементарных ланд-

шафтов. Рельеф опробуемых профилей рекомендуется давать схематическим рисунком перед началом описания каждого профиля, а характеристику почвенного покрова и pH его генетических горизонтов давать на листах «для записи» в конце записных книжек. Здесь должна быть дана полная характеристика почвенных разрезов, отражающая тип почвы, вид и разновидности почвенного покрова на изучаемой площади. Места заложения почвенных разрезов должны совпадать с точками отбора биогеохимических проб и фиксироваться вместе с последними на карте фактического материала. Кроме этого, в конце полевого журнала должны быть записи о сдаче материала в анализ и норма ведомости полученных анализов.

Изображение результатов биогеохимических (флорометаллометрических) поисков, их интерпретация и отчетность. Основными вопросами обработки данных биогеохимических опробований является оценка местного фона, выбор способа выражения данных на картах и профилях и выявление биогеохимических аномалий, связанных с рудным источником урана. Все эти вопросы являются общими для биогеохимического метода, независимо от того, для поисков каких руд он применяется. Дополнение к инструкции, необходимое в данном случае, касается требования нанесения результатов биогеохимического опробования не только на геологическую, но и на топографическую основу с почвенной нагрузкой в масштабе поисков. Это необходимо для более точного выделения границ элементарных ландшафтов и решения вопроса о природе выделенных биогеохимических аномалий.

Предложение пользоваться при интерпретации природы биогеохимических аномалий элементом-свидетелем заслуживает серьезного внимания, в частности при поисках руд урана, но при этом требуется обязательный контроль стабильности отношений содержания в пробе элемента-свидетеля и урана в условиях изучаемых элементарных геохимических ландшафтов.

В текстовой части отчета освещаются геоботанические особенности района, связь растительного покрова с геологией, рельефом, почвенным покровом и климатом, дается описание методики проведенных работ и ее обоснование, подробно анализируются условия образования обнаруженных аномалий (геологические и гидрогеологические условия, рельеф, почвы, рыхлые отложения), даются рекомендации по направлению и объему дальнейших работ и по вскрытию аномалий горно-буровыми работами.

В заключение приводится оценка эффективности и применимости метода в данных условиях, а также суммируются данные новых методических наблюдений.

Организация работ и производительность труда. Специфические особенности биогеохимического метода требуют для их проведения специальных кадров — почвоведов или геохимиков с биогеохимической подготовкой. Состав отряда: геоботаник-почвовед, два колледжника. Производительность труда: по отбору

или 30 точек при отборе двух видов растений; подготовительные работы 30—60 проб в день; аналитические 25—30 проб в день на аналитика с препаратом.

## 5. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДА

Развитие флорометаллометрического метода связано прежде всего с дальнейшим развитием теории процессов накопления и распределения радиоактивных и других элементов в растениях, а также с изучением глубинности и эффективности этого метода в различных ландшафтных условиях.

Решение этих вопросов должно проводиться в тесной связи с изучением вторичных и первичных литохимических и гидрохимических ореолов и потоков рассеяния уранового оруденения, что позволит установить взаимосвязь между ними и охарактеризовать все промежуточные звенья между рудными телами и флорометаллометрическими аномалиями.

Большое значение для снижения стоимости флорометаллометрических поисков имеет развитие аналитической техники и методики определения радиоактивности живых растений, что позволит исключить самую трудоемкую в данном методе операцию — озолепе. В этом направлении работают многие исследователи. Разрабатывается метод радиометрического анализа брикетированных проб. В последнем случае для анализа может быть использована серийная аппаратура: СГ-11, МГ-1, РАЛ-1 и др.\*

Определенный интерес в направлении усовершенствования техники перлово-люминесцентного и радиометрического анализов представляет разработка приспособлений для дозировки раствора и изготовления перлов с целью повышения производительности (Мураками и др., 1958), а также конструирование установок с автоматической подачей проб для  $\alpha$ -измерений и т. п. Представляются перспективными также попытки изучения изотопного состава радиоактивных элементов по спектру  $\alpha$ -излучения. Этот метод, по-видимому, сможет заменить трудоемкие радиохимические анализы. Наряду с этим имеет значение также разработка специализированных печей для озолепления растительных проб как в полевых, так и лабораторных условиях.

При проведении массовых биогеохимических поисков можно рекомендовать применение электропечи ОКБ-194А, требующей небольшой переделки.

Реализация перечисленных выше и других усовершенствований в практике радиофлорометрического метода поможет сделать его простым и экономически широко доступным для поисков урановых месторождений.

\* Устные сообщения М. С. Макарова и Н. С. Райкова.

# ГАММА-КАРОТАЖ И ГАММА-ОПРОБОВАНИЕ

## А. Гамма-каротаж скважин

### 1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ГАММА-КАРОТАЖА

Под  $\gamma$ -каротажем понимают геофизические исследования в скважинах, основанные на измерении естественного  $\gamma$ -излучения горных пород. В теории  $\gamma$ -каротажа расчеты основываются на показательном законе поглощения  $\gamma$ -излучения при прохождении его через вещество. («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957.)

На основании расчетов интенсивности  $\gamma$ -излучения по оси скважины для бесконечных по простиранию рудных пластов различной мощности установлены следующие соотношения:

$$q = \frac{S}{K_0 h}, \quad (40)$$

$$q = \frac{I_\infty}{K_0}, \quad (41)$$

- где  $q$  — концентрация радиоактивного вещества в рудном пласте;  
 $h$  — мощность рудного пласта;  
 $S$  — площадь, ограниченная графиком интенсивности  $\gamma$ -излучения и осью глубин (площадь  $\gamma$ -аномалии);  
 $I_\infty$  — интенсивность в центре насыщенного по  $\gamma$ -излучению (в направлении мощности) рудного пласта, т. е. максимальная интенсивность при данной концентрации  $q$ ;  
 $K_0$  — коэффициент пропорциональности, характеризующий максимальную интенсивность  $\gamma$ -излучения при концентрации радиоактивного вещества, равной единице.

Мощность радиоактивного пласта, при которой наступает насыщение по  $\gamma$ -излучению ( $h_n$ ), зависит от плотности (объемной массы) руды ( $\rho$ ) и спектрального состава излучения. При постоянстве последнего мощность насыщенного пласта однозначно определяется плотностью руд и связана с нею обратно пропорциональной зависимостью:  $h_n \cdot \rho = \text{const}$ .

Следовательно, интенсивность  $\gamma$ -излучения в центре пласта достигает своего максимального значения  $I_\infty$  при вполне определенной величине произведения мощности на плотность руды. Для новых руд, если измерения производятся со счетчиком или сцинтилляционными счетчиками в свинцовых экранах, произведение равно  $200 \text{ г/см}^2$ , что соответствует плотности в любом направлении от точки

100 г/см<sup>3</sup> (рис. 65). Указанные соотношения позволяют определять насыщенную мощность урановых рудных тел (табл. 26).

Формулы (40) и (41) справедливы для любого типа распределения радиоактивных элементов по мощности рудного тела при условии

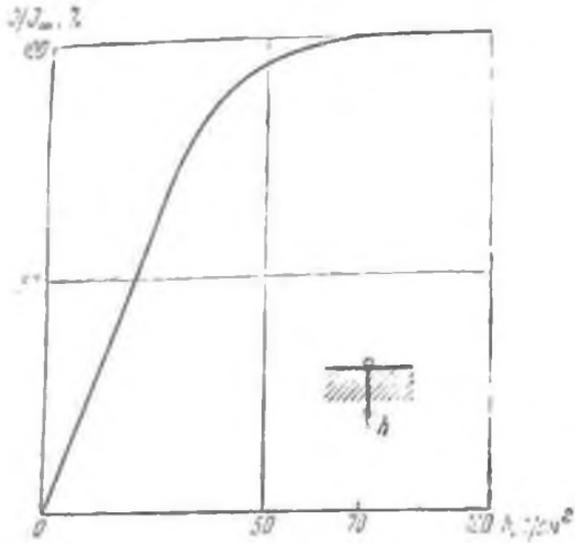


Рис. 65. Зависимость интенсивности  $\gamma$ -излучения ( $I$ ) от  $I_0$  в центре пластины урановым орудением) от поверхностной плотности рудного тела (счетчик МС-13)

равенства плотностей руд ( $\rho$ ) и вмещающих их пород ( $\rho_0$ ). Для рудных тел с мощностью, превышающей 30 см, и при изменении плотности в пределах  $0,7 < \frac{\rho}{\rho_0} < 1,5$  ошибки в расчетах концентрации урана

Таблица 26

Значения насыщенной по  $\gamma$ -излучению мощности для урановых руд с различной плотностью

Плотность урановых руд, г/см <sup>3</sup>	Насыщенная мощность рудного тела $h_n$ , см
1,5	130
2,0	100
2,5	80
3,0	65

по этим формулам не превышают 10%. При более значительной разнице плотностей рудных тел и вмещающих их пород концентрация радиоактивных элементов определяется по более сложным формулам (Овчинников, Хайкович, 1960).

Площадь  $\gamma$ -аномалии и содержание радиоактивных элементов, определяемое по формуле (40), не зависят от угла пересечения рудного тела скважиной. Мощность рудного тела, устанавливаемая при интерпретации  $\gamma$ -каротажных диаграмм ( $h_{\text{вид}}$ ), связана с истинной мощностью ( $h_{\text{ист}}$ ) следующим соотношением:

$h_{\text{ист}} = h_{\text{вид}} \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол встречи скважины с рудным телом.

В теории  $\gamma$ -каротажа рассмотрено также влияние диаметра скважины и длины счетчика на результаты измерений. Различные по абсолютной величине, но постоянные в пределах аномального

участка. диаметры скважин не сказываются на величине общей площади  $\gamma$ -аномалии, но обуславливают неодинаковые искажения формы каротажных диаграмм главным образом над маломощными рудными телами. Увеличение диаметра скважин от 40 до 150 мм приводит к росту интенсивности  $\gamma$ -излучения в краевых частях аномальной зоны и к уменьшению ее величины непосредственно над участком оруденения. Аналогичные искажения формы аномалий получаются и при использовании счетчиков, имеющих значительные размеры. При этом регистрируемая площадь аномалии так же, как и в первом случае, остается постоянной, т. е. не зависит от длины приемника  $\gamma$ -излучения. Учет влияния диаметра скважины производится при определении границ рудных тел малой мощности с помощью специальных палеток Z описанных ниже (см. раздел 4 настоящей главы).

Как показали теоретические расчеты и экспериментальные наблюдения, влиянием размеров счетчиков на результаты измерений можно пренебречь, если их длина не превышает 4 см при мощности рудных тел 10—20 см и 10 см при мощности рудных тел более 20 см.

## 2. АППАРАТУРА

Поиск урановых месторождений путем измерений естественного  $\gamma$ -излучения горных пород в скважинах проводится в настоящее время главным образом с помощью радиометров КРЛ и КРТ и ПРКС-2 (см. табл. 4). В качестве приемников  $\gamma$ -квантов в этой аппаратуре используются газонаполненные счетчики типа МС или ВС и сцинтилляционные счетчики. Радиометры ПРКС и станции АКС-250 на сцинтилляционных счетчиках стали внедряться в практику работ в последние годы.

При массовых поисках урановых руд наряду с указанными радиометрами широкое применение получила аппаратура НГГК, РАРК и ПГК. Эти приборы были разработаны для изучения геологических разрезов нефтяных и угольных месторождений. Вследствие значительных размеров датчиков, состоящих в этих приборах из нескольких счетчиков ВС-9 или МС-9, применение их для поисков радиоактивного сырья приводит к искажению регистрируемых локальных аномалий. Способы учета влияния искажающих факторов детально рассмотрены в работе А. К. Овчинникова и др. (1964).

Электрические схемы и принципы работы отдельных узлов аппаратуры радиоактивного каротажа описаны в специальной литературе (Выборных, 1958; Комаров, 1957: «Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957). Основные технико-эксплуатационные характеристики наиболее распространенных типов каротажных радиометров приведены в табл. 4.

При поисках радиоактивных руд желательно применять приемники  $\gamma$ -квантов с высокой интегральной чувствительностью к естественному  $\gamma$ -излучению. Величина последней определяется как суммой интегральной и спектральной чувствительности счет-

работ показывает, что длина приемника  $\gamma$ -излучения, как правило, не должна превышать 30 см (длина счетчиков ВС-9 или МС-9). Высокая эффективность регистрации  $\gamma$ -излучения счетчиками ВС в области небольших энергий (см. рис. 14) повышает интегральную чувствительность к  $\gamma$ -излучению урановых руд примерно в 3 раза по сравнению со счетчиками типа МС с аналогичными размерами катода. Кроме того, в силу отмеченных особенностей спектральных характеристик счетчиков ВС, показания аппаратуры с датчиками этого типа зависят не только от содержания радиоактивных элементов в породах или рудах, но в значительной степени и от их вещественного состава.

Поэтому выявление  $\gamma$ -аномалий по скважинам, в том числе и массовые поиски с аппаратурой КРТ, НГГК, РАРК и ПГКР, следует

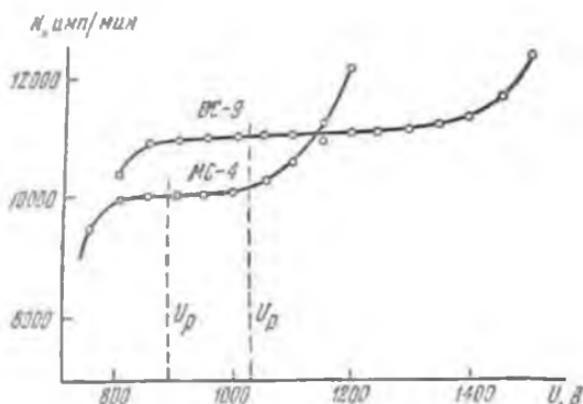


Рис. 66. Типовые характеристики счетчиков ВС-9 и МС-4 ( $V_p$  — величина рабочего напряжения)

проводить, используя счетчики ВС с большими размерами катода (ВС-9). При этом одновременно наиболее эффективно решается задача расчленения геологических разрезов горных пород на отдельные литологические разности по их естественной радиоактивности.

Детализацию обнаруженных аномалий для последующей количественной интерпретации рекомендуется проводить с одним счетчиком — МС-11, МС-14, МС-4 или МС-13. В этом случае значительно расширяется диапазон измеряемых величин интенсивности  $\gamma$ -пучка. Благодаря небольшим размерам датчика аномалии регистрируются без существенных искажений, и показания приборов практически не зависят от вещественного состава руд.

В каротажной аппаратуре должны использоваться проверенные счетчики, обладающие удовлетворительной счетной характеристикой. Типовые характеристики счетных трубок ВС-9, МС-4 и соответствующие рабочие напряжения показаны на рис. 66. Методика снятия характеристик счетчиков применительно к аппаратуре КРТ, КРЛ, НГГК, РАРК и ПГКР подробно описана в соответствующих руководствах. («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957; Комаров, 1957; А. К. Овчинников и др., 1962).

Сцинтилляционные счетчики, обладающие исключительно высокой интегральной чувствительностью к естественному  $\gamma$ -излучению, дают наилучшие результаты как при поисках радиоактивных руд, так и при изучении геологических разрезов по степени радиоактивности горных пород.

Показания каротажных приборов с этими типами датчиков (аналогично счетчикам ВС) зависят не только от содержания радиоактивных элементов, но и от вещественного состава породы.

Для количественных определений содержания радиоактивных элементов в рудах в аппаратуре типа ПРКС сцинтилляционный счетчик экранруется специальным светозащитным кожухом, во внутренней части которого размещен свинцовый цилиндр с толщиной стенки не менее 1—1,5 м.м. Благодаря применению этого цилиндра устраняется зависимость показаний приборов от вещественного состава руд и исключается влияние рассеянного  $\gamma$ -излучения источника при градуировании аппаратуры. Использование подобных экранов приводит одновременно к уменьшению интегральной чувствительности датчика (примерно в 2,5—3 раза), но все же ее величина остается значительно большей по сравнению с чувствительностью газонаполненных счетчиков.

Основным параметром аппаратуры на сцинтилляционных счетчиках, работающих в режиме интегрального счета, является начальный порог регистрации  $\gamma$ -квантов ( $P_n$ ). Величина этого порога в значительной степени характеризует стабильность работы аппаратуры в целом и определяет значение пересчетного коэффициента (см. раздел 4 настоящей главы). Установлено, что начальный порог в каротажной аппаратуре на сцинтилляционных счетчиках должен быть не выше 50—80 кэв. В этом случае расхождения показаний приборов (например, радиометров ПРКС) в течение одного месяца (без регулировок и градуировок) не превышают 2—3%. При величинах  $P_n$ , превышающих 100 кэв, стабильность работы аппаратуры резко ухудшается, что может привести к браку измерений. Способы определения начального порога описаны в работе А. К. Овчинникова и др. (1962).

Градуирование  $\gamma$ -каротажных станций производится с помощью точечных радиевых источников  $\gamma$ -излучения серии 1, 2 или 10. Градуирование приборов позволяет учитывать изменения чувствительности аппаратуры во времени и дает возможность пользоваться для однотипных приборов постоянными пересчетными коэффициентами, с помощью которых производится определение содержания радиоактивных элементов в руде. Техника градуирования каротажных приборов детально описана в соответствующих инструкциях (Овчинников и др., 1961; Овчинников и др., 1962).

После окончания градуирования аппаратуры на каждом диапазоне в определенных геометрических условиях контрольные измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения радиоактивного источника ( $Ra$ ,  $Co^{60}$ ) или рабочего товленного из радиоактивной руды. Контроль

градуирование аппаратуры проводится ежедневно перед каротажем скважин и является одним из основных критериев достоверности результатов измерений.

Градуирование радиометров КРТ, КРЛ, НГГК, РАРК, ПГКР и ПРКС, используемых для поисков радиоактивных руд, обычно выполняется не реже двух раз в месяц. Кроме того, градуирование производится после замены счетчиков, ламп и других ответственных деталей наземного пульта и скважинного прибора, а также при изменении контрольных замеров по сравнению с замерами, выполненными во время градуирования, более чем на  $\pm 10\%$ .

Окончательная проверка работоспособности приборов осуществляется в условиях скважины, так как именно здесь могут выявиться также недостатки аппаратуры, которые часто затруднительно установить на поверхности. Для этой цели выбирается контрольная установка, пробуренная в устойчивых породах или обсаженная колоннами труб.

### 3. ПРОВЕДЕНИЕ ПОИСКОВОГО ГАММА-КАРОТАЖА

Каротажные работы рекомендуется проводить сразу же после окончания буровых работ. Перед началом каротажа оператор обязан подробно ознакомиться с состоянием скважины. Спуск глубинного прибора рекомендуется начинать после тщательной промывки скважины. Время продувки или промывки скважины составляет обычно 2—3 ч. Все эти мероприятия резко снижают возможность аварий при  $\gamma$ -каротаже и почти полностью исключают влияние продуктов распада радона, значительная концентрация которых в скважинах приводит к появлению ложных аномалий и искажению результатов каротажа. При наличии ранее пробуренных скважин желательно проверить их доступность с помощью груза весом 15—20 кг, опускаемого в скважину на стальном тросе.

Процесс проведения работ на буровой скважине состоит из двух тесно связанных по времени этапов. Задача первого этапа заключается в выявлении рудных  $\gamma$ -аномалий с одновременным изучением геологического разреза по естественной радиоактивности горных пород. На втором этапе производится детализация обнаруженных аномальных участков для последующей их количественной интерпретации. Техника выполнения  $\gamma$ -каротажа в скважинах колодезного, роторного, ударного и камерно-алмазного бурения описана в специальных инструкциях (Запорожец, 1952; Овчинников и др., 1961; Овчинников и др., 1962).

Под  $\gamma$ -аномалиями в практике каротажа понимаются такие значения интенсивности  $\gamma$ -излучения горных пород, которые превышают нормальное  $\gamma$ -поле. В связи с тем что само нормальное поле постоянно из-за колебаний кларковых содержаний радиоактивных элементов, величину нижнего предела аномальных значений можно установить лишь после детального изучения нормальных полей

отдельных разностей горных пород, развитых в районе поисков. Однако практически выполнить это не всегда представляется возможным. В качестве аномалий условно может быть принята величина, превосходящая в 2—3 раза среднюю интенсивность  $\gamma$ -излучения, характерную для данной разновидности горных пород.

В зависимости от типа аппаратуры и оборудования существуют два способа измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения по стволу скважины — точечный и с непрерывной регистрацией.

Точечный способ регистрации малопроизводителен. Он используется исключительно с переносной аппаратурой (КРЛ), предназначенной для каротажа мелких скважин подземного бурения.

Расстояние между точками измерения, как правило, составляет 1 м. Время регистрации интенсивности  $\gamma$ -излучения на каждой точке наблюдения обычно выбирается равным 1 мин. Статистическая ошибка измерения  $\sigma$  определяется по формулам

$$\sigma_{\text{стр. инд.}} = \frac{100}{2\tau n I} \%, \quad (42)$$

$$\sigma_{\text{эмс}} = \frac{100}{\sqrt{N}} \%, \quad (43)$$

где  $\tau$  — постоянная времени интегрирующего контура, сек;  
 $n$  — интегральная чувствительность счетчика, имп/сек на 1 мкр/ч;  
 $I$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения, мкр/ч;  
 $N$  — количество сосчитанных импульсов.

При непрерывном способе регистрации весьма существенно правильно выбрать постоянную времени интегрирующей схемы  $\tau$  и скорость каротажа  $v$ . Известно (Овчинников и др., 1961), что основным фактором, определяющим степень искажения аномалий, является величина произведения  $v\tau$ . При больших значениях  $v$  искажение записи настолько велико, что регистрируемые аномалии становятся неизмеримыми с уровнем помех\* и часто не могут быть выделены на каротажных диаграммах. Для того чтобы исключить возможность пропуска аномалий и при этом не снизить резко скорость каротажа, необходимо выбрать оптимальную величину  $v\tau$ .

На рис. 67 показана зависимость амплитуды аномалий  $A$  от величины  $v\tau$  для детекторов

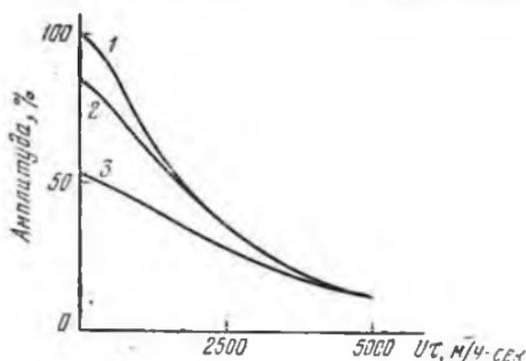


Рис. 67. График зависимости регистрируемой амплитуды аномалий над пластом мощностью 30 см (и % от истинной величины) от произведения  $v\tau$  при использовании счетчиков разной длины. 1 — 10 см; 2 — 30 см (КРЛ); 3 — 70 см (ПГГК, РАК, ПГКР)

\* Помехи обусловлены колебанием кларковых солей, алмазатов, изменением диаметра скважины, изменением состава раствора и т. п.

даны. Как следует из графика рис. 67, даже при точечных измерениях ( $\tau = 0$ ) большие размеры датчиков (в аппаратуре НГГК, РАРК, ПГКР) приводят к уменьшению максимальной интенсивности  $\gamma$ -излучения. Поэтому при поисках локальных аномалий предпочтительно использовать каротажные станции с меньшим размером датчика, при условии высокой его интегральной чувствительности к естественному  $\gamma$ -излучению. Этому требованию удовлетворяет каротажная аппаратура на сцинтилляционных счетчиках.

Если считать, что практический интерес при поисковых работах могут представлять аномалии с интенсивностью  $\gamma$ -излучения 50–100  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  и выше (при мощности радиоактивного пласта более 30 см), то максимальные величины произведений  $vt$  не должны превышать значений, указанных в табл. 27.

Таблица 27

Максимальные значения  $\tau$  и  $v$  при  $\gamma$ -каротаже скважин

Тип аппаратуры	Для обнаружения локальных аномалий $\geq 50 \mu\text{кр}/\text{ч}$		Для обнаружения локальных аномалий 100 $\mu\text{кр}/\text{ч}$	
	$v$ , м/ч·сек	$\tau$ , м/ч (при $\tau = 5-8 \text{ сек}$ )	$v$ , м/ч·сек	$\tau$ , м/ч (при $\tau = 5-6 \text{ сек}$ )
КРТ	1500	250	2400	400
НГГК	2100	350	3600	600
РАРК	1500	250	2400	400
ПГКР	1500	250	2400	400

Следует иметь в виду, что дальнейшее увеличение скорости каротажа  $v$  (по сравнению с данными, указанными в табл. 27) при соответствующем уменьшении постоянной времени интегрирующего контура нежелательно, так как это может привести к пропуску локальных аномалий из-за увеличения погрешности измерений, обусловленной статистическими ошибками.

При значениях  $vt$ , указанных в табл. 27, амплитуды аномалий будут значительно уменьшены (рис. 67). Поэтому для обнаружения аномалий в 50 или 100  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  с учетом возможного поглощения  $\gamma$ -излучения буровым раствором (до 30%) на каротажных диаграммах следует обращать внимание на все локальные повышения интенсивности  $\gamma$ -излучения, значения которых равны или превышают величины, приведенные в табл. 28.

\* При использовании каротажной аппаратуры со счетчиками ВС или со сцинтилляционным счетчиком без свинцового экрана этим предельным значениям интенсивности  $\gamma$ -излучения соответствуют содержания урана (в равновесии с продуктами распада) 0,003% и 0,006%.

При поисках аномалий спуск глубинного прибора в скважину производится со скоростью не более 1000 м/ч. Оператор при спуске качественно оценивает интенсивность  $\gamma$ -излучения горных пород по слуху по «щелчкам» в головном телефоне или по скорости движения стрелки электромеханического счетчика. Измерения производятся только при подъеме прибора скважины. В случае непрерывной регистрации запись показаний приборов обычно осуществляется в масштабе 1:200—1:500. Привязка результатов каротажа по глубине производится с помощью меток на кабеле или по величине перемещения буровых штанг (при каротаже скважин подземного бурения).

Детализацию аномалий необходимо производить только такими счетчиками, которые обеспечивают независимость показаний приборов от вещественного состава руд и исключают искаженные формы аномалий, обусловленные значительными размерами приемников  $\gamma$ -излучения. Типы счетчиков, используемых для детализации аномалий в раздельной каротажной аппаратуре, были указаны в разделе 2 настоящей главы.

Максимально допустимые значения  $vt$  при регистрации локальных аномалий (рис. 68) не должны превышать 150 м/час·сек.

При этом постоянную времени интегрируемого контура выбирают с таким расчетом, чтобы статистические ошибки измерений, определяемые по формуле (40), не превышали  $\pm 10\%$ . Отсюда связь между скоростью каротажа и постоянной времени прибора приблизительно имеет вид:

$$v = \frac{150}{\tau} \quad (44)$$

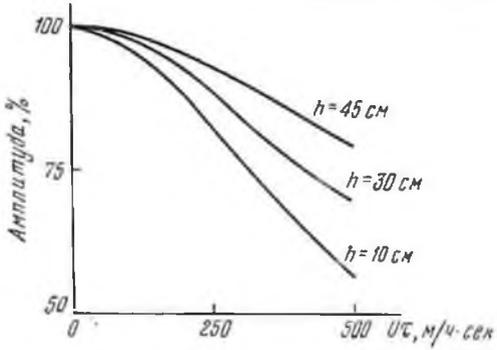


Рис. 68. График зависимости регистрируемой амплитуды аномалий (в % от истинной величины) от произведения  $vt$  для радиоактивных пластов различной мощности (45, 30 и 10 см). Длина датчика 4 см.

Таблица 28

Минимальные значения регистрируемых при каротаже аномалий

Истинная амплитуда аномалий, $\mu\text{кр}/\text{ч}$	Регистрируемая амплитуда аномалий, $\mu\text{кр}/\text{ч}$		
	КРТ	НГГК	РАРК
50	20	10	15
100	30	15	

Запись интенсивности  $\gamma$ -излучения по стволу скважины при детализации аномалии производится, как правило, в масштабе 1 : 50.

Если подсчетное устройство не может обеспечить допустимую скорость каротажа, то детализацию аномалий рекомендуется проводить точечным способом. При этом способе регистрации измерения интенсивности  $\gamma$ -излучения по скважине обычно производят с шагом 0,1 м. Статистические ошибки измерения в этом случае должны быть выше  $\pm 10\%$ . Величины ошибок определяются по формулам (42) и (43).

Для надежной количественной интерпретации детализацию аномалий следует проводить дважды (основной и повторный каротаж) и обязательно с выходом в нормальное поле. При этом каждая аномалия должна быть полностью зафиксирована на одном из поддиапазонов прибора.

При оценке достоверности первичных материалов каротажа необходимо руководствоваться следующими требованиями:

- погрешность в определении глубины по данным каротажных работ должна составлять не более 0,2%;
- расхождения между основным и повторным каротажем в площадях аномалий и максимальных величинах интенсивности  $\gamma$ -излучения не должны превышать 10%;
- контрольные измерения до и после каротажа скважины не должны отличаться от контрольных измерений при градуировании аппаратуры более чем на  $\pm 10\%$ .

#### 4. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ГАММА-КАРОТАЖА

Полученный на буровой скважине  $\gamma$ -каротажный материал подвергается обработке. На каротажных диаграммах производится привязка измерений к глубинам скважины и выполняется перевод показаний прибора в микрорепитгеры в час. Привязка данных измерений к глубинам скважины осуществляется по меткам кабеля, фиксируемому при прохождении через мерный ролик.

Интерпретация результатов при измерениях приборами с линейными шкалами производится непосредственно на полученных  $\gamma$ -каротажных диаграммах. В случае нелинейных шкал полученные при измерении графики интенсивности  $\gamma$ -излучения перестраиваются в линейные масштабы. Технические приемы обработки и оформления первичных материалов  $\gamma$ -каротажа скважины описаны в инструкциях (Запорожец, 1952; Овчинников и др., 1961; Овчинников и др., 1962).

В зависимости от характера распределения радиоактивных элементов в рудном теле по его мощности применяются три способа определения границ оруденения: а) способ  $1/2 I_{max}$ , б) способ  $I_{зад}$  — заданной интенсивности и в) способ  $4/5 I_{max}$ .

Практическое использование способа  $1/2 I_{max}$  возможно для рудных тел с приблизительно равномерным содержанием радиоактивных

элементов и мощностью более 40 см. Погрешность определения границ и мощности рудного интервала в этом случае не превышает 10%. Границы рудного тела определяются на диаграмме в точках с интенсивностью  $\gamma$ -излучения, равной половине максимальной (рис. 69, точки А и Б).

В том случае, когда содержание радиоактивных элементов в рудном теле непрерывно изменяется вдоль оси скважины, границы оруденения устанавливаются по способу  $I_{зад}$  (рис. 70). Границы рудного тела с заданным содержанием урана  $q_{зад}$  находятся из выражения

$$I_{зад} = 100K_0 q_{зад}, \quad (45)$$

где  $I_{зад}$  — интенсивность  $\gamma$ -излучения на границе пласта (в мкр/ч), отвечающая заданному содержанию  $q_{зад}$  (в %);

$K_0$  — пересчетный коэффициент в мкр/ч на 0,01% равновесного урана.

Практика работ показывает, что способ заданной интенсивности следует применять при непрерывном изменении содержания урана по мощности рудного тела на расстоянии не менее 50 см.

Определение границ рудных пропластков мощностью менее 30—40 см вне зависимости от характера оруденения производится по способу  $4/5 I_{max}$ . В этом случае на крыльях аномалии берутся точки, в которых интенсивность  $\gamma$ -излучения равна  $4/5$  максимальной ее величины (рис. 71, точки А, Б). При определении мощности рудного тела по способу  $4/5 I_{max}$  используются номограммы, отражающие зависимость расстояния  $Z = Z_1 + Z_2$  между точками с интенсивностью  $4/5 I_{max}$  от мощности рудного тела (рис. 72). Границы оруденения по этому способу устанавливаются с точностью не выше 20%.

Для оценки характера распределения содержания радиоактивных элементов по мощности рудного тела применяется способ относительного градиента крыла аномалии (Овчинников, Иващенко и др., 1962).

Следует подчеркнуть, что указанные способы интерпретации позволяют определить видимую мощность рудного тела  $h_{вид}$ . Истинная мощность находится из соотношения:  $h_{ист} = h_{вид} \cdot \sin \alpha$ , где  $\alpha$  — угол встречи скважины с рудным телом.

Определение содержания урана в рудном теле производится по формуле

$$q = \frac{S}{100K_0 h}, \quad (46)$$

где  $q$  — содержание урана (в равновесии в продуктах его распада) в %;

$S$  — площадь  $\gamma$ -аномалии в мкр/ч·см;

$K_0$  — пересчетный коэффициент в мкр/ч на 0,01% урана;

$h$  — мощность рудного тела, в см.

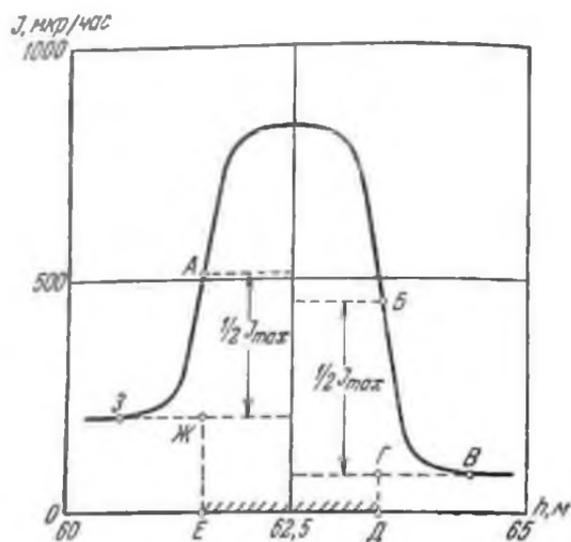


Рис. 69. Определение границ рудного тела по способу  $1/2 I_{max}$

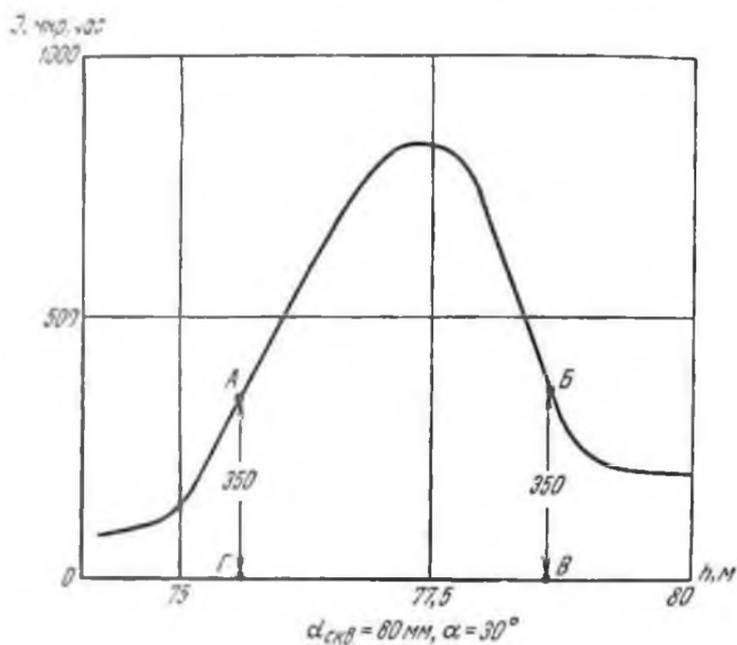
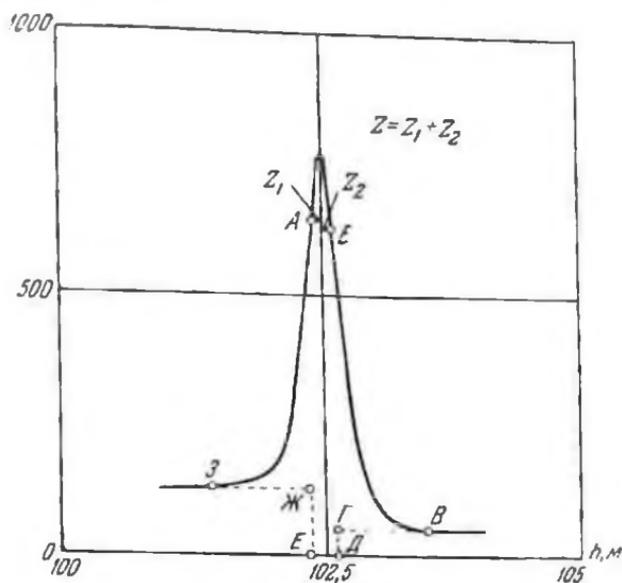


Рис. 70. Определение мощности рудного тела по способу  $I_{зад}$

$I, \text{мкР/час}$



$\alpha_{\text{сн}} = 80 \text{ мм}, \alpha = 30^\circ$

Рис. 71. Определение мощности рудного тела по способу  $4/5 I_{\text{max}}$

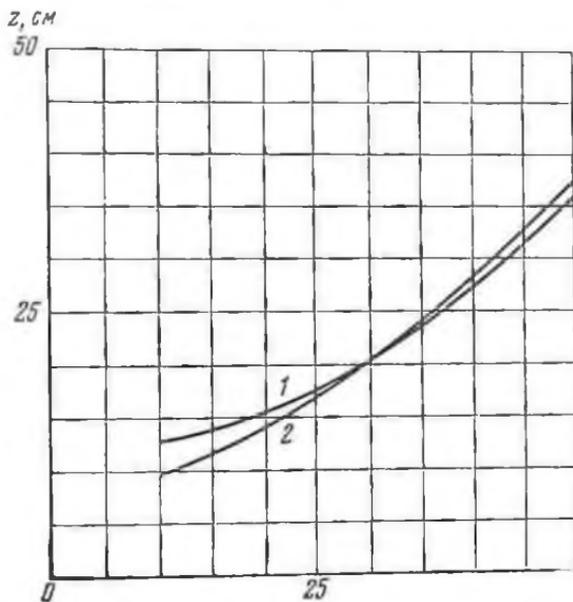


Рис. 72. Номограмма для определения мощности по способу  $4/5 I_{\text{max}}$

Диаметр скважины: 1 — 120 мм

Площадь аномалии  $S$ , выражаемая в  $\mu\text{кр}/\text{ч}\cdot\text{см}$ , заключена в пределах замкнутого контура, ограниченного графиком аномалии, оруденения, соответствующими уровню нормального поля, границами оруденения и осью глубин. Примеры нахождения площадей аномалий приведены на рис. 69 (контур АБВГДЕЖЗА), рис. 70 (контур АБВГД) и 71 (контур АБВГДЕЖЗА). Для правильной оценки содержания урана по данным  $\gamma$ -каротажа скважины существенное значение имеет величина пересчетного коэффициента  $K_0$ , связывающего интенсивность  $\gamma$ -излучения с концентрацией радиоактивного вещества  $q$  в рудном теле.

Теоретические и экспериментальные работы показывают, что величина  $K_0$  зависит от спектра первичного излучения, вещественного состава руд, чувствительности детекторов к  $\gamma$ -квантам различной энергии, материала и толщины стенки скважинного прибора (Воскобойников, 1957; Горшков, 1959; Граммаков и др. 1959; Овчинников и др., 1962). Вещественный состав руд может быть охарактеризован их эффективным атомным номером  $Z_{\text{эф}}$ , который определяется по данным полного химического анализа пробы руды и вычисляется по формуле

$$Z_{\text{эф}} = \sqrt[3]{\frac{\sum \frac{C_i}{A_i} Z_i^4}{\sum \frac{C_i}{A_i} Z_i}} \quad (47)$$

где  $C_i$ ,  $A_i$  и  $Z_i$  — соответственно процентное содержание, атомный вес и атомный номер  $i$ -того химического элемента, входящего в состав руды.

При расчетах содержания урана по данным каротажа скважин, полученным радиометрами КРТ, КРД, РАРК и ПГКР со счетчиками типа МС над рудными телами с эффективным атомным номером, лежащим в пределах 10—15, пересчетный коэффициент принимается равным 115  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  на 0,01% равновесного урана. Если эффективный атомный номер руд лежит вне указанных пределов, то концентрация урана в рудном теле при использовании  $K_0 = 115 \mu\text{кр}/\text{ч}/0,01\%U$  будет установлена с некоторой погрешностью (до 15%). Для аппаратуры НГГК со счетчиками типа МС величина пересчетного коэффициента для всех типов руд с достаточной для практических целей точностью может быть принята равной 100  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  на 0,01% урана.

Показания аппаратуры со сцинтилляционными счетчиками в свинцовых экранах с толщиной стенки более 1 мм почти не зависят от вещественного состава руд. Для радиометра ПРКС значение коэффициента  $K_0$  составляет 115  $\mu\text{кр}/\text{ч}/0,01\%U$  при условии, что начальный порог регистрации  $\gamma$ -квантов не превышает 50—80 *кэв*. Для ориентировочной оценки содержания урана в рудных телах при интерпретации  $\gamma$ -каротажных диаграмм, полученных со счетчиками типа ВС или со сцинтилляционными счетчиками в обычном корпусе скважинного прибора, величина пересчетного коэффициента составляет около 170  $\mu\text{кр}/\text{ч}$  на 0,01% урана.

При количественной интерпретации данных  $\gamma$ -каротажа скважин для правильного определения содержания урана и мощности рудного тела в результате интерпретации должны быть введены поправки, учитывающие поглощение  $\gamma$ -излучения в буровом растворе и обсадных трубах, а также нарушение радиоактивного равновесия в рудах. Поскольку при  $\gamma$ -каротаже скважин измеряется интенсивность  $\gamma$ -излучения продуктов распада радия, то для определения содержания урана необходимо знать коэффициент радиоактивного равновесия между ураном и радием. Содержание урана в неравновесных урановых рудах устанавливается из следующего соотношения:

$$q = \frac{S}{K_{pp} K_{oh}}, \quad (48)$$

где  $K_{pp}$  — коэффициент радиоактивного равновесия между ураном и радием.

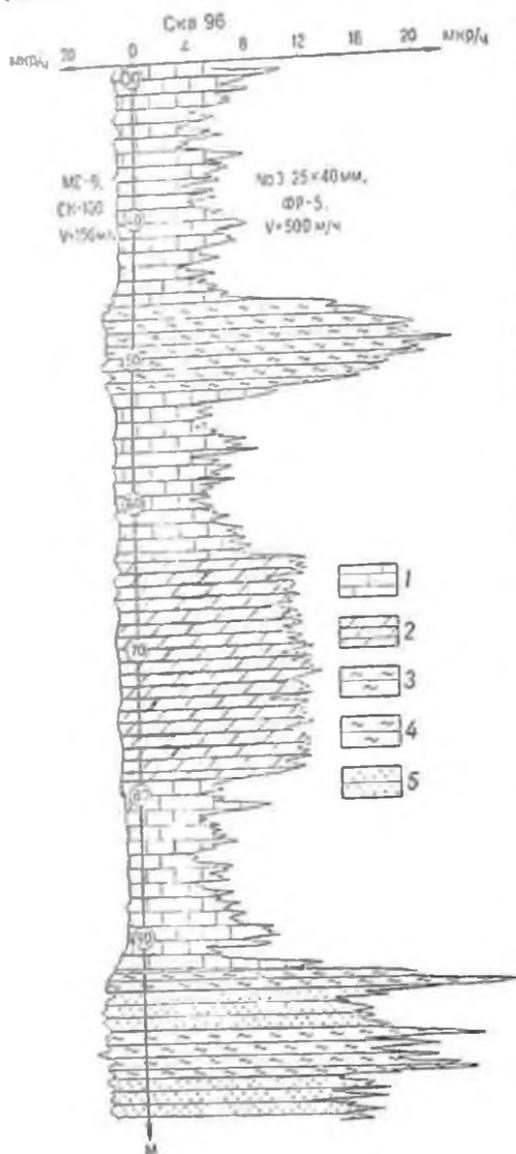
Величина  $K_{pp}$  вычисляется по формуле:  $K_{pp} = 2,98 \cdot 10^8 \frac{q_{Ra}}{q_{Th}} \%$ , причем содержания урана ( $q_U$ ) в % и радия ( $q_{Ra}$ ) в  $g/g$  породы устанавливаются по результатам химического (на уран) и радиохимического (на радий) анализов проб керна для данного рудного пересечения. Способы введения поправок на поглощение  $\gamma$ -излучения в буровом растворе и обсадных трубах описаны в инструкциях (Овчинников и др., 1961; Овчинников и др., 1962).

Как известно,  $\gamma$ -аномалии могут быть вызваны наличием в горных породах повышенных концентраций урана, тория или калия. Поэтому в первую очередь следует установить, скоплением какого из этих радиоактивных элементов (или их суммы) обусловлены аномальные повышения интенсивности  $\gamma$ -излучения. Каротажная аппаратура на газоразрядных счетчиках типа МС и ВС или на сцинтилляционных счетчиках, используемых в режиме интегрального счета импульсов, не позволяет определять природу радиоактивности. В этом случае содержание радиоактивных элементов, рассчитанное по формуле (46), может быть выражено лишь в процентах эквивалентного (по  $\gamma$ -излучению) урана. Природа радиоактивности и действительное содержание радиоактивного элемента устанавливается по данным лабораторных анализов керна или проб, отобранных с участка аномалии стреляющим грунтоносом.

Аномалии, превышающие 80  $\mu\text{кр}/\text{ч}$ , обусловлены главным образом излучением радиоактивных элементов рядов урана или тория. Это объясняется тем, что содержание калия в урановых или ториевых рудах редко достигает 5—7%, что соответствует вкладу в общую интенсивность  $\gamma$ -излучения около 12—15  $\mu\text{кр}/\text{ч}$ . С другой стороны, максимальная интенсивность  $\gamma$ -излучения над пластами природных образований, в которых практически всегда отсутствуют торий, составляют не более 80  $\mu\text{кр}/\text{ч}$ . Поэтому для целей вполне достаточно учет влияния  $\gamma$ -излучения на аномальных участках с интенсивностью 80  $\mu\text{кр}/\text{ч}$ .

## 5. КОМПЛЕКСНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ

При оценке аномалий наряду с определением природы радиоактивности, мощности рудного тела и процентного содержания в нем урана возникает необходимость в уточнении геологического разреза



по скважине, выявлении рудоуправляющих структур и т. п. Значительную помощь в решении этих вопросов могут оказать комплексные геофизические исследования в скважинах.

γ-Каротаж скважин, зарекомендовавший себя одним из наиболее глубоких и эффективных методов обнаружения месторождений радиоактивных элементов, получил широкое применение и для изучения геологических разрезов скважин. Возможность измерений в скважинах, обсаженных колоннами труб, выгодно отличает γ-каротаж от электрических, магнитных и некоторых других геофизических методов скважинных исследований. Особенно значительный эффект при изучении геологических разрезов можно получить с помощью сцинтилляционных счетчиков, что иллюстрируется рис. 73.

Рис. 73. Пример дифференциации горных пород по естественной радиоактивности по данным гамма-каротажа с аппаратурой на газонеподвижных и сцинтилляционных счетчиках

1 — известняки; 2 — доломиты,  
3 — алевролиты; 4 — глины; 5 —  
пески

Однако, несмотря на высокую эффективность метода  $\gamma$ -каротажа в большинстве случаев многие геологические задачи могут быть решены только с применением комплексных геофизических исследований.

Основными задачами, которые могут быть поставлены перед комплексными каротажными работами в период поисков месторождений радиоактивных руд, являются следующие:

- 1) уточнение геологического разреза;
- 2) корреляция разрезов по отдельным скважинам;
- 3) выделение рудоносных структур и горизонтов;
- 4) определение направления и угла падения рудоносных структур;
- 5) изучение природы радиоактивности;
- 6) определение мощности рудного тела и процентного содержания в нем радиоактивного элемента;
- 7) определение мест притоков вод и концентрации в них радиоактивных элементов.

Для решения указанных задач могут быть использованы следующие методы геофизических исследований в скважинах:

- 1) естественного  $\gamma$ -излучения — ГГК;
- 2) рассеянного  $\gamma$ -излучения радиоактивных изотопов — ГГК-п;
  - а) каротаж плотности — ГГК-п;
  - б) селективный каротаж — ГГК-с;
- 3) кажущегося электрического сопротивления — КС;
- 4) регистрации тока в цепи питающего заземления:
  - а) обычным зондом — ТК, б) зондом со скользящими контактами — МСК;
- 5) потенциалов собственной поляризации — ПС;
- 6) электродных потенциалов — МЭП;

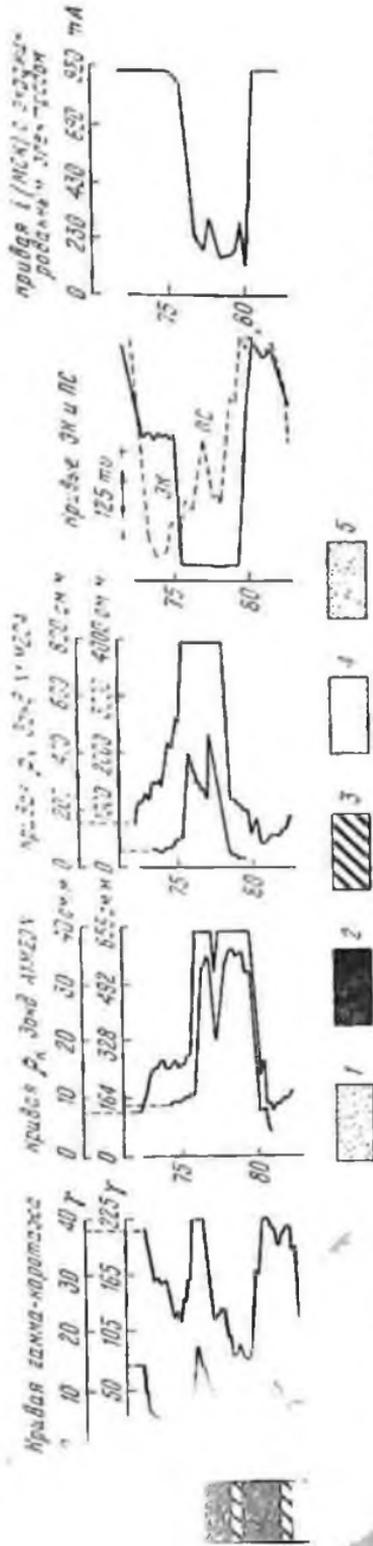


Рис. 1. Кривые градиент к определению границ рудоносного угольного пласта по данным ГГК, КС, ПС, ВП (ЭК) и МСК (МЭП).

- 7) потенциалов вызванной поляризации — ВП (ЭК);
- 8) магнитной восприимчивости пород (КМВ);
- 9) ядерной геофизики.

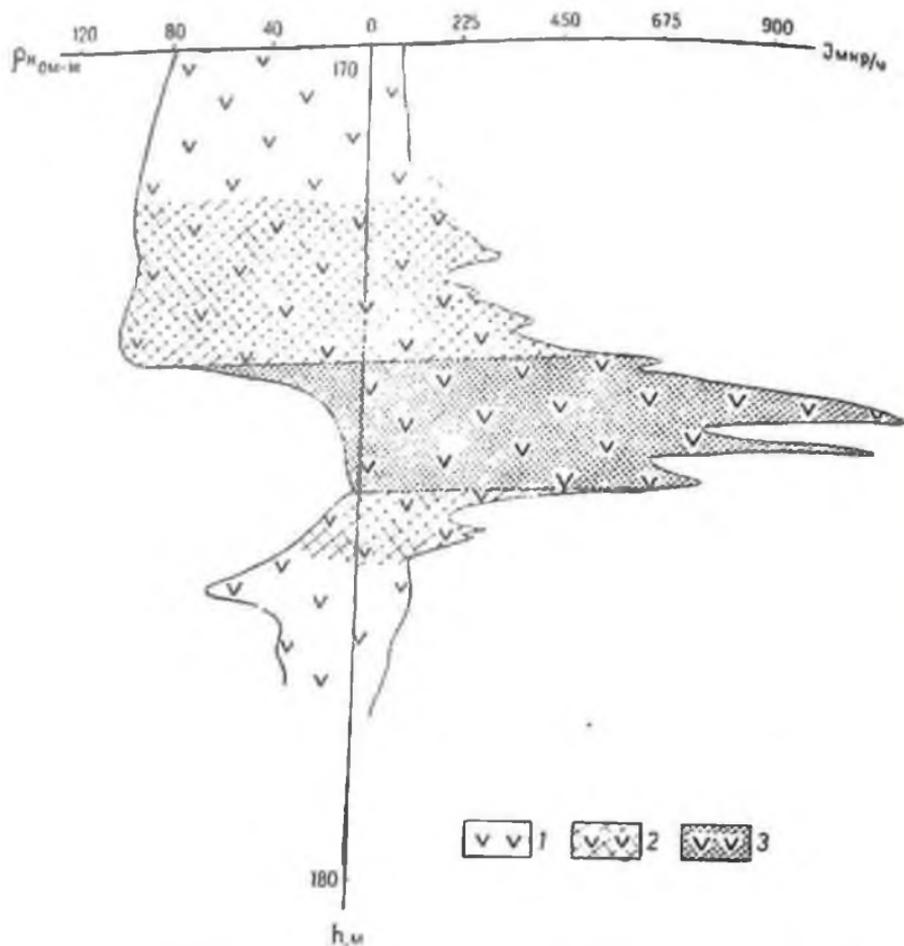


Рис. 76. Пример выделения рудоносной структуры по данным измерений естественного гамма-излучения и кажущегося сопротивления горных пород (КС — зонд М0,45А0,1В; ГК — сцинтилляционный счетчик NaI (Тl) в свинцовом экране с толщиной стенки 2 см) 1 — фельзит-порфиры; 2 — проявление урановой минерализации; 3 — трещина с урановым оруденением

При оценке возможностей различных методов каротажа необходимо учитывать конкретные особенности геологического строения района работ, а также основные поисковые критерии и их проявление в виде характерных изменений физических свойств горных пород.

Техника и методика отдельных видов геофизических исследований в скважинах подробно изложена в ряде руководств (Дахнов, 1959; Комаров, 1957; Мейер, 1960).

Для выполнения комплексных геофизических исследований в скважинах обычно используются каротажные станции ПКС-400, ПКС-750 и АЭК-900.

При поисках осадочных месторождений урана по данным комплексного каротажа уверенно выделяются рудоносные горизонты песчаников, углей, глин, обогащенных органическими остатками, и некоторых других разновидностей пород.

Рудоносные структуры гидротермальных урановых месторождений, представленные тектоническими трещинами, зонами нарушений и околорудных изменений, в ряде случаев также уверенно выявляются по данным комплексных каротажных исследований.

На рис. 74 приведен пример выделения и корреляции рудоносного горизонта по измерениям естественной радиоактивности, кажущегося сопротивления и собственных потенциалов горных пород. Геологический разрез в связи с плохим выходом керна составлен в основном по геофизическим данным. Рудоносный горизонт (Р) представлен пластом серых слабо сцементированных песчаников. Первоначально в его пределах в одной из скважин была обнаружена  $\gamma$ -аномалия. В кернах, поднятом с рудного интервала, установлена урановая минерализация. В последующем поисковое бурение проводилось по сети 4 : 2 км. Применение комплексного каротажа позволило оконтурить площадь распространения продуктивного горизонта и изучить элементы его залегания. Границы песчаников, вмещающих урановое руденение, определялись по геофизическим реперам на графиках КС, ПС и ГК.

Второй пример выделения рудоносного горизонта приведен на рис. 75, где показано определение границ урановосного угольного пласта по данным измерений ГК, КС, ПС, ВП (ЭК) и МСК.

Пример выделения по данным ГК и КС тектонической рудоносной структуры, песущей урановое гидротермальное руденение, иллюстрируется рис. 76.

## Б. Гамма-опробование урановых руд на месте залегания

В настоящее время при поисках, разведке и эксплуатации урановых месторождений для определения концентрации урана в руде непосредственно на месте ее естественного залегания, используются различные методы радиометрического опробования. Эти методы в зависимости от вида регистрируемого излучения получили название  $\gamma$ -,  $\beta$ - или комплексного  $\beta$ - $\gamma$ -опробования. Вследствие малой проникающей способности  $\beta$ -лучей и влияния ряда мешающих факторов (загрязнение опробуемой поверхности неактивным веществом, наличие значительного фона  $\gamma$ -излучения и т. п.), применение радиометрического опробования по существу не вышло за пределы лабораторных исследований (Грамаков, Шашкин, Ширин). Единственным применением получил пока только метод гамма-опробования, которому известны две модификации этого метода.

и  $\gamma$ -опробование с экранами по стенкам горных выработок и по поверхности естественных обнажений. Шуровое  $\gamma$ -опробование фактически мало чем отличается от  $\gamma$ -каротажа скважин.

Основной задачей  $\gamma$ -опробования в период разведки и эксплуатации урановых месторождений является определение мощности и процентного содержания урана в рудных телах, т. е. исходных параметров для подсчета запасов металла. В настоящее время имеется ряд примеров успешного использования  $\gamma$ -опробования для решения этой задачи. При поисковых работах на уран главной задачей  $\gamma$ -опробования становится выяснение природы радиоактивности обнаруженных  $\gamma$ -аномалий с последующей количественной оценкой оруденения, поскольку выявленные аномалии могут быть обусловлены  $\gamma$ -излучением рядов урана — радия, тория или радиоактивного изотопа калия —  $K^{40}$ .

При проведении  $\gamma$ -опробования в горных выработках или на поверхности естественных обнажений необходимо из общей интенсивности  $\gamma$ -излучения выделить только ту ее часть, которая характеризует содержание радиоактивных элементов в точках (или на участке) измерений. Это достигается с помощью специальных экранов, надеваемых на датчики обычных полевых радиометров, или же путем применения приборов с направленным приемом излучения.

В настоящее время используются главным образом экраны, частично поглощающие  $\gamma$ -излучение опробуемого участка. В практике работ наиболее распространенными экранами этого типа являются свинцовые цилиндрические экраны с вкладышами (Грамаков, Шаткин, Ширяева, 1959).

Интенсивность  $\gamma$ -излучения в пределах опробуемого участка определяется по двум независимым измерениям без вкладыша ( $I_1$ ) и с вкладышем ( $I_2$ ) по формуле

$$I = \frac{I_1 - I_2}{\alpha}, \quad (49)$$

где  $\alpha$  — доля излучения, поглощенная свинцовым вкладышем.

В радиометрах направленного приема используются два счетчика с различной интегральной чувствительностью ( $K_1$  и  $K_2$ ), разделенные свинцовым экраном (Грамаков, Шаткин, Ширяева, 1959).

Для выделения доли  $\gamma$ -излучения, характеризующей концентрацию радиоактивных элементов на опробуемом участке, в радиометре направленного приема измеряется разность  $\Delta I$  в интенсивностях излучения, фиксируемых каждым из счетчиков.

При этом, чтобы разность  $\Delta I$  зависела только от интенсивности  $\gamma$ -излучения в точке опробования, при конструировании радиометров этого типа выполняется следующее условие:  $K_2/K_1 = 1 - \alpha$ .

Тогда

$$I = \frac{\Delta I}{K_1 [1 - (1 - \alpha)]^2}, \quad (50)$$

Таким образом, радиометры направленного приема автоматически регистрируют величину  $\Delta I$ , прямо пропорциональную интенсивности

$\gamma$ -излучения опробуемого объекта. При этом следует помнить в виду, что компенсацию излучения окружающей среды принципиально можно осуществить лишь при условии, если спектральные характеристики счетчиков будут одинаковы, а спектры  $\gamma$ -излучения опробуемых руд и окружающей среды идентичны.

Теория  $\gamma$ -опробования в общем не отличается от теории  $\gamma$ -каротажа скважин. («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957). Поэтому методика количественной интерпретации, применяемую при каротаже, можно распространить и на  $\gamma$ -опробование.

В настоящее время промышленностью выпускается большое количество радиометров как специально предназначенных для  $\gamma$ -опробования (РГН-1, РРС), так и других, которые могут быть приспособлены для этой цели (СРП-2, ПГР, РП-1). Основные технико-эксплуатационные характеристики наиболее распространенных типов этой аппаратуры приведены в табл. 4. В этих типах радиометров используются газоразрядные или сцинтилляционные счетчики, помещенные в железные или алюминиевые корпуса с толщиной стенки 2—3 мм. Для того чтобы исключить влияние при  $\gamma$ -опробовании вещественного состава руд и обратно рассеянного от опробуемой поверхности излучения необходимо дополнительно экранировать счетчики свинцовыми фильтрами толщиной 1,5—2 мм.

Градуирование приборов для  $\gamma$ -опробования производится по общепринятой методике («Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд», 1957). Перед началом измерений поверхность опробуемого участка должна быть тщательно очищена. Измерения производятся по отдельным профилям. Расстояние между точками измерений на профиле обычно выбирается равным 10—20 см. Поскольку  $\gamma$ -опробование имеет целью заменить бороздвое или какой-либо другой вид геологического опробования, то выбор направления и густоты профилей определяется теми же горно-геологическими условиями, которые детально рассмотрены в работах, посвященных опробованию и подсчету запасов рудных месторождений (Смирнов, 1950; Яковин, 1954).

По каждому профилю строится график интенсивности  $\gamma$ -излучения  $\Delta I$  (разностного эффекта). Мощность рудных тел устанавливается по способам  $1/2 I_{\max}$ ,  $1/5 I_{\max}$  или  $I_{\text{зад}}$ , описанным в предыдущем разделе.

Содержание радиоактивных элементов в эквиваленте равновесного урана определяется по формуле

$$q = \frac{S}{100K_0h}, \quad (51)$$

где  $S$  — площадь  $\gamma$ -аномалии, полученная по измерениям интенсивности  $\gamma$ -излучения, мкр/ч·см;

$h$  — мощность радиоактивного тела, см;

$K_0$  — пересчетный коэффициент, связывающий  $\gamma$ -излучения  $\Delta I$  с содержанием урана. Численно равна количеству  $\gamma$ -излучения на 0,01% равновесного урана.

Если рудное тело полностью не пересечено профилем, то расчеты содержания урана можно производить, пользуясь соотношением

$$q = \frac{\Delta I}{100K_0} \quad (52)$$

При этом следует помнить в виду, что для маломощных пропластков применение формулы (52) приводит к значительному занижению определяемых содержаний урана. Численные значения пересчетных коэффициентов для урановых руд применительно к специально предвзвешенным для  $\gamma$ -опробования радиометрам РРС и РГН-1 приведены в табл. 29.

Таблица 29  
Численные значения пересчетных коэффициентов  $K_0$

Типы руды	Значения коэффициентов $K_0$ в микрорентгенах в час на 0,01% равновесного урана для радиометров	
	РРС	РГН-1
Урановые руды с эффективным атомным номером $Z_{эфф}$ равным 10—18 . . . . .	18	28

\* \* \*

Актуальными направлениями дальнейшего развития методов  $\gamma$ -каротажа скважин и радиометрического опробования в горных выработках, следует считать:

- 1) повышение чувствительности и стабильности поисковой аппаратуры радиоактивного каротажа на основе разработки приборов со сцинтилляционными счетчиками, позволяющих проводить измерения спектров  $\gamma$ -излучения руд и пород;
- 2) создание многопараметровой автоматической каротажной станции для одновременного измерения ряда физических параметров горных пород с целью изучения геологических разрезов по данным комплексного каротажа скважин и перехода на этой основе к более прогрессивному — бескаранному бурению на урановых месторождениях;
- 3) разработку ядерных методов каротажа, позволяющих определять непосредственно на месте залегания горных пород природу радиоактивности с последующей количественной оценкой содержания радиоактивных и других сопутствующих элементов (по естественной и искусственной радиоактивности с использованием скважинных нейтронных генераторов и ускорителей), в том числе разработку методов прямого определения концентрации урана в рудном теле;
- 4) разработку автоматической аппаратуры радиоактивного и комплексного каротажа в процессе бурения скважин и счетно-решающих устройств для обработки и интерпретации каротажных диаграмм.

## МЕТОДЫ ОБЩЕЙ ГЕОФИЗИКИ ПРИ ПОИСКАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Основными геофизическими методами изучения земной коры являются магниторазведка, гравиразведка, электроразведка и сейсмо-разведка\*. Эти методы используют для решения геологических задач: определения магнитного и гравитационного полей Земли, естественных и искусственно создаваемых электромагнитных полей и процессов распространения упругих колебаний в горных породах. При поисках и разведке урановых месторождений сравнительно широко применяются электроразведка, магниторазведка и гравиразведка. Возможность и условия применения геофизических методов при поисках и разведке рудных месторождений определяются различиями в физических свойствах горных пород и руд, размерах и формах геологических структур.

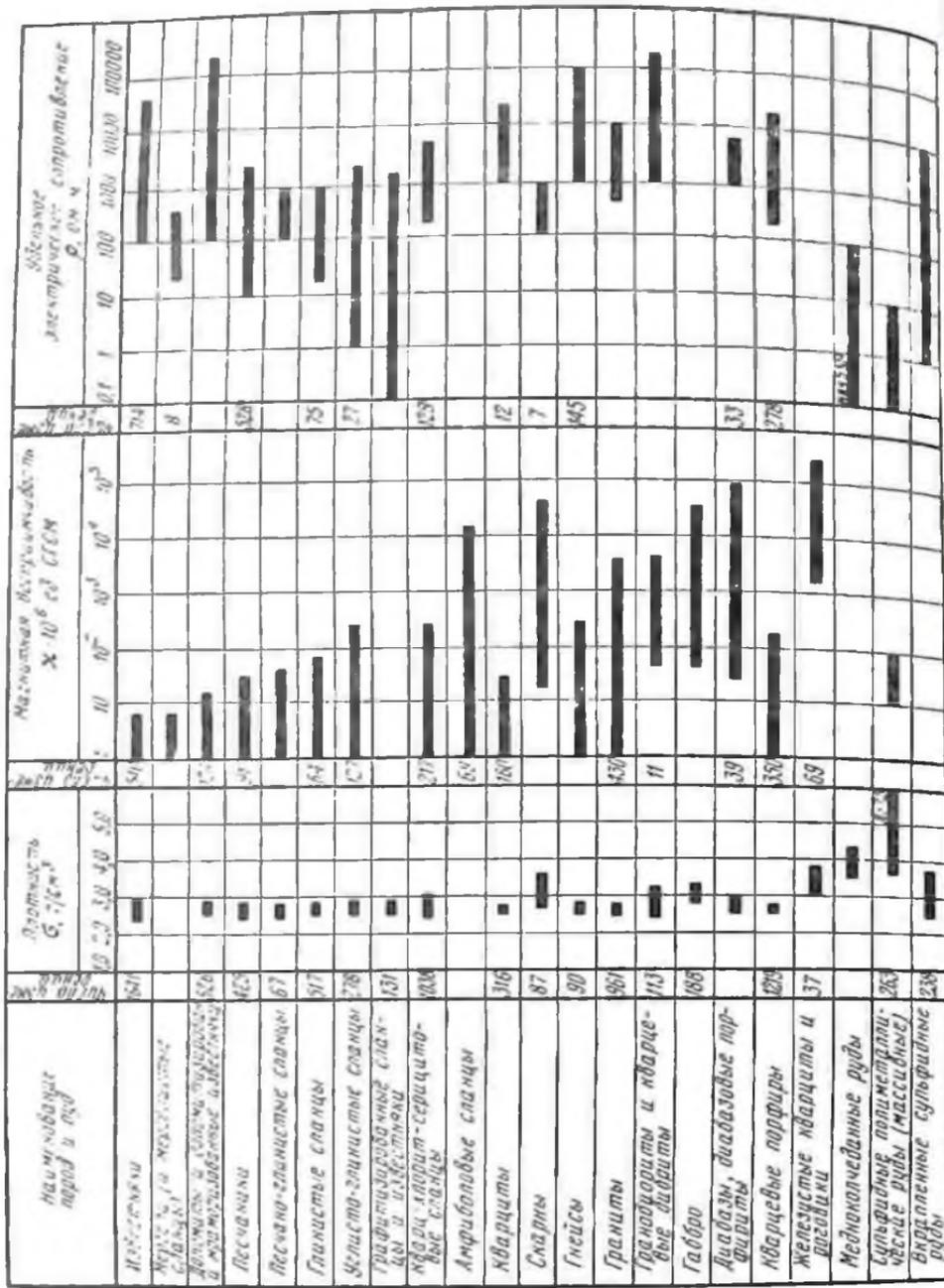
### 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Основными физическими свойствами, на использовании которых основывается применение современных геофизических методов, являются плотность, магнитная восприимчивость, остаточное намагничение, удельное электрическое сопротивление и скорость распространения упругих волн. Породы различаются по величине физических параметров и их дисперсии.

Данные о физических свойствах пород необходимы как для общей оценки возможностей отдельных геофизических методов и предварительного выбора наиболее эффективного из них для решения конкретной геологической задачи, так и при интерпретации результатов геофизических съемок. Кроме того, сведения о величинах физических параметров и их распределении в пространстве в ряде случаев имеют самостоятельное поисковое значение. Поэтому изучение физических свойств горных пород является необходимым элементом всех геофизических работ. Причем оно должно включать как определение физических параметров пород, так и установление закономерностей их пространственного распределения.

Физические свойства горных пород зависят от многих факторов и для одной и той же породы могут изменяться в широких пределах (рис. 77). Поэтому приводимые в справочниках и разведочных

\* В практике поисков и разведки урановых месторождений геофизические методы в отличие от специальных разведочных называют методами структурной геологии.





другие. Магнитная восприимчивость их, за исключением титаномагнетита, на несколько порядков меньше, чем магнетита. Из урановых минералов высокой магнитной восприимчивостью обладает урансо-державший титанит-давидит.

Магнитная восприимчивость горных пород зависит также от их текстурно-структурных особенностей. При прочих равных условиях более высокой величиной магнитной восприимчивости обладают породы, в которых магнитные минералы составляют непрерывно связанную сеть (Логачев, 1962).

Интенсивность остаточного намагничивания связана с теми же факторами, что и магнитная восприимчивость, но, кроме того, его величина и направление сильно зависят от интенсивности намагничивающего поля и температурного режима, в котором формировались горные породы, а также от их последующей геологической истории.

Наиболее магнитными являются магнетитовые и титаномагнетитовые руды и железистые кварциты. Величина магнитной восприимчивости таких руд и пород колеблется в пределах от 0,01 до 0,1 ед. СГСМ и выше. Среди пазреженных пород высокими магнитными свойствами обладают ультраосновные породы ( $\chi = 0,001-0,01$  ед. СГСМ). По мере уменьшения основности пород уменьшаются и их магнитные свойства. Магнитная восприимчивость кислых пород колеблется в пределах от нескольких десятитысячных до миллионных долей СГСМ. Осадочные породы, как правило, являются слабомагнитными. Повышенной магнитностью обладают глинистые образования (до  $500 \cdot 10^{-6}$  ед. СГСМ), а практически немагнитными являются известняки и гидротермические осадки.

Изучение магнитных свойств пород производится с помощью полевых приборов (типа М-2, М-14 и др.) и аstaticеских магнитометров (Капранов, 1962; «Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых», 1962). Для измерения магнитной восприимчивости применяются также индукционные и другие капметры (Чечерников, 1963).

Удельное электрическое сопротивление ( $\rho$ ) горных пород зависит от количества и минерализации воды, содержащейся в породе. Исключением составляют породы (руды) с густой вкрапленностью минералов, обладающих высокой электронной проводимостью (Семев, 1949). Высоким удельным сопротивлением обладают плотные кристаллические породы — граниты, базальты, диабазы и т. д. Их удельное сопротивление в природных условиях обычно меняется в пределах 1000—10 000 ом·м. Низкое удельное сопротивление имеют глины и пески, насыщенные минерализованной водой ( $\rho = 0,1-10$  ом·м). Другие породы в зависимости от содержания и степени минерализации воды занимают промежуточное положение. Электропроводящие руды (породы) имеют удельное сопротивление от тысячных долей до десятков омметров.

Изучение удельного сопротивления пород производится в основном полевыми методами (зондирование, каротаж). Лабораторные измерения могут применяться при изучении удельного сопротивления

однородных рыхлых отложений и электропроводящих руд («Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых», 1962; Семенов, 1949).

Основными параметрами, используемыми в сейсморазведке, являются акустическая жесткость пород и скорость распространения продольных упругих волн в них. Наибольшей скоростью упругих волн характеризуются массивные плотные ультраосновные породы (6—7 км/сек), граниты (5,5—6 км/сек), кристаллические сланцы (5—5,5 км/сек) и т. д. Наименьшая скорость наблюдается в рыхлых отложениях (0,2—1,5 км/сек). Определение скорости распространения упругих волн производится с помощью сейсмокаротажа и на основании наземных полевых и лабораторных наблюдений.

## 2. ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ОБЩЕГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПРИ ПОИСКАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Методы общей геофизики используются на всех этапах геологических исследований, связанных с поисками и разведкой урановых месторождений, начиная с этапа структурно-геологического районирования и изучения геологического строения исследуемых площадей и кончая выявлением и прослеживанием отдельных структур и геологических тел, с которыми связано урановое оруденение. При этом общая схема использования методов общей геофизики может быть представлена в следующем виде.

Исследования начинаются с изучения вмещающих геофизических материалов, на основе которого выясняется связь физических полей с геологическими структурами, комплексами пород и распределением уранового оруденения для района работ, а также определяется положение поисковых участков в общей структуре района.

Данные геофизических съемок используются при составлении структурно-тектонических схем и геологических карт и являются основой для поисковых работ более крупных масштабов, а также имеют непосредственное поисковое значение в тех случаях, когда по ним может быть уточнено положение рудовмещающих толщ и рудоконтролирующих структур.

Результаты анализа ранее выполненных геофизических работ, данные о физических свойствах и геологическом строении поискового участка кладутся в основу при выборе наиболее эффективного геофизического метода или комплекса методов для решения конкретной геологической задачи. Геофизические работы должны выполняться в сроки, позволяющие использовать их результаты при собственно поисках, а также при проходке горных выработок и т. д. Геофизические работы сопровождаются изучением физических свойств горных пород как путем сопоставления физических наблюдений с геологическими непосредственных измерений физических свойств в скважинах и на обнажениях. Геофизические работы выполняются

в комплексе с радиометрическими, геохимическими и геологическими исследованиями.

В настоящее время при поисках и разведке урановых месторождений используются результаты геофизических работ в масштабах 1 : 200 000—1 : 100 000, 1 : 50 000—1 : 25 000 и 1 : 10 000—1 : 2000. Результаты геофизических работ более мелких масштабов (1 : 1 000 000—1 : 500 000) используются для обоснования постановки работ более крупных масштабов.

В табл. 30 указаны основные задачи, решаемые геофизическими методами в различных масштабах при поисках урановых месторождений в различных геологических условиях, и используемые при этом комплексы геофизических методов.

Последовательность работ, а также выбор методов, размеры установок и густота сети определяются конкретной геологической обстановкой. При этом учитываются результаты более мелкомасштабных съемок.

**Мелкомасштабные работы (масштаб 1 : 200 000—1 : 100 000).** Большие объемы геофизических работ в масштабах 1 : 200 000—1 : 100 000 выполняют партии территориальных геологических управлений, трестов и контор. Эти партии проводят систематические гравиметрические и аэромагнитные съемки. Площадные съемки методами электроразведки и сейсморазведки в настоящее время, как правило, не проводятся. Однако в ряде мест этими видами съемок покрыты большие территории. Таким образом, во многих районах Советского Союза уже проведены кондиционные гравиметрическая, аэромагнитная и другие виды съемок. Поэтому первой задачей работ партий, ведущих поиски урановых месторождений в мелких масштабах, является обобщение и анализ материалов ранее выполненных геофизических съемок с целью использования их для построения схем геолого-тектонического строения, установления на этой основе закономерностей распределения уранового оруденения и выделения перспективных площадей. Кроме того, результаты этих съемок используются для уточнения возможностей геофизических методов и выбора наиболее эффективного поискового комплекса.

В тех случаях, когда на площади предполагаемых поисков гравиметрическая и аэромагнитная съемки еще не проводились, их выполнение наиболее рационально осуществлять силами специализированных партий территориальных геологических управлений, трестов и контор.

Партии, ведущие поиски урановых месторождений, сравнительно редко выполняют полевые геофизические работы в мелких масштабах.

Так как на большей части поисковых площадей уже выполнена аэромагнитная съемка масштабов 1 : 200 000—1 : 25 000, то задачей магниторазведочных работ поисковых специализированных партий является наземная привязка данных аэросъемки, уточнение строения поля и получение материалов для количественной интерпретации. Работы проводятся по заранее разбитой сети профилей

## Геоблизские методы при поисковых работах на уран

Масштабы и этапы работ	Размеры площадей	Задачи	Методы	Задачи	Методы
1	30	3	4	5	6
Масштабы работ 1 : 100 000	Размеры площадей 1 км — 1 км	<p>Выявление крупных тектонических структур, а также интрузий и эффузий в толще осадочных и осадочно-эффузивных пород</p> <p>Расчленение геологического разреза на глубину и выявление пологих структур</p> <p>Расчленение пород кристаллического фундамента под толщей осадочных отложений и выявление тектонических структур в нем</p> <p>Научение рельефа кристаллического фундамента под толщей осадочных пород</p> <p>Расчленение геологического разреза на глубину и выявление пологих структур</p> <p>Выявление и прослеживание зон тектонических и осадочных и</p>	<p>Гравиразведка, магниторазведка, ВЗЗ и электропрофилитрование</p> <p>ВЗЗ, сейсморазведка</p> <p>Гравиразведка, магниторазведка, ВЗЗ и электропрофилитрование, сейсморазведка</p> <p>Гравиразведка, магниторазведка, ВЗЗ и электропрофилитрование, сейсморазведка</p> <p>ВЗЗ, сейсморазведка, гравиразведка</p> <p>Магниторазведка, электропрофилитрование, гравиразведка</p>	<p>Расчленение пород по поверхности (картирование); выявление и прослеживание крупных структурно-тектонических особенностей (зон нарушения и т. п.), а также выявление отдельных пластов пород, двек и т. п.</p>	<p>Гравиразведка, магниторазведка, электропрофилитрование</p> <p>Гравиразведка, магниторазведка, электропрофилитрование, метод естественного электрического поля</p>

1 Масштабы и виды работ	2 Размеры площадей	3 Задачи	4 Методы	5 Задачи	6 Методы
<p>1 : 10 000 — 1 : 2000 Детальные полевые-разведочные работы</p> <p>Единицы — десятикв. квадратных километров</p>		<p>осадочно-эффузивных отложений Изучение рельефа кристаллического фундамента под толщей осадочных отложений Расчленение пород кристаллического фундамента и выявление структур в нем</p>	<p>ВЭЗ, гравиразведка, сейсморазведка  Гравиразведка, магниторазведка, электрофильтрация и ВЭЗ</p>	<p>во шламевых породах  Определение физических свойств и мощности рыхлых отложений  Расчленение пород по поверхности (картирование); выявление и прослеживание рудоуплотняющих структур (зон дробления и гидротермального замещения, аргиллизации, окисления, окварцевания т. п.) и геологических тел, с которыми связывается уравновешенное оруденение (дайки, жилы, сульфидные рудные тела, отдельными пачками пород и т. п.)</p>	<p>Электрорадар, магнитный карттаж, каротаж, магнитной восприимчивости, ВЭЗ  Магниторазведка, гравиразведка, электрофильтрация (средний градиент, дивольное профилирование и т. п.), методы естественного электрического поля и зареда, вызывающей поляризации и т. п.  Электрорадар, магнитный карттаж, каротаж магнитной восприимчивости, ВЭЗ</p>

(2000—1000 × 400—100 м) с приборами типа М-18, М-23. Для обеспечения высокой точности наблюдений при наземной магнитной съемке создается сеть опорных точек и производится измерение вариации магнитного поля. Все наблюдения приводятся к одному контрольному пункту. В значения измеренного поля вводится поправка за нормальный градиент магнитного поля Земли.

Электроразведочные работы проводятся по тем же профилям, что и магниторазведочные. Используются методы зондирования и профилирования. При постановке электроразведки в большинстве случаев применяется симметричная установка. Густота точек наблюдения, направление и величина максимальных разностей питающих электродов выбираются в зависимости от глубины опорного горизонта, геоэлектрического разреза и ландшафта местности. По данным ВЭЗ производится расчленение геологического разреза толщи осадочных пород и выясняется строение рельефа фундамента. С помощью крестовых (круговых) ВЭЗ возможно выявление и прослеживание зон трещиноватости и дробления в толще осадочных отложений (Огильви, 1957). При сравнительно небольшой мощности осадочных пород данные ВЭЗ можно использовать для расчленения пород фундамента. Однако более удобно применять для картирования пород фундамента методы электропрофиллирования в модификациях симметричного и дипольного профилирования.

При дипольном профилировании используются токи низкой частоты, измеряемые с помощью аппаратуры АНЧ-1 или НЧ (Вешев, 1962; Семенов и др., 1961), применение которых позволяет значительно упростить методику дипольного профилирования, в частности, уменьшить размеры питающей и приемной линий, отделить эти линии друг от друга, проводить наблюдения с током, численно равным или кратным коэффициенту установки, и т. п. Электропрофиллирование производится с одним или двумя разностями. Величина разностей выбирается в зависимости от требуемой глубины исследования и соотношения сопротивлений пород изучаемого горизонта и вышележащей толщи.

Для правильного геологического истолкования результатов геофизических наблюдений следует проводить изучение физических свойств пород на всей охваченной работами территории с тем, чтобы увязать особенности наблюдаемых полей с геологическим строением. При этом необходимо обращать внимание на выявление возможной зональности физических свойств осадочных пород, выражающейся в закономерном изменении этих свойств в горизонтальном и вертикальном направлениях вследствие изменения фациального геологического состава пород, трещиноватости, водонасыщенности и метаморфизма и т. п.

Для увязки геофизических данных с геологическими в районе необходимо строить геологическую карту, пересекающую основные структуры. Геологическая карта составляется на основании палеонтологических и литологических материалов.

и непосредственных наблюдений в поле с учетом данных геофизических работ и исследования физических свойств пород.

В результате мелкомасштабных геофизических работ выясняются общие геолого-тектонические особенности исследованного региона, с которыми может быть связано урановое оруденение (фации осадочных пород, интрузивные комплексы, тектонические структуры, зоны метаморфизма, миперализации, гидротермального изменения и т. д.). Геофизические работы вместе с геологическими данными обеспечивают обоснованный выбор площадей под поисково-съёмочные работы более крупных масштабов и правильную постановку последних.

**Поисково-съёмочные работы (масштабы 1 : 50 000 — 1 : 25 000).** Геофизические работы масштабов 1 : 50 000—1 : 25 000 производятся на перспективных площадях, выявленных на основе геологических, геофизических и других работ более мелких масштабов. Геофизические работы в этих масштабах в основном ставят сами партии, проводящие поиски урановых месторождений. Задачи, решаемые геофизическими методами на этом этапе, и комплексы применяемых методов приведены в табл. 30. Остановимся на некоторых особенностях выполнения этих работ.

Магниторазведочные работы, как и в более мелком масштабе, проводятся в воздушном и наземном вариантах. При этом комплексная аэрогамма-магнитная съёмка в масштабе 1 : 25 000 является одним из основных видов геофизических работ. Наземные магниторазведочные работы выполняются с использованием приборов типа М-18 или М-23, а также автомагнитной станции с приставкой для абсолютных измерений магнитного поля. Постановка автомагнитной съёмки рациональна на площадях, незасянутых аэромагнитной съёмкой. Автомагнитная съёмка, как и другие виды наземных работ, должна выполняться по предварительно разбитой сети профилей.

Гравиразведочные работы в масштабах 1 : 50 000—1 : 25 000 в зависимости от задач и условий проводятся с гравиметрами или гравитационными вагмометрами (градиентометрами). Измерения выполняются как по сети профилей, так и по маршрутам, задаваемым вкрест простирания изучаемых структур. Измерения градиентов силы тяжести следует проводить для выделения небольших объектов или детального изучения пачек перемежающихся пород, нерасчленимых другими методами (например, магниторазведкой).

Для постановки гравиразведочных работ в масштабе 1 : 50 000 на больших площадях целесообразно привлекать силы специализированных партий.

Электроразведочные работы в указанных масштабах проводятся методами электропрофилирования и естественного поля. Электропрофилирование выполняется с симметричной, дипольной или комбинированной установками. Электропрофилирование ставится на переменном токе низкой частоты. Метод естественного поля используется тогда, когда на изучаемой площади развиты графитизирован-

ные или прит-протитизированные толщи пород (Семенов, 1955).

В районах развития пологозалегающих рудоносных или рудо-контролирующих структур в том случае, когда поисковые задачи не могут быть решены другими, более дешевыми методами, возможна поставка сейсморазведочных работ. В районах распространения магматических и метаморфических комплексов пород возможности сейсморазведки еще полностью не оценены.

Все геофизические работы сопровождаются изучением физических свойств горных пород. По наиболее характерным профилям на исследуемых участках проводится построение геологических разрезов с использованием данных горных выработок и буровых скважин, а также параметрических наблюдений.

**Детальные поисково-разведочные работы (масштабы 1 : 10 000—1 : 2000).** Геофизические работы в этих масштабах обычно ставятся в районах развития интрузивных, эффузивных и крутопадающих осадочно-эффузивных, а также метаморфических комплексов пород. Основными методами, используемыми при наземных работах в этих масштабах, являются магниторазведка и электроразведка (в некоторых случаях гравиразведка (обычно измерение градиентов силы тяжести)). Работы выполняются в пределах перспективных участков и рудных полей, выделенных по данным геолого-геофизических исследований более мелких масштабов, а также на аномалиях, выявленных при воздушных съемках. Задачи геофизических методов на этом этапе работ указаны в табл. 30.

Главным видом магнитной съемки является наземная съемка с приборами типа М-18 и М-23. Авто- и аэромагнитная съемка ставятся в масштабе не крупнее 1 : 10 000 вследствие трудности обеспечения требуемой точности привязки.

Из электроразведочных методов в зависимости от задач и геологического строения исследуемой площади используются методы ВЭЗ, симметричного, комбинированного или дипольного профилирования, срединного градиента, естественного поля, заряда и т. д. Методика детальных работ методами электроразведки за исключением метода срединного градиента достаточно разработана (Блох, 1957, 1962; Заборовский, 1943).

Метод срединного градиента (Семенов и др., 1961) является одним из наиболее эффективных картировочных методов при крупномасштабных исследованиях. Размеры планшета, снимаемого с одной установкой питающих электродов, зависят от характера геологического разреза и от расстояния между электродами. Размеры установок для метода срединного градиента обычно составляют: MN — 4 км, шаг измерений 10—20 м при расстоянии между электродами 50—100 м. Размеры планшетов при этом 6 км<sup>2</sup>.

В тех случаях, когда урановая минерализация связана с сульфидными рудами (сульфидами, магнетитом) методы заряда, ВП или естественного

Гравипреледочные работы па этом этапе вследствие их дороговизны ставятся лишь в том случае, когда с помощью других методов невозможно решить поставленные геологические задачи, например расчленение толщ, включающей серию маломощных прослоев сильно магнитных пород, отмечаемых магниторазведкой как единое целое, но различающихся по плотности, и др. Работы проводятся с гравиационными градиентометрами или вариометрами по отдельным профилям (или сериям профилей), пересекающими наиболее интересные зоны.

Геофизические работы сопровождаются отбором образцов горных пород и определением их физических свойств.

### 3. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ОБЩЕЙ ГЕОФИЗИКИ ПРИ ПОИСКАХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Примером использования геофизических материалов для выяснения общих геолого-тектонических особенностей локализации уранового оруденения могут служить данные, полученные в одном из рудовосных районов. Район имеет двухъярусное строение. Нижний структурный ярус сложен метаморфическим и интрузивным комплексом пород протерозоя и палеозоя. В состав верхнего структурного яруса входит мезо-кайнозойская эффузивно-осадочная толща слабодислоцированных и стратифицированных отложений. Эта толща, как и нижний структурный ярус, прорывается отдельными молодыми гранитными интрузиями. Урановое оруденение локализуется в верхнем структурном ярусе в виде залежей пластового типа. Генезис оруденения не ясен.

В этом районе наиболее детально анализировалось гравитационное поле (рис. 78). Всю южную часть площади занимает крупный максимум, а северную — минимум гравитационного поля. Оба экстремума имеют сложный характер. Друг от друга они отделены полосой резких градиентов. Аналогичные, но менее четкие полосы градиентов гравитационного поля имеются в пределах самих экстремумов. Как показал анализ геологических данных и результатов изучения физических свойств пород, основные особенности поля обусловлены геологическим строением нижнего структурного яруса. Максимум гравитационного поля очерчивает область преимущественного распространения древних метаморфических пород, а минимум характеризует область распространения палеозойских гранитоидов. Полосы высоких градиентов поля соответствуют зонам тектонических нарушений, которые в ряде мест зафиксированы при геологических наблюдениях. Наиболее крупное тектоническое нарушение рассекает в северо-восточном направлении рассматриваемый район па две части. К ответвлению этого нарушения, идущему в северо-западном направлении, приурочено единственное в этом районе месторождение урана. Месторождение располагается в области распространения молодых пород фундамента. Другие урановые

рудопроявления располагаются в иной геологической обстановке и, как показали поисково-разведочные работы, ни по масштабам, ни по характеру оруденения несравнимы с основным месторождением.

Таким образом, в результате анализа геофизических материалов с учетом данных о физических свойствах пород и геологии региона установлен структурный контроль уранового месторождения, наличие которого ранее отрицалось. Остановимся на результатах геофизических работ на некоторых месторождениях урана.

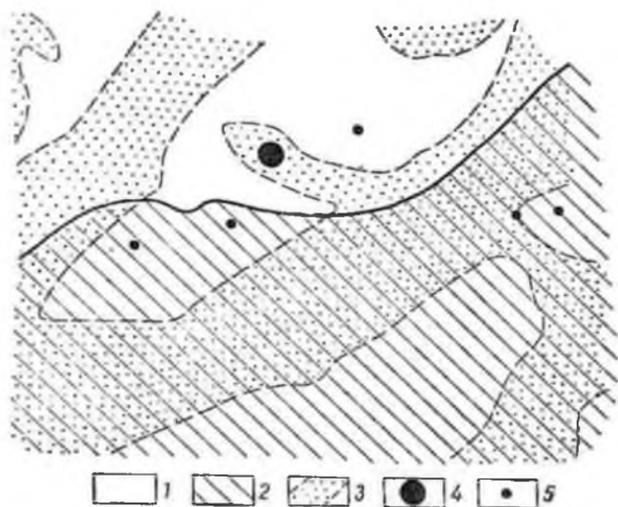


Рис. 78. Геолого-геофизические структуры района и размещение уранового оруденения  
 1 — минимум гравитационного поля, соответствующий области развития палеозойских гранитоидов; 2 — максимум гравитационного поля, соответствующий области развития древних метаморфических толщ и основных пород; 3 — зоны повышенных горизонтальных градиентов гравитационного поля, соответствующие полосам тектонических нарушений; 4 — урановые месторождения; 5 — рудопроявления урана

*Месторождения и рудопроявления урана осадочного типа.* Район работ, характеризующийся горным рельефом, сложен палеозойскими и мезо-кайнозойскими отложениями. Палеозойские породы на большей части исследованной территории погружены под мощный покров более молодых отложений и представлены известняками, сланцами, песчаниками и алевролитами карбона, а также кварцевыми порфиро-рамп и гранитами. Мезо-кайнозойские породы в основном состоят из красноцветных песчано-глинистых отложений. Залегавшие в них юрские отложения несут прослойки углистых глин, связанных с урановым оруденением.

Геофизические работы ставились с целью выявления связей между юрскими отложениями и палеозойскими породами. Эти задачи решались методом сейсмического профилирования.

Палеозойские графиты выделялись профилированием значительно более высокими сопротивлениями (до 1000 ом·м и выше), чем контактирующие с ними юрские гравелиты и песчаники.

Юрские породы расчленялись на несколько горизонтов, среди которых низкими сопротивлениями (до 5—30 ом·м) выделялась обогащенная ураном углесодная толща. Менее четко фиксировалась граница между юрскими и третичными отложениями, удельное сопротивление которых менялось примерно в одних и тех же пределах.

В этом же районе с целью определения глубины палеозойского складчатого основания ставился метод ВЭЗ. Были получены преимущественно четырехслойные кривые, по которым четко прослеживался опорный горизонт высокого сопротивления, отвечающий палеозойским породам. На основе интерпретации кривых ВЭЗ построен разрез, представленный на рис. 79. На этом же рисунке приводятся результаты сейсморазведочных работ, выполненных на одном из участков профиля методом преломленных волн.

В результате геофизических работ в пределах профиля установлены два поднятия палеозойского фундамента. Заданные на поднятиях скважины вскрыли ураноносные юрские отложения и толщу осадочных палеозойских пород, залегающую ве-

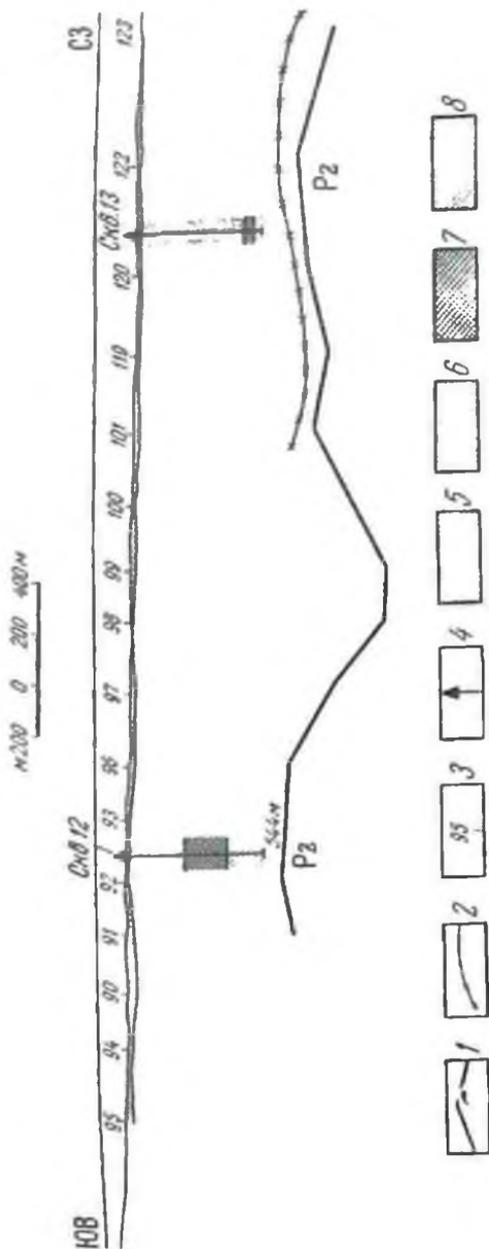


Рис. 79. Схематический разрез по данным ВЭЗ и сейсморазведки  
 1 — по данным ВЭЗ; 2 — по данным сейсморазведки; 3 — трещина и номер скважины; 4 — современные отложения; 5 — современные отложения; 6 — третичные породы; 7 — юрские ураноносные породы; 8 — палеозойские породы

сколько выше границы, установленной по геофизическим данным. Очевидно, эта граница отвечает граштам, подстилающим осадочные отложения палеозоя. Эти осадочные отложения мало отличаются по физическим свойствам от вышележащих юрских пород и поэтому не выделились на кривых ВЭЗ и не были отмечены сейсморазведкой.

Основная задача работ — выявить области распространения юрских пород на доступных для разведки глубинах — была решена комплексом геофизических исследований.

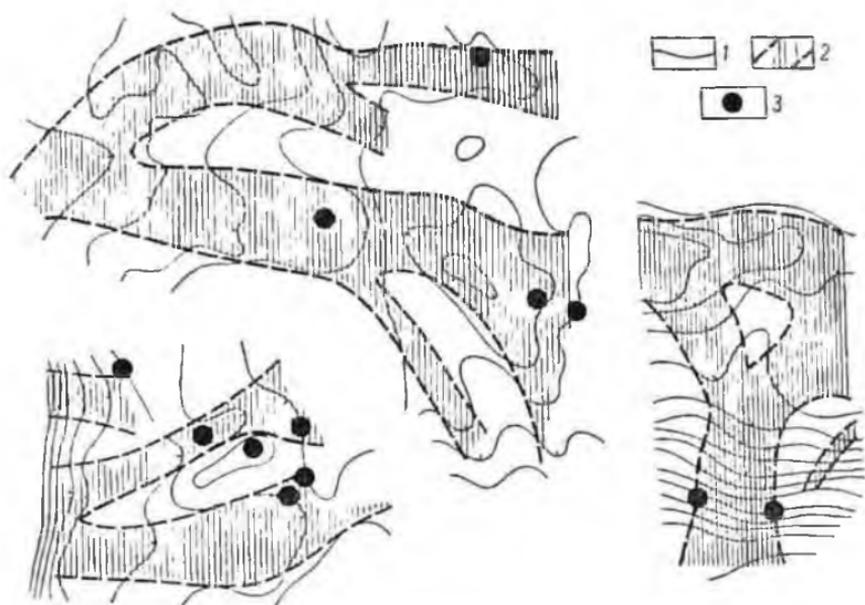


Рис. 80. Схематический план изолиний силы тяжести  
1 — изолинии силы тяжести; 2 — зоны пониженных значений силы тяжести; 3 — урановое оруденение.

Другим примером могут служить работы, проведенные в районе, характеризующемся широким развитием мезо-кайнозойских осадочных отложений, к которым приурочено осадочное месторождение урана.

Анализ результатов гравиметровых исследований, выполненных в этом районе, показал, что большинство выявленных здесь урановых рудопроявлений приурочено к локальным понижениям гравитационного поля, отражающего структуры палеозоя (рис. 80). Наличие долин, образованных мезо-кайнозойскими отложениями, позволяет использовать данные гравразведки и данные поискового бурения, характеризующихся прогибами в поисках для уранового оруденения прогибов в бортах этих прогибов. В большинстве случаев урановое оруденение приурочено к бортам этих прогибов.

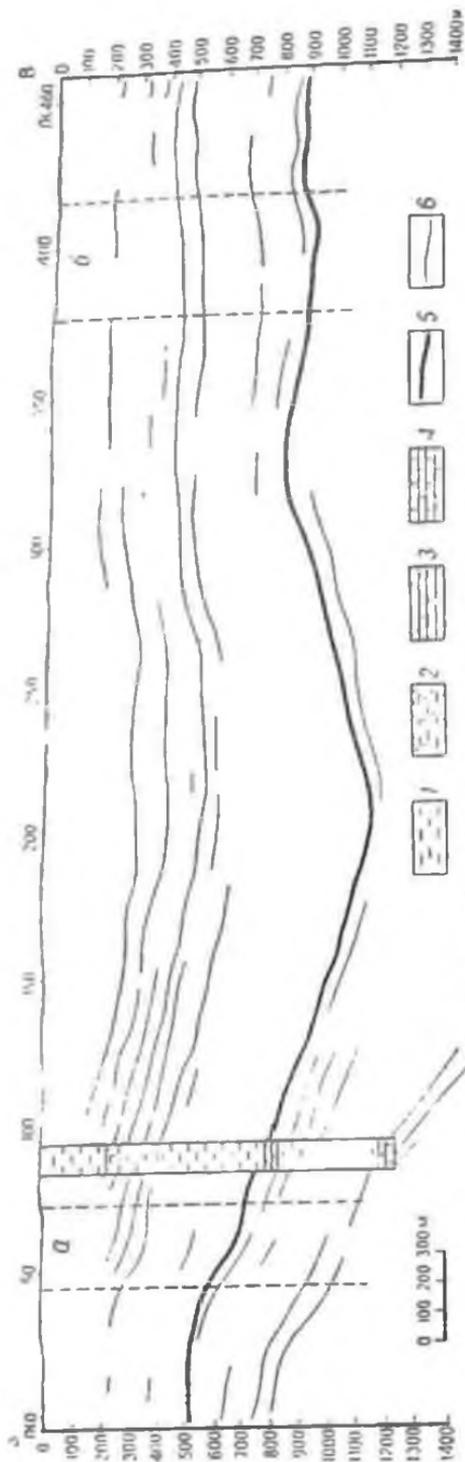


Рис. 81. Схематический разрез по данным сейсморазведки  
 1 — гранит; 2 — гнейс; 3 — mica schist; 4 — мергель; 5 — оносный отражающий горизонт; 6 — отражающий горизонт;  
 а, б — участки профиля, перспективные в отношении уранового оруденения

Поставленные в этом районе сейсморазведочные работы показали возможность расчленения разреза геофизическими методами. На рис. 81 приведены сейсмический разрез и геологическая колонка, составленная по результатам буровых работ на одном из профилей. Как видно из рис. 81, по данным сейсморазведки представляется возможным получить необходимые сведения о структуре осадочных отложений и наметить перспективные участки для поискового бурения на уран. Применение сейсморазведки позволило сократить объем буровых поисковых работ.

Гидротермальные месторождения урана. Для одного из обследованных районов характерно широкое развитие зон дробления, с которыми в ряде случаев связана урановая минерализация. Эти зоны, как правило, обогащены минералами каолиновой группы и обводнены. Сопротивление каолинизированных пород и зон дробления составляет 180—320 *ом·м*, а вмещающих их гранитов и граводиоритов 1500—10 000 *ом·м*. Такое соотношение сопротивлений является благоприятным для поисков и прослеживания зон дробления методами электроразведки. Рассмотрим результаты работ этими методами на одном из исследованных

-20М 0 20 40 60 80М  
500ΩМ 0 500 1000 1500 2000ΩМ

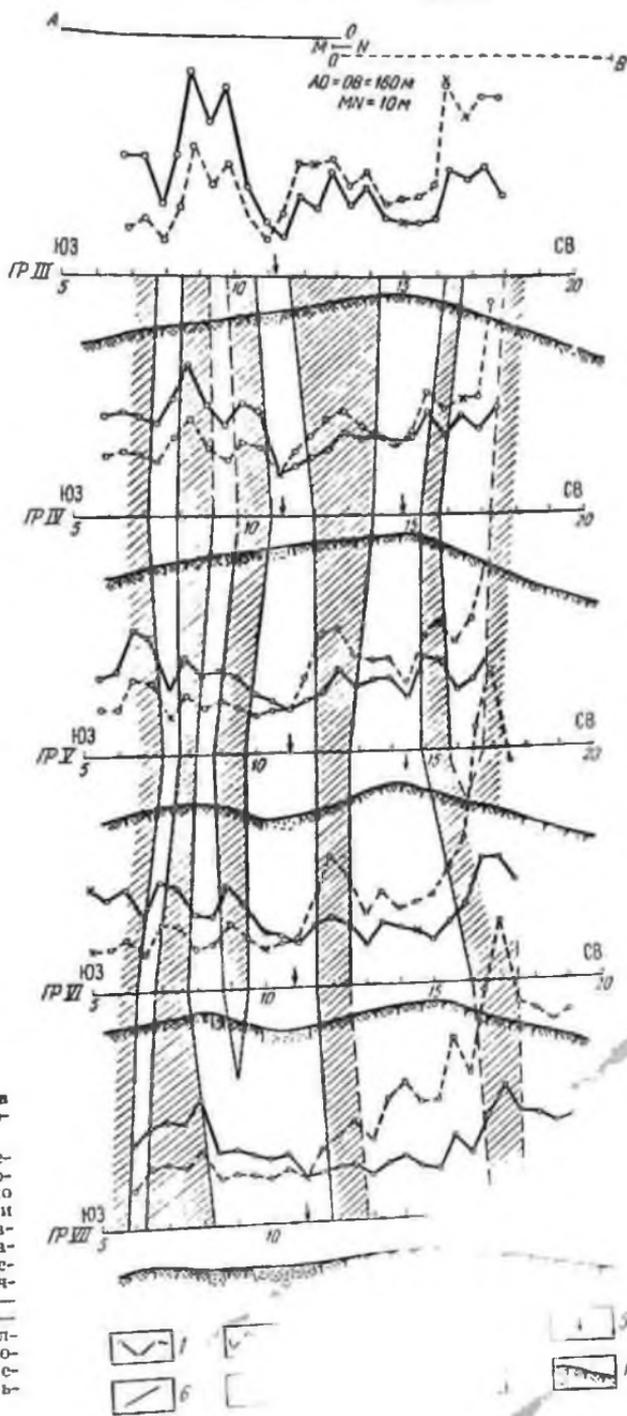


Рис. 82. План графиков комбинированного профилирования

1, 2 — графики кажущегося сопротивления, полученные соответственно с установками АМН и МНВ; 3 — основной замер; 4 — повторный замер; 5 — прямое пересечение графиков встречных установок; 6, 7 — линии корреляций; 8 — зоны дробления и аргиллизации; 9 — зоны повышенного сопротивления; 10 — профиль рельефа местности

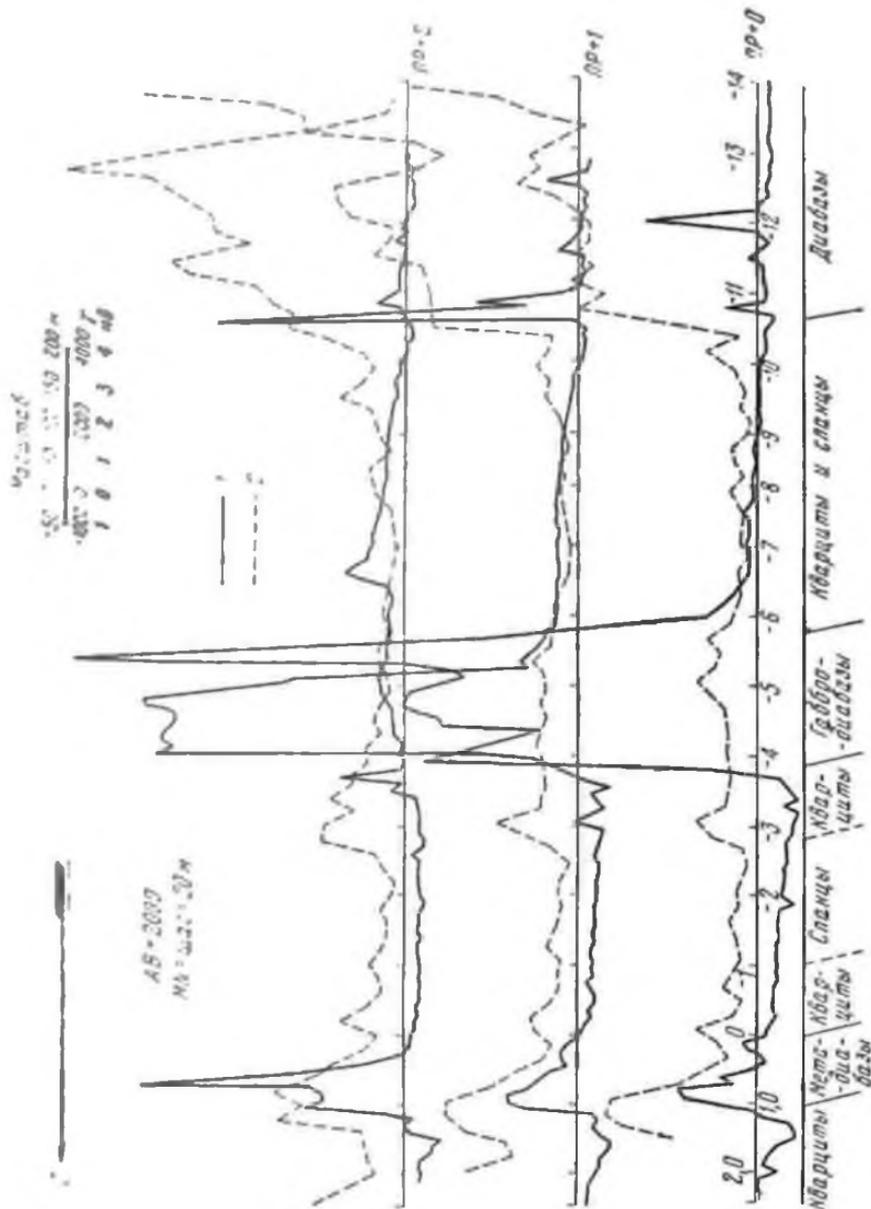


Рис. 83. Графики  $\Delta Z$  магнитной съемки (1) и разностей потенциалов по методу среднего градиента (2) над толщей ураноносных метаморфизованных пород

участков. Участок сложен разновидностями гранитов, которые в северо-западном направлении пересекаются зоной дробления и гидротермальноизмененных пород, круто падающей на северо-восток. Породы зоны дробления сильно каолинизированы и окварцованы. Кварцевые жилы, расположенные в пределах зоны дробления, обогащены вкрапленностью сульфидов. Зона дробления несет линзы урановых руд.

В результате проведенных здесь электроразведочных работ установлено, что наиболее четко зоны дробления фиксируются методом комбинированного профилирования.

На кривых  $R_k$  комбинированного профилирования выделяется ряд коррелирующихся по профилям зон повышенного и пониженного сопротивления (рис. 82). Зона дробления при этом отмечается характерным понижением и прямым пересечением кривых  $R_k$  встречных

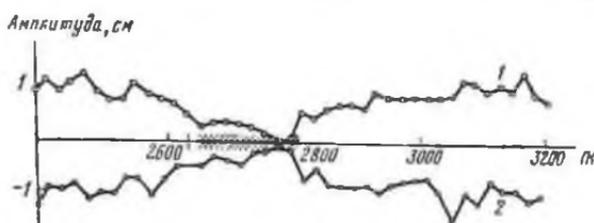


Рис. 81. Амплитудные графики преломленной волны на профиле, пересекающем диастрофическое нарушение  
1 — амплитуды записи сейсмических колебаний по третьей фазе; 2 — то же, по четвертой фазе. Заштрихована ураноносная зона дробления пород

установок. Приведенным примером хорошо иллюстрируются возможности методов электроразведки при детальном картировании вообще и при картировании ураноносных зон дробления в частности.

При анализе результатов магниторазведки, поставленной на том же участке, было установлено, что над дайками диоритовых порфиров, когда они пересекаются зонами дробления и каолинизации, магнитное поле резко уменьшается ( $\Delta Z$  снижается с нескольких тысяч до первых сотен гамм). Это явление также было использовано для прослеживания зон уранового оруденения.

Ниже приводится пример комплексного применения методов магниторазведки и электроразведки (среднего градиента) в районе развития древних метаморфических пород. Урановое оруденение здесь приурочено к зонам трещиноватости на контакте осадочных и эффузивных пород и к отдельным участкам в пределах метаморфических пород. На рис. 83 приведены результаты съемки среднего градиента магниторазведки и среднего градиента, полученной на участках работ. Магниторазведка здесь выделяет несколько или менее параллельных полос изверженных пород, в основном габбро-диабазов и диабазов. Это позволяет существенно уточнить картирование участка

и тем самым более рационально направить поисковые работы. Метод среднего градиента позволил наряду с выделением полос изверженных пород расчленить осадочную толщу и таким образом получить дополнительный материал для детального геологического картирования.

На рис. 84 приводится пример, когда урановая зона дробления была зафиксирована по интенсивности затухания преломленных сейсмических волн. Как видно из рис. 84, абсолютные величины амплитуд записи сейсмических колебаний резко уменьшаются в районе шифров 2650—2800, где расположена эта зона.

Приведенные примеры далеко не исчерпывают уже накопленный опыт успешного применения геофизических методов при поисках урановых месторождений, а только показывают характер решаемых задач и возможности этих методов. В дальнейшем геофизические методы будут находить все более широкое применение при поисково-разведочных работах на уран.

## РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

# ПОИСКИ

### ГЛАВА XII

## ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ЭТАПА ГЕОЛОГО-ПОИСКОВЫХ РАБОТ НА УРАЛ

Успехи геологов в сочетании с промышленным освоением вновь открываемых месторождений обеспечили необходимые темпы развития добычи урановых руд и атомной промышленности в целом. Вместе с тем в результате интенсивных поисков у нас, как и за рубежом, количество легко открываемых месторождений урана заметно сократилось. Дальнейшее развитие минерально-сырьевой базы атомной промышленности, конечно, еще возможно в какой-то мере за счет таких месторождений, особенно в слабо изученных районах. Но вряду с этим со всей остротой возникает новая очень сложная проблема постепенного перехода к поискам трудно открываемых месторождений, прежде всего в тех районах, где такие месторождения могут составить главный резерв уранодобывающей промышленности.

Следует подчеркнуть, что дело это нелегкое и не сулит быстрых успехов. Серьезные трудности придется преодолевать в трех основных направлениях: 1) геологическое обоснование выбора локальных (ограниченных по размерам и точно геометризованных) площадей под поиски трудно открываемых месторождений; 2) разработку эффективной методики глубинных поисков для различных геологических и природных условий; 3) изыскание технических средств для глубинных поисков.

Выбор локальных площадей под поиски трудно открываемых месторождений определенного типа должен основываться на разработанных геологических прогнозах.

Значительные трудности представляют собой изыскание технических средств для глубинных поисков. Эти трудности особенно остро ощущаются в настоящее время.

огромного количества мелких скважин по наносам и коренным породам, что заставляет предъявлять особые требования к производительности и мобильности буровых агрегатов, а для труднопроходимых районов, кроме того, к их портативности и весу. Возникает также необходимость конструктивного и технологического решения ряда вопросов, связанных с пробуриванием и комплексными решениями в скважинах, совмещенными с их проходкой.

Основными направлениями в разработке методики поисков урановых месторождений являются:

1) дифференцированный подход к исследованию перспективных площадей в соответствии с их геологическими особенностями, характером искомого объекта и природными условиями ведения поисковых работ. В качестве исходных работ, обеспечивающих такой подход, должна быть произведена переоценка опоскованности ранее изученных территорий с выделением перспективных площадей, заслуживающих дополнительных поисков в более крупном масштабе или более совершенными методами;

2) рациональное сочетание поисковых методов на каждом из выделенных участков перспективной площади, обеспечивающее решение поставленных задач при минимальных затратах времени и средств;

3) разработка и широкое производственное внедрение рациональной методики поисков трудно открываемых месторождений, начиная с выбора перспективных площадей по каждому типу месторождений и кончая оценкой выявленных аномалий и других признаков искомого оруденения.

Параллельно должны решаться вопросы технического оснащения глубинных поисков.

Анализ геологических материалов, природных условий ведения поисковых работ и качества последних по ряду уранорудных районов указывает на наличие значительного резерва трудно открываемых месторождений, недоступных для выявления практикованными поисковыми методами. В связи с этим переоценка опоскованности ранее изученных территорий приобретает большое народнохозяйственное значение как один из важных факторов повышения эффективности геологоразведочных работ.

Переоценка опоскованности должна быть произведена для всех площадей, перспективных в отношении уранового оруденения. При выделении последних рекомендуется различать:

1) площади в пределах определившихся промышленно рудных районов (с промышленными урановыми месторождениями), требующие постановки детальных поисков, обеспечивающих выявление по возможности всех урановых месторождений, включая трудно открываемые;

2) площади в пределах районов с установленными рудопроявлениями урана и другими прямыми поисковыми признаками урановости, являющиеся объектом детальных поисков, которые имеют целью выявление промышленных урановых месторождений и оценку промышленных перспектив района в целом;

3) площади, характеризующиеся благоприятными геологическими предпосылками (по апагогнии с известными рудными районами, на основе металлогенических построений, по наличию косвенных признаков уравноности и т. п.) и требующие постановки рекогносцировочных поисков на уран.

При оценке опоскованности изучаемых территорий необходимо учитывать как кондиционность проведенных работ, так и соответствие применявшихся масштабов и методов поисков геологическим и другим природным условиям, а также ожидаемым на данной территории типам месторождений и формам их проявления на поверхности земли.

Кондиционность выполненных работ оценивается по плотности поисковых маршрутов и качеству наблюдений в соответствии с действующими инструкциями. Соответствие масштабов и методов поисков геолого-структурным особенностям района, типам месторождений, условиям их эрозивного вскрытия, обнаженности и другим условиям определяется согласно положениям и рекомендациям, изложенным в настоящей работе.

Эффективное использование поисковых методов обеспечивается следующими условиями:

1) соответствием комплекса применяемых методов характеру искомого объекта и условиям их проявления в данной природной обстановке;

2) исключением из комплекса геологопоисковых работ дублирующих друг друга методов с оставлением наиболее производительных и экономичных методов;

3) минимальными затратами времени и средств на решение поставленных задач.

Первое из перечисленных условий должно гарантировать выявление прямых и косвенных признаков искомого месторождения, а при отсутствии последних обеспечить надежную отрицательную оценку изучаемой площади.

Геологические возможности поисковых методов определяются в основном их глубиной. По этому признаку можно различать три основные группы методов.

**П о в е р х н о с т н ы е м е т о д ы:** аэрогамма-съемка, автогамма-поиски, пешеходные  $\gamma$ - $\beta$ -съемки и эманационная съемка обычной модификации при малой мощности и слабой газопроницаемости легкого покрова. С помощью этих методов можно выявлять лишь легко открываемые месторождения урана, имеющие непосредственный выход на дневную поверхность и сопровождающиеся литохимическими ореолами нормальной интенсивности.

**М е т о д ы п о в ы ш е н н о й г л у б и н ы:** химический и иловый методы при неглубокой (до 10 м) скважинной съемке (при поисках) и их довные осадки (при скважинной съемке обычной модификации) и хорошей

его газопроницаемости; в) эвапоровая съемка повышенной глубины с отбором проб воздуха с глубины 1—3 м при высоком стоянии грунтовых вод и слабой газопроницаемости рыхлого покрова; г) γ-картаж в бурках той же глубины (1—3 м) при высоком стоянии грунтовых вод; д) биогеохимический метод при неглубокой корневой системе опробуемых растений (несколько метров).

Использование перечисленных методов обеспечивает выявление урановых месторождений, сопровождающихся ослабленными с поверхностью литохимическими ореолами рассеяния или связанными с последними (и с неглубоко залегающими рудными телами) гидрохимическими и биогеохимическими ореолами.

Г л у б и н н ы е м е т о д ы: а) гидрохимический и пловый методы при глубокой циркуляции подземных вод, питающих опробуемые родники, водотоки и их дождевые осадки; б) биогеохимический метод при глубокой корневой системе опробуемых растений (до 10—20 м); в) систематическое поисковое разбуривание рыхлого покрова с комплексом геологических, геофизических и геохимических исследований в скважинах для выявления погребенных ореолов и связанных с ними урановых месторождений; г) буровые поиски в осадочном чехле платформ, ориентированные на выявление слепых эндогенных месторождений урана; д) комплексные поиски слепых эндогенных месторождений по первичным ореолам и другим поисковым признакам.

Особенности месторождений и условия среды, определяющие формирование поисковых признаков, могут находиться в самых разнообразных сочетаниях, что в свою очередь обуславливает очень большое разнообразие теоретически возможных и фактически наблюдаемых проявлений поисковых признаков урановых месторождений в различной геологической и природной обстановке.

Практически при проектировании и проведении геологопоисковых работ наибольшее значение имеет преобладающее развитие вторичных ореолов определенного типа, доступных для обнаружения поисковыми методами той или иной глубинности. В схеме можно различать: 1) площади преимущественного развития открытых ореолов нормальной интенсивности, доступных для обнаружения поверхностными методами, в том числе наиболее высокопроизводительными аэро- и автогамма-съемкам; 2) площади преимущественного развития ослабленных и неглубоко погребенных ореолов рассеяния, доступных для обнаружения соответственно поисковыми методами повышенной глубинности и глубинными; 3) площади преимущественного развития слепых и глубоко погребенных ореолов рассеяния, доступных для обнаружения только глубинными поисковыми методами.

Однако не следует забывать, что это лишь схема. Фактически любой рациональный комплекс геологопоисковых работ должен проектироваться и осуществляться с таким расчетом, чтобы используемые поисковые методы в максимальной степени соответствовали характеру искомых объектов и формам их проявления в данной природной обстановке.

Второе из названных выше условий рационального сочетания поисковых методов (исключение дублирующих и оставление в комплексе наиболее производительных методов) особых пояснений не требует. Эту всем известную истину приходится напомнить по той причине, что на практике часто значительные площади без всякой надобности и эффекта перекрываются дублирующими друг друга поисковыми методами. Не всегда учитывается также возможность улучшения технико-экономических показателей работ за счет использования наиболее производительных и экономичных методов.

Вопросы экономики геологоразведочных работ в настоящее время приобретают особенно важное значение. С переходом к поискам трудно открываемых месторождений вероятность крупных непроводительных затрат становится еще больше. Поэтому при решении всех методических вопросов технико-экономические критерии должны учитываться наравне с геологическими. Это касается не только выбора наиболее производительных и экономичных поисковых методов, но и окупаемости геологоразведочных работ в целом.

Последнее условие относится к крупным регионам. При этом следует учитывать, что успешные результаты геологоразведочных работ нередко получают лишь при многолетних исследованиях и не во всех районах. Определенных правил или установок по этому вопросу не существует, и в каждом конкретном случае он решается центральными планирующими и руководящими органами.

При рассмотрении рациональной методики поисков урановых месторождений представляется целесообразным выделить прежде всего группу легко открываемых месторождений, независимо от их генетических типов. Несмотря на существенные различия в геологической позиции и поисковых признаках этих месторождений, их объединяет доступность для обнаружения при поисках высокопроизводительными поверхностными методами.

Несмотря на слабую теоретическую разработку вопросов методики поисков трудно открываемых месторождений урана и весьма ограниченный практический опыт, ниже рассматриваются особенности и комплексирование методики поисков слепых эндогенных месторождений урана (гл. XIV) и погребенных месторождений различных генетических типов (гл. XV).

Методика поисков слепых инфильтрационных, осадочных и осадочно-метаморфогенных месторождений не рассматривается.

## ПОИСКИ ВЫХОДЯЩИХ НА ПОВЕРХНОСТЬ (ЛЕГКО ОТКРЫВАЕМЫХ) МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Среди легко открываемых месторождений можно различать такие, у которых на поверхность выступают: 1) первичные руды в сопровождающие их первичные ореолы; 2) вторичные (окисленные) руды в сопровождающие их вторичные или смешанные ореолы; 3) только вторичные ореолы.

Наиболее благоприятен первый случай, когда на поверхности можно наблюдать первичные руды месторождений, которые и являются объектом поисков. Хорошая обнаженность руд и вмещающих пород позволяет не только быстро выявлять, но и оценивать месторождение без проведения большого объема буровых и горных работ.

Урановые месторождения с выходами первичных руд на поверхность встречаются редко даже на обнаженных участках ввиду их неустойчивости против физического и особенно химического выветривания.

Открытия месторождений по окисленным рудным выходам более обычны, хотя и не так часты. Наиболее распространенным является случай, когда на поверхности выступают только вторичные ореолы рассеяния. Подавляющее большинство известных урановых месторождений у нас и за рубежом открыто именно по этим ореолам.

Вторичные ореолы образуются при выветривании руд и первичных ореолов месторождений. Средой, в которой обычно развиваются литохимические вторичные ореолы рассеяния, являются остаточные коры выветривания, различные рыхлые отложения склонов и долин и почвы. Поэтому важной для поисков особенностью вторичных ореолов рассеяния является возможность их использования в качестве надежного поискового признака не только на обнаженных участках, площади которых ограничены, но и на площадях, закрытых чехлом рыхлых образований.

Вертикальные размеры вторичных ореолов в различных ландшафтах различны, но в пределах одного района обычно сохраняются более или менее постоянными. Если мощность перекрывающих участков рыхлых отложений не превышает вертикальных размеров развитых в них вторичных ореолов, то последние выходят на дневную поверхность, т. е. являются открытыми. Максимальная мощность рыхлого чехла, при которой формируются открытые ореолы рассеяния, надежно выявляемые существующими поисковыми методами, называется критической мощностью. Как будет показано ниже, для черноземных степей характерна критическая мощность около 2,5—3 м, а например, для пустынь и полупустынь

со слабо развитыми почвами и активным эоловым перемещением рыхлого материала — всего 0,5—1,0 м.

На площадях поисков в самых разных районах мощность рыхлого чехла обычно изменчива и бывает и меньше, и больше критической. Зная характер распределения рыхлых отложений и их критическую мощность, можно выделить площади, в пределах которых могут быть встречены открытые ореолы рассеяния. Такие площади относятся нами к площадям категории I трудности ведения поисковых работ. Здесь представительными являются наиболее дешевые и скоростные поверхностные методы поисков — аэрометрический, автогаммасъемка, пешеходная  $\gamma$ -съемка, поверхностная люминесцентная съемка.

К категории II относятся площади с мощностью рыхлых отложений, немного большей, чем критическая (до 3—5 м). Здесь могут быть встречены сильно ослабленные у поверхности и неглубоко погребенные ореолы рассеяния. Представительными поисковыми методами являются шпуровая  $\gamma$ -съемка, эмалиционная съемка, отбор проб на люминесцентный анализ из кавав, закопушек и шпуров.

Поиски на площадях категории II ведутся по достаточному поисковому уровню, который проходит через верхние части ореолов рассеяния. Достижение этого уровня гильзам радиометров или отбор металлометрических проб на этом уровне является достаточным для уверенного обнаружения ореолов. Площадные размеры ореолов и их интенсивность на достаточном поисковом уровне обычно не являются максимальными, что в общем случае требует применения более плотной сети наблюдений, чем при поисках по представительному горизонту (см. гл. XV). Однако возможность использования в этом случае более дешевых и скоростных методов в экономическом отношении полностью компенсирует затраты, вызванные сгущением поисковых сетей.

Площади, относящиеся к более высоким категориям трудности поисков (III и IV категории), характеризуются большой мощностью рыхлых отложений, развитием погребенных и глубоко погребенных ореолов рассеяния и требуют применения глубинных поисков по представительному горизонту, описанных в гл. XV.

Соотношение площадей различных категорий в пределах разных ландшафтов неодинаково. Достаточно широко развиты площади категорий I и II, например, в горных районах и в тундрах. Здесь они составляют до 60—80% общей территории. В равнинных районах они занимают иногда лишь 10—20% территории.

Резервы площадей, где могут вестись поиски легко обнаруживаемых месторождений (также, как и контуры площадей поисков), устанавливаются путем районирования территорий в зависимости от условий ведения поисковых работ, которые осуществляются в различных масштабах. Соответствующие карты позволяют составить оптимальный комплекс представительных методов работ, а также оценить надежность результатов поисков. В описаниях к картам дается

применения того или иного поискового метода в данной ландшафтной и геологической обстановке, что зависит не только от мощности рыхлого покрова, но и от рельефа местности, ее доступности, особенностей геохимии рудных элементов в зоне гипергенеза и других природных факторов.

Ниже описываются некоторые особенности поисков легко открываемых месторождений в различных ландшафтных зонах.

## 1. ПОИСКИ В АРИДНОЙ ЗОНЕ

Аридная зона в пределах Советского Союза включает в себя полупустыни, сухие степи и типичные степи.

Особенности формирования вторичных ореолов рассеяния урановых месторождений в условиях этих ландшафтов имеют много общих черт, обусловленных дефицитом влаги, преобладанием испарения над выпадением осадков, господством непромывного режима почвенно-грунтовых вод и широким развитием невыщелоченных почвогрунтов. Благодаря этим особенностям аридных ландшафтов при мощности рыхлых отложений меньше критической отчетливые литохимические ореолы образуются непосредственно над рудными выходами урановых месторождений, что позволяет обнаруживать их всеми известными радиометрическими методами. В частности, именно в аридной зоне с наибольшим эффектом применяется аэrorадиометрический метод поисков.

При увеличении мощности рыхлых отложений размеры ореолов на поверхности быстро сокращаются, а интенсивность их ослабевает, и эффективность аэрометода резко падает. На смену аэропоискам в равнинных районах приходит автогамма-съемка, обладающая большими возможностями выделения слабых аномалий. В районах с сильно пересеченным рельефом аэрометод приходится заменять значительно менее производительным наземным  $\gamma$ -профиллированием. При этом  $\gamma$ -замеры производятся не только на поверхности, но и в пещерах и зондировочных скважинах.

Применение амапацционной съемки и биогеохимического метода на открытых участках (площади категории I) не дает преимуществ перед  $\gamma$ -съемками.

Менее выяснен вопрос относительно радиогидрохимического метода. Вследствие малой обводненности аридной зоны грунтовые воды имеют характер не сплошного бассейна, как это обычно имеет место в гумидных областях, а отдельных подземных водотоков, разобщенных крупными блоками необводненных пород. В этих условиях четкие гидрохимические ореолы могут образоваться лишь на месторождениях, расположенных на пути указанных водотоков. Следовательно, гидрохимический метод поисков хотя и может быть использован, но, по-видимому, с меньшей эффективностью, чем в гумидных условиях.

Общая засушливость аридной зоны предохраняет водные ореолы от быстрого разбавления, но в то же время резко сокращает число естественных водопунктов, а сильные колебания обводненности горных пород в различные времена года обуславливают изменчивость параметров гидрохимических ореолов (концентрация элементов в водах, протяженность ореолов и пр.). Это обстоятельство необходимо учитывать при интерпретации радиогидрохимических аномалий. Кроме указанного сходства ореолов урановых месторождений, расположенных в различных частях аридной зоны, им присущи

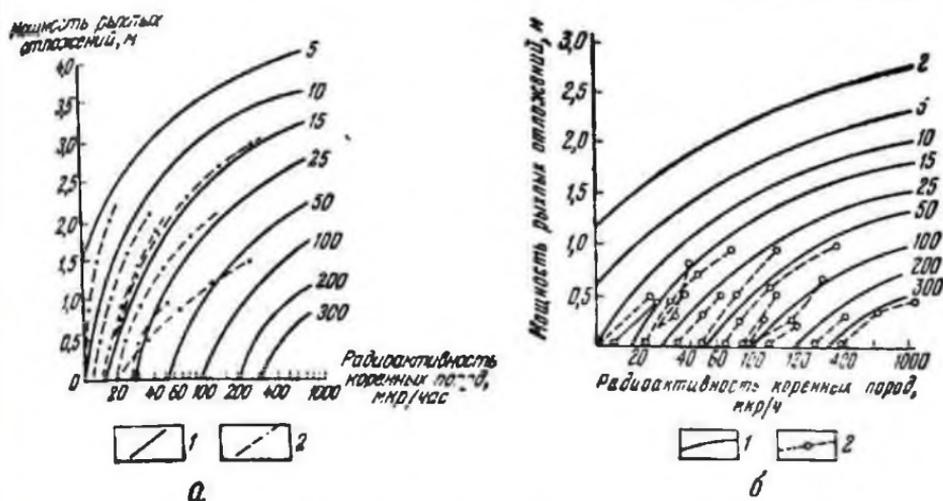


Рис. 85. Графики, показывающие экранирующее влияние рыхлых отложений

а — в типичной степи; б — в полупустыле

1 — расчетные кривые зависимости радиоактивности поверхности земли (в мкр/ч) от мощности рыхлых отложений, экранирующих месторождения; 2 — кривые, построенные по данным полевых измерений

некоторые особенности. Для типичных степей характерны черноземные почвы с мощным гумусовым слоем, глубина зоны промачивания здесь достигает 2—3 м. Это способствует развитию и сохранению ореолов в толще четвертичных отложений (главным образом покровных суглинков) мощностью до 2 м. В сухих же степях и пустынях критическая мощность рыхлых отложений уменьшается до 1 м (рис. 85), что обуславливается малой гумусовостью почв (сероземы), незначительной мощностью зоны промачивания (1—2 м) и недостаточной закрепленностью рыхлых отложений растительностью. Такое, казалось бы, небольшое различие в критической мощности в северных и южных областях аридной зоны приводит к важным и практическим последствиям — на юге почти всегда рассредоточены территории, где могут быть встречены открытые ореолы при той же средней мощности рыхлого покрова.

В некоторых областях наиболее распространено является мощность покрова, близкая к критической. Вследствие этого ореолы

месторождений у поверхности сокращаются в размерах и существенно ослабляются, что снижает возможности аэропоисков.

Вторая особенность, отличающая условия поисков в южных областях аридной зоны от более северных, — это сильная прогреваемость почв и пород на юге, что ведет к образованию большого числа несоляционных аномалий, не всегда связанных с рудами. Указанные аномалии формируются на участках с выпотным режимом почвенно-грунтовых вод. Если испаряющиеся грунтовые воды связаны с водами, омывающими рудные залежи, то образующиеся у поверхности вторичные минералы урана и ореол рассеивания позволяют выявить месторождение радиометрическими методами. В других случаях несоляционные накопления урана возникают вне связи с месторождениями, чаще всего на участках развития пород с повышенным содержанием легко выщелачиваемого урана. Вторичная минерализация во всех случаях обычно представлена легкорастворимыми минералами урана (шрекилгерит и др.). Критерии отличия рудных аномалий от аномалий, не связанных с рудами, изучены недостаточно.

Наряду с несоляционными образованиями для сухих степей и особенно пустынь характерны также инфильтрационные скопления урана. Последние могут образоваться как в обстановке, благоприятной для формирования соответствующих месторождений, так и в менее благоприятных условиях, например, в крутых тектонических трещинах. В последнем случае эти аккумуляции не имеют промышленного значения.

Наличие многочисленных несоляционных и инфильтрационных аномалий сильно затрудняет поиски, отвлекая внимание и средства на их проверку. Лишь дальнейшая разработка методики оценки этих аномалий по геохимическим, геологическим и другим признакам позволит быстрее и легче выделять заслуживающие внимания аккумуляции урана и тем самым повысить эффективность геологопоисковых и разведочных работ.

Наиболее благоприятной для поисков легко открываемых месторождений является степная полоса аридной зоны с маломощными рыхлыми отложениями, лежащими на мелкощебнистой коре выветривания коренных пород.

Методика поисков легко открываемых месторождений в районах степей и пустынь сравнительно хорошо известна; поэтому мы считаем необходимым остановиться лишь на основных положениях поисков эндогенных месторождений и подчеркнуть некоторые их особенности.

Поисковые работы обычно ставятся на больших площадях. В связи с этим на первом этапе целесообразно пользоваться наиболее скоростным методом опробования — аэрогадметрией. Внедрение новой аэрогамма-спектрометрической аппаратуры высокой чувствительности делает целесообразным перекрытие аэросъемкой площадей, на которых ранее работы проводились с аппаратурой без разделительных каналов.

Как правило, аэрогамма-съемка ставится до проведения специальных работ по районированию территории по условиям ведения поисков. При этом приходится считаться с тем, что какая-то часть засыпанной площади окажется перекрытой прерывистым чехлом отложений мощностью выше критической.

Основным масштабом аэропоисковых работ является 1 : 25 000. Более крупный масштаб (1 : 10 000), как показал опыт, целесообразно применять в специфических условиях, например на площадках, требующих быстрой и достаточно детальной оценки, но недоступных для автотранспорта, а также при детализации отдельных участков.

В перспективных районах, выявленных аэропоисками, может быть эффективно применена автогамма-съемка при условии достаточной проходимости и обнаженности территории. Для успешного проведения этих работ надо иметь карту условий ведения поисков в масштабе 1 : 100 000 — 1 : 50 000. Для повышения эффективности автомобильных поисков целесообразно вести их в более крупном масштабе (1 : 10 000), являющемся основным для этого метода.

Пешеходная  $\gamma$ -съемка применяется для детального изучения ограниченных по размерам участков, недоступных для автотранспорта. Масштаб ее варьирует от 1 : 10 000 до 1 : 2 000, причем наиболее крупный используется для проверки и детализации выявленных аномалий. С точки зрения достоверности получаемых геофизических данных пешеходная  $\gamma$ -съемка имеет преимущество перед всеми ранее описанными методами. Кроме того, эффективность ее существенно увеличивается благодаря возможности одновременно вести детальные геологические наблюдения.

На участках с прерывистым чехлом рыхлых отложений геофизические и геологические наблюдения на поверхности сопровождаются каротажем зондировочных скважин, пройденных специальными пробуривочными или самоходными установками (типа СВА-2, буростолбоставы). В полупустынных районах с чехлом рыхлых отложений мощностью немного превышающей критическую применяется плужная съемка.

Эманиационная съемка не имеет преимуществ перед пешеходной  $\gamma$ -съемкой, и ее целесообразно использовать лишь для определения природы радиоактивности выявленных аномалий.

Перечисленные методы являются основными при поисках уранового оруденения в аридной зоне. Разведка же выявляемых аномалий производится в зависимости от сложности геологической обстановки с помощью таких методов, как металлометрия, съемка, электроразведка в различных модификациях, разведка, детальная геологическая съемка, выработка и др.

В аридной зоне целесообразно вести поиски источников и колодцев, осуществляемые с помощью геофизической съемки и при массовых геологических исследованиях полезных ископаемых, в том числе

открыты раньше при хорошо поставленной проверке гидрохимических аномалий, которые нередко выявлялись задолго до обнаружения этих месторождений другими методами.

Эффективность поисков урановых месторождений в степных и пустынных районах определяется не только наличием легко устанавливаемых открытых ореолов, но и в значительной мере благоприятными условиями рельефа и доступностью местности. Преобладающий в этих районах равнинный рельеф позволяет вести аэрофотосъемку на небольших высотах, что значительно повышает их качество. Ни в какой другой ландшафтной зоне нельзя так широко применять автогаммасъемку. Проверка и оценка выявленных аномалий может производиться в наиболее короткие сроки в связи с благоприятными транспортными условиями и возможностью использования самоходных буровых установок.

## 2. ПОИСКИ В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ

Таежная зона занимает громадные пространства на севере и особенно на востоке Советского Союза. В ее пределах выделяются таежные ландшафты без мерзлоты, с островной мерзлотой и со сплошной многолетней мерзлотой.

Ниже рассматриваются особенности ореолов и выбор поисковых методов в различных частях таежной зоны.

В таежных областях со сплошной мерзлотой благодаря преобладанию физического выветривания руды и первичные ореолы могут выходить на поверхность, особенно на крутых и обнаженных склонах, вниз от которых плащеобразно или в виде узких полос часто спускаются осыпи рудных обломков. Площадь этих механических ореолов рассеяния может во много раз превышать размеры радиоактивных участков в коренных породах. Первичные урановые минералы, даже смолка, в обломках и глыбах иногда обнаруживают лишь едва заметные признаки окисления.

На более пологих склонах, покрытых мелкоземом, верхняя граница многолетней мерзлоты подходит близко к поверхности. Оттаивающий летом активный слой на южных склонах имеет мощность 1—1,5 м, на северных — несколько десятков сантиметров, на пологих участках возвышенностей — около 0,5 м. Моховой покров приближает верхнюю границу мерзлоты к дневной поверхности. Процессы выщелачивания протекают в основном лишь в активном слое, где и развиваются подзолистые выщелоченные почвы, причем степень подзолистости обычно возрастает на небольших возвышенностях и пологих склонах. При выщелачивании выходов урановых месторождений уран и радий выносятся, причем первый интенсивнее, чем второй. Процессы выщелачивания не способствуют образованию эпигейтических открытых ореолов даже в маломощном слое мелкозема. В рыхлом элювиально-делювиальном материале формируются механические ореолы за счет попадающих в него радиоактивных

обломков. В этом случае наибольшей радиоактивностью обладают крупные фракции, наименьшей — тонкая фракция. Критическая мощность покровных отложений составляет около 1 м. При меньшей мощности открытые радиоактивные ореолы могут быть обнаружены как над самым рудным участком, так и ниже него по склону, на расстоянии многих десятков м, возможно, первых сотен метров. Интенсивность этих ореолов вследствие отсутствия эпигенетической составляющей обычно низкая.

Радиоактивное излучение ореолов резко ослабляется насыщенным влагой моховым покровом. Обычны случаи, когда под влажным мхом с низкой  $\gamma$ -активностью обнаруживаются руды с активностью до сотен микрорентгенов в час. В северной тайге мохово-лишайниковый покров широко распространен в заболоченных депрессиях, на слабо дренируемых пологих склонах и водоразделах, что затрудняет поиски урановых месторождений.

Радиогидрохимические ореолы формируются в активном надмерзлотном слое и существуют лишь в течение короткого летнего периода. Подмерзлотные воды выходят на поверхность очень редко, поэтому вероятность формирования за их счет открытых гидрохимических ореолов ограничена. Ореолы в надмерзлотных водах имеют плащеобразный или ленточный характер, спускаясь по поверхности мерзлотного слоя вниз по склону. Если выход месторождения располагается в средней или нижней частях длинного склона, ореол сильно разбухивается за счет спускающихся сверху вод. Наиболее благоприятны для образования контрастных ореолов условия, когда они формируются на коротких склонах. Гидрохимические ореолы обычно не имеют самостоятельного значения при поисках, но они обуславливают образование радиоактивных аккумуляций в присклонных болотах. Факторы, способствующие образованию гидрохимических ореолов (короткие склоны, большая мощность оттаивающего слоя), одновременно благоприятны и для формирования присклонных аккумуляций урана. На рис. 86 показан ореол месторождения, расположенного на небольшой (относительная высота 15—20 м) возвышенности среди болот. Глубина залегания мерзлотного слоя летом около 1 м, почва — подзолистая. Большая протяженность ореола вдоль кромки болота свидетельствует о плащеобразном типе радиоактивных вод. Наряду с ураном в ореоле присутствуют радий и молибден.

В проточных болотах (торфяно-перегнойных) могут образовываться вытравленные потоки рассеяния в водотоке, дренирующем болото. Однако этот случай характерен для более южных районов.

В растительном покрове, расположенном на плоских участках, описанных литохимических и гидрохимических ореолов. Однако биохимического метода в этих условиях нецелесообразна. Система растений не проникает в глубинные возможности метода здесь. Целесообразно также широкое применение гидрохимического

ского метода, поскольку он не имеет преимуществ перед методами, основанными на выявлении литохимических ореолов. В данных условиях малоэффективна и эманацционная съемка вследствие близкого к поверхности залегания мерзлоты и сильной обводненности оттаивающего слоя. Применению автогамма-съемки в тайге невозможно вследствие недоступности местности для автомобилей. Таким образом, ведущими методами здесь должны быть аэроадиометрическая и пешеходная  $\gamma$ -съемки.



Рис. 86. Аккумуляция урана в присклоновых болотах вблизи месторождения в таежной зоне с мерзлотой

1 — болото; 2 — граница болота; 3 — изогипсы возвышенности; 4 — рудные тела; 5 — вторичные аккумуляции урана в прилегающем болоте

Аэрометодом успешно обнаруживаются открытые механические ореолы, особенно на каменистых участках. С меньшей определенностью выявляются солевые ореолы в присклоновых болотах вследствие сдвига равновесия в сторону урана и частого экранирования ореолов верхним слоем мхов и торфяников. Возможности аэрогамма-съемки ограничиваются широким распространением верховых и низинных болот, занимающих до 30% рассматриваемой территории.

Наземные мелкомасштабные работы в данных условиях имеют смысл проводить методом донных осадков. Однако для крупных масштабов возможности этого метода пока еще не выяснены.

Пешеходная  $\gamma$ -съемка может дать эффект в вариантах поверхностной съемки на площадях категории I и  $\gamma$ -шпуровой съемки на площадях категории II. Там, где лишайники экранируют коренные породы, перед  $\gamma$ -замерами необходимо их удалить в точках наблюдения, по возможности, обнажив коренные породы. Возвышенные участки и краевые части болот должны охватываться  $\gamma$ -профиллированием.

Следует подчеркнуть, что в рассматриваемой ландшафтной зоне, если не учитывать условий проходимости местности, оценка выявленных аномалий в общем случае проще, чем в аридной зоне. Это объясняется тем, что мерзлота предохраняет руды и ореолы от выветривания, консервируя их у самой поверхности.

В областях развития островной мерзлоты общая мощность оттаивающего слоя, в пределах которого может происходить выщелачивание и перенос рудного материала, увеличивается. Вследствие этого приповерхностное обеднение руд и ореолов в коренных породах усиливается, проникая на большую глубину.

Таким образом, в направлении от северных к более южным районам проявляется тенденция обеднения ореолов на выходах месторождений, но вместе с тем увеличивается возможность образования масса рудных компонентов, заключенных во вторичных ореолах, как бы смещается от выходов месторождений, расположенных на автопомных ландшафтах (возвышенностях), на подчиненные ландшафты (депрессии рельефа).

Появление таликов, преимущественно на склонах южной экспозиции, обуславливает выход подмерзлотных вод на поверхность. Следовательно, открытые гидрохимические ореолы здесь уже не ограничиваются тонким надмерзлотным слоем. Поисковое значение их увеличивается еще и тем, что при прочих равных условиях подмерзлотные воды чаще выходят на поверхность по тектоническим нарушениям, которые могут быть рудоносными. Все это создает благоприятные предпосылки для применения гидрохимического метода с использованием его глубинности, а также метода дольных осадков и биогеохимического, особенно на участках, характеризующихся отсутствием или глубоким залеганием многолетней мерзлоты. Использование указанных методов позволяет осуществлять общую оценку ураноносности больших территорий. Возможности широкого применения эманационного метода ограничены теми же условиями, что и в зоне развития сплошной мерзлоты. Ведущими методами остаются аэрогазохимический и нешходная  $\gamma$ -съемка в двух вариантах. В связи с выщелачиванием выходов и смещением ореолов возможности выявления аномалий непосредственно на рудами уменьшаются. Соответственно возрастают трудности геогравиметрической интерпретации и оценки обнаруживаемых ореолов.

В таежных районах без мерзлоты на склонах часто обнаруживаются признаки остепенения и невыщелоченные почвы, в которых ореолы имеют особенности, что и в описанной выше степной зоне. Участки южных склонов иногда располагаются под многолетней мерзлотой, но развитой на северных склонах может служить Забайкалье с остепенением на южных склонах сопок и затаяженными северными склонами. Мерзлотой. «Солонпки» обычно лишены древесной растительности, покров

рыхлых отложений здесь маломощный, почвы щебенчатые скелетные. На северных склонах рыхлые отложения более мощные, почвы суглинистые, нижние части склонов заболочены.

На Дальнем Востоке и в некоторых других районах ландшафты менее контрастны. Здесь мезо- и микрорельеф и экспозиция склонов имеют меньшее значение для распределения почв и растительности. Решающую роль играют климатическая зональность, а также близость моря, обуславливающая более влажный климат. Наиболее широко развиты в этих районах выщелоченные почвы подзолистого типа, формирующиеся в условиях промывного режима почвенно-грунтовых вод. Отсутствие мерзлоты позволяет выпавшим осадкам быстрее проникать в породы, вынося уран и другие элементы с грунтовыми водами преимущественно трещинного типа. Этим, в частности, объясняется меньшая, чем в северной тайге, общая заболоченность поверхности, особенно водоразделов и склонов, несмотря на почти вдвое большее количество осадков. Болота в этой зоне приурочены преимущественно к местам разгрузки грунтовых вод — речным долинам и озерным впадинам.

Промывной тип режима почвенно-грунтовых вод обуславливает выщелачивание выходов урановых месторождений, особенно в приповерхностном слое. Достаточно хорошо сохраняются лишь устойчивые в гипергенных условиях руды и ореолы. Большая водообильность пород способствует быстрому разубоживанию гидрохимических ореолов. Поэтому, несмотря на возможность сравнительно дальнего переноса рудных компонентов водами, гидрохимические ореолы здесь обнаруживаются с трудом вследствие их малой контрастности.

Лишь при достаточной изоляции подземных потоков, проходящих через месторождение, могут сформироваться отчетливые гидрохимические ореолы. Эта изоляция может быть обусловлена тектоническими нарушениями в ветрециноватых породах или значительной автономностью водосборной площади участка месторождения.

Условия для образования в южной тайге аккумуляции урана в потоках рассеяния еще более благоприятны, чем в тайге с островной мерзлотой. Наряду с этим возрастает возможность образования аккумуляции рудных элементов в подчиненных ландшафтах за счет пород с повышенной радиоактивностью (солевые ореолы и потоки рассеяния гранитов и других кислых и щелочных пород), что затрудняет интерпретацию выявленных аномалий.

Степень подзолистости почв южной тайги неравномерна. В некоторых случаях она возрастает с севера на юг, при переходе от преимущественно сосновых лесов на дровяных и песчаных почвообразующих породах к темнохвойным еловым лесам, растущим на менее водопровищаемых суглинках. В последних чаще проявляется оглеение почв, обусловленное восстановительной обстановкой. В глеевых и оглеенных почвах, имеющих обычно сизый оттенок, уран может сохраняться вблизи поверхности под тонким слоем интенсивно выщелоченных подзолистых почв и мхов.

Таким образом, участки и районы распространения темнохвойной тайги малоблагоприятны для обнаружения ореолов урановых месторождений с поверхности. Более удобны в этом отношении площади развития светлых хвойных лесов (сосна, лиственница) и иногда лиственных (дуб в горных районах). Указанные леса растут на слабо подзолистых песчаных, каменистых скелетных почвах и обычно приурочены к поясам горных хребтов. Заболачивание здесь меньше, промывание и выщелачивание грунтов происходит на большую глубину, чем под темной тайгой, но менее интенсивно у самой поверхности. Поэтому подзолистый горизонт почв здесь менее выражен.

В южной тайге наряду с чисто подзолистым процессом во многих, особенно более теплых районах в той или иной степени проявляется дерновый процесс. Последний обусловлен воздействием травяной растительности, которая внедряется под лесной полог при его разрежении и осветлении. Под дерновым гумусовым слоем могут проявляться и подзолистые почвы. Геохимия урана и радия в таких почвах практически не изучена. Травяной покров затрудняет поиски, маскируя выходы пород и руд. Наиболее широкое развитие дерново-подзолистые высокогумусные почвы имеют на Дальнем Востоке, где они формируются на глинистых и суглинистых рыхлых отложениях мощностью 1—3 м.

Рассмотренные особенности южной тайги увеличивают трудности обнаружения месторождений по ореолам, расположенным непосредственно над рудами, и расширяют возможности поисковых методов, основанных на выявлении смещенных и оторванных ореолов (ореолы в делювиальных шлейфах, потоки рассеяния, аккумуляция в присклоновых болотах, гидрхимические ореолы). Одновременно возрастают трудности интерпретации выявленных аномалий вследствие дальнего сноса рудных элементов от месторождений и образования солевых аккумуляций урана.

На ранних этапах поисков в южной тайге следует считать обязательным применение аэрометрического метода. По-видимому, большой эффект он может быть в светлой тайге и меньший — в темнохвойной. Для общей оценки рудности района рекомендуются также поиски по потокам рассеяния и присклоновым аккумуляциям. Для этой цели применим и гидрохимический метод. Эмпазионная съемка может быть использована здесь только на верхних частях склонов и водоразделах при условии малой влажности горных пород. Основным наземным поисковым методом в этих условиях является пешеходная  $\gamma$ -съемка по поверхности и в варианте склоновой съемки. Этим методом в таежных районах могут быть обследованы площади категории I и II, составляющие обширные общие площади.

В комплексе с другими методами (в отдаленных районах зимой или в каменных развалах) может быть применен геохимический метод, возможности которого в настоящее время не реализованы в наибольшей мере.

Поиски урановых месторождений в таежной зоне проводятся этапами. Первоначально ведутся попутные геолого-радиометрические работы при составлении геологической карты масштаба 1 : 200 000. В этот период в основном применяются пешеходная маршрутная  $\gamma$ -съемка, метод донных осадков по речной сети и опробование водопунктов. В результате проведения указанных работ уточняются прогнозы и намечаются перспективные площади для последующих исследований. В отдельных районах возможно попутное обнаружение рудопроявлений и месторождений урана.

Затем выделенные перспективные площади покрываются комплексной аэрогамма-съемкой, включающей аэромагнитные и аэро-радиометрические наблюдения с широким использованием данных аэрофотосъемки.

Аэроадиометрические работы сопровождаются проверкой выявленных аномалий. В труднодоступных районах иногда используются вертолеты как для геофизических работ, так и для переброски геологических отрядов и оборудования. Основным масштабом аэро-радиометрических работ является 1 : 25 000, а в некоторых слабо изученных районах — 1 : 50 000. В результате работ второго этапа уточняются границы перспективных площадей и выявляются отдельные рудопроявления и месторождения урана.

В дальнейшем производится детальное геологическое изучение наиболее перспективных площадей с целью оконтуривания рудных полей и выявления большей части легко открываемых рудопоявлений и месторождений урана. Эти работы включают пешеходную  $\gamma$ -съемку в масштабе 1 : 25 000—1 : 10 000, выполняемую одновременно с геологическим картированием, изучение донных осадков гидросети и гидрохимическое опробование имеющихся в районе источников.

Детальные поисковые работы проводятся в пределах рудных полей. В зависимости от размеров и сложности ожидаемых месторождений масштаб поисков изменяется от 1 : 10 000 до 1 : 2 000. При этом большое значение придается шпуровой  $\gamma$ -съемке на площадях, закрытых мхом, болотами и маломощными рыхлыми отложениями, а также пешеходной  $\gamma$ -съемке. Эманиационная съемка применяется на выборочных участках и для определения природы радиоактивности. При геологическом картировании широко используются наземная магнитометрия и электроразведка.

Методика поисков в отдельных районах уточняется с учетом их биоклиматических особенностей, оказывающих большое влияние на эффективность отдельных поисковых методов. Так, в зоне сплошной мерзлоты эманиационная съемка дает хорошие результаты только в августе, тогда как в безмерзлотных районах ее применение возможно на протяжении почти всего полевого сезона. Метод донных осадков более эффективен в районах с островной мерзлотой, где он применяется на всех этапах поисков в масштабах от 1 : 200 000 до 1 : 25 000. Интерпретация выявленных аномалий, как отмечалось выше, усложняется при переходе от северной тайги к южной. Соот-

ответственно должен быть увеличен объем наземных геолого-геофизических и горно-буровых работ, необходимых для их расшифровки.

Повышение эффективности поисков в таежной зоне может быть обеспечено при условии проведения следующих мероприятий:

1) обязательное покрытие перспективных площадей геологической съемкой масштаба 1 : 100 000 и крупнее для обеспечения более надежного прогнозирования уранового оруденения;

2) усовершенствование аэрогамма-съемки применительно к специфическим условиям тайги;

3) детальное изучение условий формирования ореолов и потоков рассеяния урана и его спутников в горно-таежных ландшафтах и разработка на этой основе надежных геохимических критериев классификации и оценки выявляемых, в том числе и слабых, аномалий и рудопроявлений;

4) районирование территорий по условиям поисков;

5) создание высокопроизводительных и легкотранспортируемых технических средств для изучения аномалий в обломочном материале и вскрытия рудных выходов;

6) более широкое применение при поисках вертолетов, а также методов общей геофизики;

7) соблюдение этапности работ (табл. 31).

### 3. ПОИСКИ В ДРУГИХ ЛАНДШАФТНЫХ ЗОНАХ

В этом разделе вкратце рассмотрим особенности поисков урана в лесостепной зоне и в тундре. В высокогорных районах целесообразно проводить специальные поиски из-за их труднодоступности. Эти районы должны рассматриваться как объект попутных поисков, осуществляемых в процессе геологической съемки.

В лесостепной зоне обычно формируются отчетливо выраженные потоки рассеяния рудных элементов протяженностью до сотен и тысяч метров (рис. 87). По-видимому, в лесостепях имеются наиболее благоприятные условия для их образования по сравнению с областями, лежащими к северу и особенно к югу от этой зоны. Иногда аккумуляция в гумусированных донных осадках рек и стариц приобретает такие масштабы, что представляют самостоятельный промышленный интерес.

Лесостепи представляют собой переходный тип ландшафта на участках, занятых лесами (чаще всего на водоразделах), формируются серые подзолистые почвы, в степях — выщелоченные. Здесь довольно значительное количество осадков и частое переменное увлажнение почво-грунтов и частые колебания уровня грунтовых вод на участках с малогумусными почвами благоприятствуют выщелачиванию урана из сравнительно богатых им пород и выноса его в форме карбонатного раствора в долины. В то же время гумусированные почвы рек и озер

Схема последовательности и содержание работ при поисках uraniumых месторождений в горно-таежном районе  
(по Ю. В. Шаркову, А. С. Миллеву, Н. С. Райкову)

Виды работ	Пунктовые сети	Назначение и условия применения методов	Представленные материалы	Примечания
1	2	3	4	5

### Подготовка площадей

Сбор, обобщение и анализ сведений по геологии, геоморфологии, четвертичным отложениям, радиометрии, общей геофизике, геохимии		<p>Выделение площадей для постановки поисков масштаба 1:25 000</p> <p>Подготовительные камеральные работы</p> <p>Работы ведутся с целью освещения геологической изученности, перспективности, опоскованности и условий ведения поисковых работ</p>	<p>Карта изученности территории</p> <p>Геологическая карта</p> <p>Карта радиоактивности поверхности (аэро-радиометрическая, пешеходной у-съемки, аэра-ционной съемки)</p> <p>Геохимические карты (металлометрическая, гидрохимическая, карта донных осадков)</p> <p>Карта мощностей и состава рыхлых отложений, с выделением площадей развития кор выветривания</p> <p>Геоморфологическая карта</p> <p>Карта ра</p>	<p>Данные различной детальности разных источников сводятся на карты масштаба 1:100 000. Карты сопровождаются пояснительными записками, отражающими источник материала, оценку его достоверности, заключение о степени изученности территории, ее перспективности и условиях ведения и ее пределах поисковых работ. В дальнейшем, по мере получения дополнительного материала, указанные карты уточняются</p>
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Геологические маршруты, сопровождаемые пешеходной и шпуровой у-съемками</li> <li>2. Электропрофильрование (симметричное и дипольное)</li> <li>3. ВЭЗ (выборочно)</li> <li>4. Гидрохимический * и метод донных осадков</li> <li>5. Металлометрия *</li> <li>6. Шурфы (до 2—5 м), закопушки, капавы</li> </ol>	<p>По профилям через 1—4 км</p> <p>По профилям через 2—4 км</p> <p>2—4 км × 500 м</p> <p>Через 200—250 м (по водотокам)</p> <p>1—4 км × 100 м</p>	<p>Полевые работы рекогносцировочные</p> <p>Сбор дополнительных сведений по геологическому строению площади и для специальной характеристики пород</p> <p>Получение основных данных по закономерностям распространения на площади рыхлых образований, необходимых для составления схематической карты условий ведения поисковых работ</p> <p>Озлакомление с имеющимися на площади рудными участками</p> <p>Геологические, геофизические и геохимические наблюдения производятся по просекам</p>	<p>Карта ΔZ</p> <p>Карта известной рудности</p> <p>Таблица физических свойств пород и руд</p> <p>Геологические разрезы по маршрутам с описанием коренных пород, состава и мощности рыхлых отложений</p> <p>Электроразведочные профили</p> <p>Геохимическая характеристика пород и рыхлых образований и их физические свойства</p> <p>Уточненные контуры поисковых площадей</p> <p>Уточненные карты мощностей и состава рыхлых отложений, кор выветривания</p> <p>Схематическая карта условий ведения поисковых работ масштаба 1:50 000</p>	<p>Объемы полевых работ по подготовке площадей к поискам предусматриваются проектом работ на предстоящий сезон</p> <p>Схематическая карта условий ведения поисков является основой для выбора методики поисков и проектирования объемов поисковых работ</p>
		<p><b>Специальные поиски</b></p> <p>Выделение площадей для детальных поисков масштаба 1:2 000—1:5 000</p>		

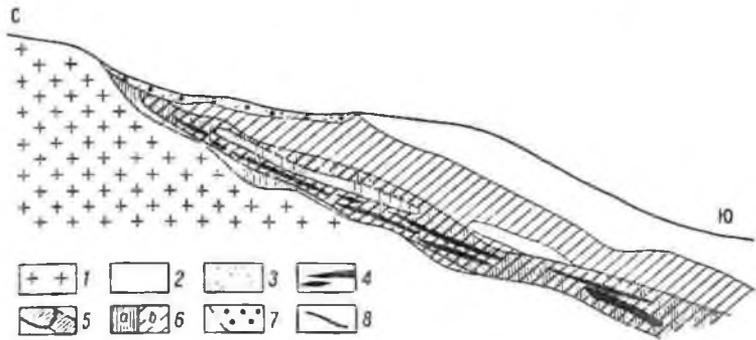
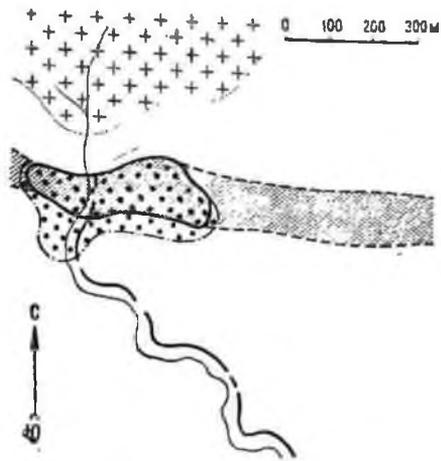
\* Указано, если к началу поисков они проведены качественно с необходимой детальностью.

Виды работ	1	Поисковые сети	2	Наименование и условия применения методов	3	Представительные материалы	4	5	Примечания
1. Магниторазведка *									
2. Электроразведка *									
3. Геологические наблюдения									
4. Пешеходная γ-съёмка (с прорубкой профилей)									
5. Шпуровая γ-съёмка (с прорубкой профилей)									
6. Шурфы (до 2—5 м)									

\* Указанные работы не проводились, если в начале поисков они приводились как обязательные с необходимой детализацией.

способствуют аккумуляции урана. Этим и объясняется отмеченное выше широкое развитие потоков рассеяния. Они выявляются довольно просто, но интерпретация их затруднена из-за большой протяженности путей миграции урана.

Рис. 37. Схема ореолов и потоков рассеяния на пластовом месторождении в лесостепной зоне (план и разрез)  
 1 — граниты; 2 — эффузивно-осадочная толща (МЗ); 3 — четвертичные алювиально-делювиальные отложения; 4 — рудные тела; 5 — ореолы урана в коренных породах. Путем стрел на плане показана часть ореола, выходящего на аэрированную поверхность; 6 — ореолы урана (а) и мышьяка (б) в коренных породах (на разрезе); 7 — ореолы урана в четвертичных алювиально-делювиальных отложениях; 8 — поток рассеяния урана в дождевых осадках



- |   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 5 | 6 | 7 | 8 |

Склоны возвышенностей в лесостепной зоне обычно бывают покрыты чехлом рыхлых отложений. Наиболее обнаженными являются водоразделы и места полосы приречного мелкосопочья. На этих участках возможно обнаружение месторождений урана по остаточным урановым и особенно радиевым воздушным и наземным  $\gamma$ -методами. Поисковые работы в лесостепной зоне по сравнению с таежной облегчаются из-за большей открытости и проходимости местности.

Для обнаружения урановых месторождений в лесостепной зоне может быть применен широкий комплекс поисковых методов: геохимический, радиометрические поиски, пешеходная и авиационная радиометрическая, геохимическая, геохимическая, гидрохимический, биогеохимический и др. методы. В лесостепной зоне наиболее перспективны радиометрические и геохимические методы. Радиометрические поиски в лесостепной зоне наиболее перспективны ввиду того, что в лесостепной зоне наиболее распространены радиоактивные осадки.

Эффективность поисков в лесостепных районах близка к эффективности работ в аридной зоне, т. е. довольно высока.

Тупдровые ландшафты характеризуются более широким, чем в тайге, развитием мхов и лишайников, близостью к поверхности мерзлых пород, большой увлажненностью почвогрунтов, вызванной слабым испарением атмосферных осадков и водонепроницаемостью мерзлых пород. Почвы в тундре в основном глеевые, слабо подзолистые с малым гумусовым слоем (2—5 см). На каменистых возвышенностях они практически отсутствуют. Выступы рельефа обычно изобилуют обломками пород, почти не подвергшихся окислению. Склоны покрыты мелкоземом и обломками пород в различных пропорциях.

Характер почв, наличие мерзлоты, малая активность химических процессов способствуют сохранению руд и ореолов у самой поверхности. Образование открытых ореолов способствует вертикальное перемещение («кппеппе»), грунтов в активном слое под влиянием процессов пучения, солифлюкции, вымораживания камней, набухания коллоидов. Солифлюкция также растягивает ореолы по склонам. Поискам мешает распространение мхов и лишайников, насыщенных водой, экранирующих радиационные ореолы. На участках, лишенных мохового покрова, обнаружение месторождений возможно при поисках на поверхности.

Из вышеприведенного следует, что в тундровой зоне могут применяться принципиально те же поисковые методы, что и в северной тайге; в первую очередь должен быть использован аэрометод, особенно на обнаженных площадях и на участках развития щебнистых почв с разреженным покровом мхов и лишайников. Благодаря отсутствию древесной растительности тундра более доступна для поисков, чем тайга.

Применение в тундровых районах аэрационного и биогеохимического методов практически не имеет смысла. Ведущими методами, кроме аэропоисков, являются различные варианты наземной  $\gamma$ -съемки.

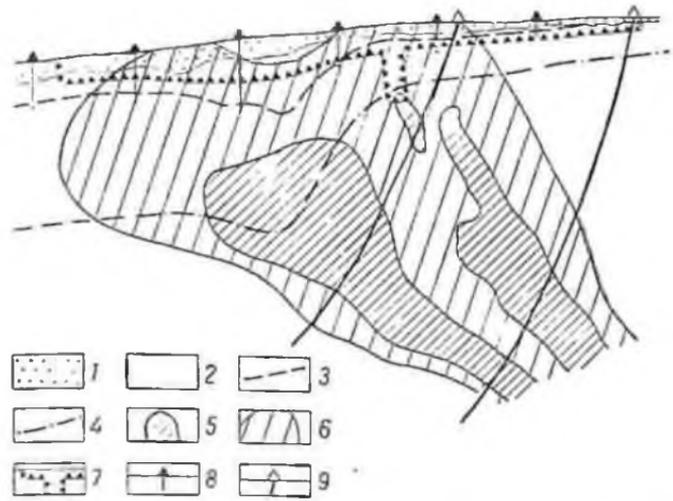
#### 4. ОЦЕНКА ВЫЯВЛЕННЫХ АНОМАЛИЙ

Своевременная и правильная оценка аномалий в процессе геолого-поисковых работ позволяет избежать нерационального расходования средств и ускорить промышленное освоение выявленных объектов. Основной задачей оценки аномалий является установление целесообразности постановки на ней разведочных работ. С этой целью на аномалиях проводится комплекс исследований, позволяющий определить:

- 1) площадные размеры и интенсивность аномалии;
- 2) геологическую позицию аномального участка;
- 3) пространственную и генетическую связь аномалии с коренным источником радиоактивных элементов;
- 4) геологическое строение рудного участка;

- 5) генетический тип, минеральный и элементарный состав руд в зоне окисления (на выходах);
- 6) размеры и морфологические особенности рудных тел на выходах;
- 7) ориентировочные масштабы оруденения.

На основании полученных данных с учетом современных требований промышленности к масштабам месторождений и качеству руд участок либо передается в разведку, либо обосновывается прекращение на нем дальнейших работ.



**Рис. 83.** Оценка аномалий, обнаруженной непосредственно над рудными телами месторождения  
 1 — четвертичные покровные суглинки; 2 — коренные породы; 3 — нижняя граница глинистой коры выветривания; 4 — нижняя граница окисленных пород и руд; 5 — руды месторождений; 6 — ореолы рассеяния; 7 — каналы с шурфом; 8 — скважины зондировочного бурения; 9 — скважины колонкового бурения

Ниже на нескольких примерах рассматриваются некоторые особенности оценки аномалий, недостаточно освещенные в предыдущих главах, посвященных отдельным поисковым методам.

В степных и полупустынных районах с выравненным рельефом и сохранившейся площадной корой выветривания выявление турбуные с поверхности аномалий, связанные преимущественно с гидротермальными и осадочно-метаморфогенными процессами урана, первоначально вскрываются одной или несколькими аномалиями (в максимуме активности и на флангах). В условиях боковой сдвиг ореолов обычно выполняются канавы, пройденными до щебнистой коры. Это позволяет быстро установить связь аномалий с коренными породами. Канавы позволяют также изучить литологические и структурные особенности

ности этих пород, характер изменения радиоактивности с глубиной, выявить элементы-спутники урана и ориентировочно (по данным спектрального анализа и минералогическим признакам) установить генетический тип руд.

Дальнейшую оценку перспективности выявленного оруденения главным образом с точки зрения его размеров целесообразно проводить с помощью мелкого зондировочного бурения. При этом за основу берутся замеры  $\gamma$ -активности на забое скважины под слоем четвертичных отложений и выщелоченной глинистой части коры выветривания. Здесь на уровне щебенистой коры, как указывалось выше, радиоактивные элементы и их полезные спутники сохраняются. Концентрация их несколько уменьшается по сравнению с более глубокими частями месторождений, площадь оруденелой зоны увеличивается, количество же металла в ореоле (на единицу углубки) остается примерно таким же, как в черневых и смолковых рудах. Об этом свидетельствуют построенные для ряда месторождений кривые изменения ширины рудной зоны, средней концентрации в ней рудного компонента и продуктивности рудных тел с глубиной. Количество рудного элемента на уровне щебенистой коры может быть ориентировочно подсчитано по единичному профилю (произведение ширины рудной зоны по профилю на среднее содержание рудного элемента за вычетом местного натурального фона) или для всей аномальной площади по формуле

$$P = S(C - C_{\phi}),$$

где  $S$  — площадь ореола на уровне щебенистой коры выветривания;  
 $C$  — среднее содержание элемента в ореоле;  
 $C_{\phi}$  — фоновое содержание элемента за пределами ореола.

После завершения работ на уровне щебенистой коры выветривания (окопирование аномалии, расчет количества рудного компонента, установление состава и концентрации полезных элементов-спутников по отдельным скважинам, установление геологоструктурного контроля оруденения) при обнаживающихся данных рудную зону прослеживают шурфами и подсекают единичными наклонными скважинами колонкового бурения. Это дает возможность убедиться в распространении оруденения на глубину. Умножая количество металла, определенное для уровня щебенистой коры выветривания, на ожидаемую глубину оруденения, можно ориентировочно определить возможные масштабы месторождения.

При оценке аномалий, особенно при определении примерных масштабов оруденения, следует иметь в виду возможность ошибок, вызываемых рядом причин, из которых наиболее важными являются: 1) неравномерность оруденения на различных уровнях, обусловленная первичными особенностями морфологии рудных тел и концентрации в них металла; 2) неравномерность оруденения на различной глубине, обусловленная гипергенными процессами.

Особо следует подчеркнуть важность учета явлений вторичного обогащения урановых месторождений, которые изучены еще весьма слабо.

Ошибки в оценке аномалий могут быть вызваны также нарушением радиоактивного равновесия на уровне щебенистой коры выветривания. Это вынуждает проводить контрольные определения содержания урана в металлотрических пробах, выборочно взятых с забоя отдельных скважин, и при необходимости вводить поправочный коэффициент.

При поисках гидротермальных месторождений в неравнинных районах часто наблюдается боковое приповерхностное смещение ореолов, вызывающее дополнительные трудности в обнаружении

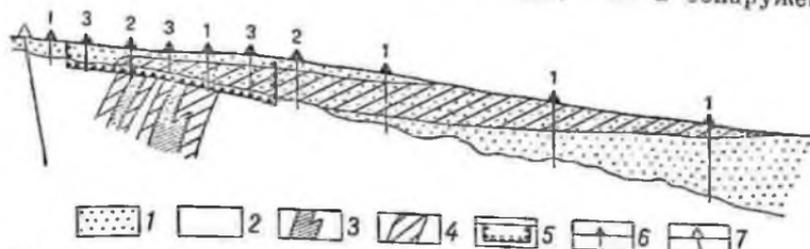


Рис. 89. Оценка аномалий, обусловленной механическим ореолом рассеяния на склоне

1 — элювиально-делювиальные отложения; 2 — коренные породы; 3 — руды; 4 — ореолы рассеяния; 5 — канавы; 6 — скважины зондировочного бурения или шпуровой гамма-съёмки (цифры соответствуют очереди заложения скважины); 7 — скважина колонкового бурения

коренного источника рудных элементов и определения ориентировки рудных зон. Оценка аномалий затрудняется отсутствием надежных критериев, позволяющих по оторванным и смещенным ореолам судить о характере коренного источника. Поэтому при наличии благоприятных геологических предпосылок необходимы детальные поиски на прилегающих склонах. Ниже рассмотрены примеры таких работ. Оценка оруденения, установленного в коренных породах, производится по описанной выше схеме.

На рис. 89 показан механический ореол в элювиально-делювиальных отложениях, образовавшийся за счет эродируемого месторождения в условиях пересеченного рельефа. Открытой является лишь нижняя часть ореола, доступная для обнаружения восточными поисковыми методами. Оконтуривание и изучение приходится вести с помощью канав или мелких бурений, прослеживая погребенную его часть вверх по склону к источнику. Изучение состава рыхлых отложений склона может помочь установить главное направление рассеяния рудного вещества и сэкономить средства на горных выработках. Поисковые профили на склонах, лучше задавать вдоль горизонталей. Масштабы в масштабах 1 : 10 000—1 : 5 000.

На рис. 90 приведен пример, когда в аридных условиях на поверхность выходит радиогидрохимический ореол (или испарительная аккумуляция урана у выхода урансодержащих вод на поверхность — шрекингеритовая аномалия). Коренной источник урана перекрыт

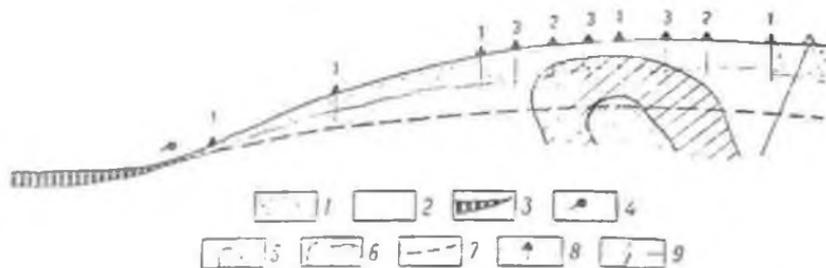


Рис. 90. Оценка радиогидрохимической аномалии

1 — покрывные туфы; 2 — коренные породы; 3 — солончак; 4 — разнородный источник; 5 — руды; 6 — литохимические среды рассеяния; 7 — уровень грунтовых вод; 8 — скважины зондировочного бурения (цифры соответствуют очереди заложения скважины); 9 — скважина колонкового бурения

чением рыхлых отложений и не обнаруживается при поисках поверхностными методами. Для оценки аномалии необходимо обследовать прилегающий к ней склон. Прослеживание скважинами

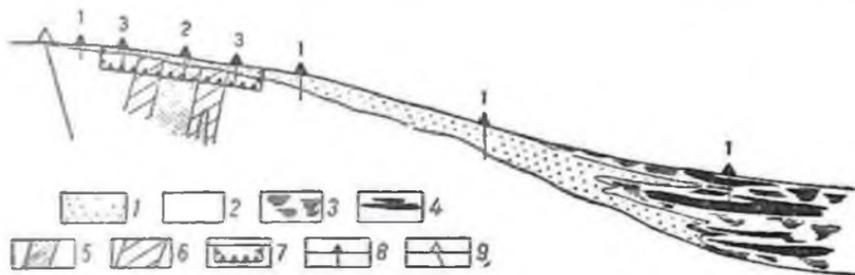


Рис. 91. Оценка аномалии в прислоповых торфяниках

1 — алюмосиликатно-делювиальные отложения; 2 — коренные породы; 3 — прислоповые торфяники; 4 — аккумуляция урана в торфяниках; 5 — рудное тело; 6 — ореолы рассеяния; 7 — шахты; 8 — скважины зондировочного бурения или 4-шпуровой съемки (цифры соответствуют очереди заложения скважины); 9 — скважина колонкового бурения

подземного гидрохимического ореола ввиду относительно глубокого залегания вод нецелесообразно. Рациональнее провести детальные поиски с помощью зондировочного бурения. Изучение трещиноватости пород на обнаженных участках склона, геоморфологии местности позволяет предположить направление движения грунтовых вод к аномальному водопункту и экономно расположить точки наблюдений. Учитывая, что размеры радиогидрохимических ореолов обычно не превышает первых сотен метров, детальные работы достаточно производить в полосе склона над аномалией шириной до 0,5 км. Если проведенные работы не обнаружат оруденения у поверхности

коренных пород, а геохимические особенности аномалии (наличие в водах или в испарительных аккумуляциях U, Ra, Th, нерадиоактивных элементов-спутников, характерных для эндогенных руд и пр.), являются благоприятными, поиски следует распространять на большую глубину с расчетом выявления слепых рудных тел. Эти работы, естественно, должны сопровождаться детальным геологоструктурным изучением участка. При отсутствии указанных геохимических и других благоприятных признаков работы на аномальном участке прекращаются.

На рис. 91 показан случай, типичный для таежной зоны с мерзлотой. Аккумуляции урана обнаруживаются в присклоновых торфяниках. Выход коренного источника (урановые руды или повышенно радиоактивные породы) перекрыт рыхлыми отложениями и выщелоченными почвами. Обследованию подлежит прилегающий к торфяникам участок склона. Учитывая неглубокое залегание мерзлоты, возможно применение шпуровой  $\gamma$ -съемки. В противоположность предшествующему случаю, анализ геоморфологии участка позволяет с большей определенностью установить направление движения обусловивших аномалию надмерзлотных вод, зависящее от деталей современного рельефа. В случае обнаружения оруденения в коренных породах следует иметь в виду, что в гумидных районах радиоактивное равновесие у поверхности резко смещается в сторону радия. Уран бывает сильно выщелочен, особенно на месторождениях, представленных неустойчивыми рудами. Поэтому при оценке коренного оруденения иногда приходится прибегать к проходке шурфов и бурению скважин в коренных породах уже на самых ранних стадиях работ. Оконтуривание аномальной площади под напосами остается необходимым.

Во всех указанных случаях методы поисков должны выбираться в соответствии с мощностью и характером покрывающих склоны отложений. В процессе работ составляются схематические карточки рыхлых образований, позволяющие судить о надежности проведенных работ. На карточках показываются размещение и глубина скважин, шуров и канав.

# ПОИСКИ НЕ ВСКРЫТЫХ ЭРОЗИЕЙ (СЛЕПЫХ) ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

## I. ОБЪЕКТЫ И ЗАДАЧИ ПОИСКОВ

На всех известных в настоящее время эндогенных месторождений урана объектами специальных поисков, рассматриваемых в настоящей главе, могут быть лишь не затронутые эрозией гидротермальные месторождения и рудные тела. Поиски не вскрытых эрозией пегматитовых и скариевых месторождений урана пока не являются актуальными.

Количество слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях в зависимости от характера рудовмещающих структур, глубины эрозионного среза, размеров рудных тел по вертикали и ряда других факторов колеблется в больших пределах.

Теоретические расчеты и практические данные по многим рудникам показали, что слепые гидротермальные рудные тела заключают в себе значительную часть запасов урана и являются важным резервом для уранодобывающей промышленности в районах развития этого типа оруденения.

Поиски слепых эндогенных месторождений урана в новых районах, где такого типа оруденение предполагается, но еще не доказано, практически лишены смысла. Наличие промышленных рудных районов, представленных только слепыми эндогенными месторождениями урана, хотя теоретически и не исключено (в самой начальной стадии их эрозионного вскрытия), но практически мало вероятно. Там же, где какая-то часть месторождений и рудопроявлений урана представлена легко открываемыми объектами, поиски, естественно, надо начинать с них, и только убедившись в наличии промышленного оруденения и изучив контролирующие его факторы, имеет смысл приступать к поискам не вскрытых эрозией слепых рудных тел на месторождениях.

Таким образом, объектами специальных поисков, рассматриваемых в настоящей главе, следует считать:

1) слепые рудные тела на разведываемых и эксплуатируемых гидротермальных месторождениях урана;

2) слепые месторождения в промышленно-рудных районах.

Применительно к этим объектам и излагаются последующие разделы главы.

Систематические поиски слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях урана должны стать обязательным элементом детальной (промышленной) в эксплуатационной разведки. Такие работы велись и раньше, однако методика их была весьма несовершенной. Обычно поиски слепых рудных тел на таких

месторождениях сводились к разбуриванию перспективных участков рудного поля системой буровых профилей или проходке магистральных поисковых квершлагов по определенной сети в плане и на глубину. Эти работы требовали больших затрат и не всегда приводили к положительным результатам. Иногда их сочетали с геологоструктурными и геофизическими исследованиями, что повышало эффективность поисков. В настоящее время имеется возможность дальнейшего усовершенствования этих работ на основе широкого использования геохимических методов исследования.

Поиски слепых гидротермальных месторождений урана представляют собой новую методическую задачу, постановка и практическая реализация которой становятся возможным на той же теоретической основе, что и отмеченное выше усовершенствование методики поисков слепых рудных тел.

Обе указанные задачи имеют большое народнохозяйственное значение, поскольку они направлены непосредственно на расширение сырьевой базы действующих и проектируемых предприятий уранодобывающей промышленности, где дополнительные сырьевые ресурсы могут быть использованы быстрее и экономичнее по сравнению с новыми объектами.

## 2. ПОИСКОВЫЕ КРИТЕРИИ И ПРИЗНАКИ СЛЕПЫХ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

При поисках слепых эндогенных месторождений урана используются в основном структурные и литологические критерии в их локальном проявлении на данном месторождении (при поисках слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях) или в данном районе (при поисках слепых месторождений в известных рудных районах). Реже используется магматический контроль оруденения, в основном при выделении перспективных участков для поисков нескрытого оруденения, если этот контроль проявляется достаточно отчетливо.

Из прямых поисковых признаков, используемых для обнаружения слепых урановых месторождений и рудных тел, ведущими являются первичные ореолы рассеяния радиоактивных и сопутствующих им элементов во вмещающих породах и структура выявления слепых рудных тел, первичные ореолы контроля впадины эрозией, большое поисковое значение имеют вторичные ореолы рассеяния рудного вещества в рыхлом покрове за счет первичных ореолов. В некоторых районах гидросеть и глубоко промываемыми рудными телами существенное значение при поисках слепых месторождений урана могут иметь гидрогеологические условия. В еще большей степени это относится к месторождениям урана, где гидротермальные процессы являются основным фактором формирования рудных тел.

химические аномалии иногда становятся ведущим поисковым признаком скрытого оруденения.

На косвенных поисковых признаках, используемых для выявления слепых эндогенных месторождений и рудных тел, следует отметить:

- 1) ореолы «пустой» жильной минерализации, характерные для некоторых урановых месторождений;
- 2) окалорудные изменения пород;
- 3) геофизические аномалии, связанные с рудоконтролирующими структурами и породами.

На характеристике первичных ореолов, являющихся главным поисковым признаком слепых эндогенных месторождений урана, мы остановимся более подробно. В отношении остальных поисковых признаков ограничимся краткой характеристикой их поискового значения применительно к слепым эндогенным месторождениям урана.

### ПЕРВИЧНЫЕ ОРЕОЛЫ РАССЕЯНИЯ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Первичные ореолы рудных месторождений обладают тремя важными поисковыми особенностями:

1) значительной протяженностью по вертикали над рудными телами (от нескольких десятков до многих сотен метров), что особенно важно при поисках слепых месторождений;

2) более значительными размерами по сравнению с соответствующими им рудными телами, что облегчает поиски последних, особенно при сложной морфологии оруденения;

3) зональным строением, позволяющим судить о пространственном положении искомым рудных тел и месторождений по закономерным изменениям в составе их ореолов.

Исследования последних лет показали, что перечисленные особенности первичных ореолов, установленные на полиметаллических и редкометалловых месторождениях, целиком относятся и к гидротермальным месторождениям урана.

Максимальные размеры первичных ореолов эндогенных месторождений совпадают с направлением движения рудообразующих флюидов. В этих направлениях по зонам дробления, разломам и пластам легкопроницаемых пород рассеяние рудного вещества может распространиться на многие сотни метров и даже целые километры от месторождений.

При поисках слепых месторождений наибольшее значение имеет протяженность первичных ореолов по вертикали над рудными телами. Так, по данным Г. И. Россмана (1957), первичные ореолы полиметаллических месторождений Рудного Алтая прослеживаются на 200—500 м над рудными телами в сторону их всяческого бока. По данным В. В. Поликарпочкина и др. (1958), первичные ореолы полиметаллических месторождений Восточного Забайкалья

развиты по вертикали над рудными телами на 100—200 м и более. А. И. Соловов и В. З. Фурсов (1959) установили гипергенные ореолы рассеяния свинца и сопутствующих ему элементов, образовавшиеся за счет первичных ореолов над слепыми рудными телами Ачхсая, залегающими на глубине до 450 м. По данным О. В. Вершиковой (1956), первичные ореолы ртутно-сурьмяных месторождений наблюдаются на расстоянии до 300—350 м по вертикали над рудными залежами. Первичные ореолы эндогенных месторождений урана по наблюдениям ряда специалистов имеют вертикальную протяженность исследования, очевидно, выхват и более значительные по протяженности ореолы урановых месторождений.

Ширина первичных ореолов, особенно на жильных месторождениях урана, сравнительно невелика — от нескольких до первых десятков метров, а для маломощных тел контрастных руд нередко выражается десятками сантиметров. При наличии сближенных рудных тел их ореолы сливаются вместе, причем ширина этого общего ореола может достигать многих десятков и первых сотен метров.

Важной особенностью первичных ореолов является увеличение отношения их размеров в разведочных соечениях к размерам соответствующих рудных тел по мере усложнения морфологии последних. Для наиболее компактных и простых по форме рудных тел это отношение обычно измеряется единицами, а в некоторых случаях приближается к единице. Для морфологически сложных месторождений, залегающих в сильно нарушенных и легкопроницаемых породах, оно достигает многих десятков и даже сотен единиц, что облегчает поиски таких месторождений.

Морфология первичных ореолов урановых месторождений иллюстрируется рисунками 96, 97, 98, 99 и 100, приведенными в последующих разделах настоящей главы.

Наиболее распространенными рудными элементами в первичных ореолах изученных гидротермальных месторождений урана, кроме самого урана, являются Pb, Mo, As и Ni. Свинец встречен в ореолах всех изученных месторождений, причем изотопными анализами было доказано, что это не радиогенный, а обычный свинец гидротермального происхождения, сопровождающий урановое оруденение.

Второе место по распространенности занимает молибден, ореолы которого установлены на большинстве изученных месторождений. Для некоторых месторождений важными элементами-спутниками являются мышьяк и никель.

Из второстепенных элементов в первичных ореолах месторождений часто отмечаются Zn, Co, Ag, Tl, Th, V, Y, Mn, Sb. Второстепенные элементы

\* Наиболее полный материал приводится в работе А. И. Солововой и В. З. Фурсова «О ореолах рассеяния урана и элементов-спутников при гидротермальных месторождениях урана», в книге «Гидротермальные месторождения урана». Изд-во «Недра», 1964.

рудных тел ореолы, уступающие, однако, по размерам и интенсивности ореолам основных спутников урана. Поэтому они имеют меньшее поисковое значение.

Изученные к настоящему времени гидротермальные месторождения урана по составу их первичных ореолов можно разделить на четыре группы: свинцово-молибденовую, свинцово-никель-мышьяковую, молибденовую и мышьяковую.

Для первой группы важное поисковое значение имеет свинец, подчиненное — молибден. Обычно в ореолах присутствуют также иногда цирконий, торий, фосфор.

Для второй группы важнейшим спутником урана в ореолах является свинец, следующими по значению — никель и мышьяк. Молибден обычно присутствует, но в очень малых концентрациях, а иногда вообще отсутствует. В качестве второстепенных элементов отмечаются цинк, реже кобальт, серебро.

Третья группа представлена в основном урано-молибденовыми месторождениями, в рудах которых молибден иногда достигает промышленных концентраций. Обычно в ореолах этой группы месторождений присутствуют также свинец и медь. В качестве второстепенных элементов отмечаются мышьяк, таллий и иттрий.

В четвертую группу входят главным образом более низкотемпературные урановые месторождения. Из элементов-спутников наиболее протяженные и интенсивные ореолы образует мышьяк. Ореолы свинца и молибдена характеризуются меньшими размерами и более низкими содержаниями. Второстепенными элементами ореолов являются таллий, сурьма, ванадий, стронций.

Приведенная группировка, разумеется, не охватывает всего разнообразия вещественного состава первичных ореолов эндогенных месторождений урана, поскольку изучению подвергались не все известные формации этих месторождений.

Содержание металлов в ореолах колеблется в очень широких пределах. На полуметаллических и медноколчеданных месторождениях во внешней зоне ореолов содержание основных рудных элементов обычно измеряется сотнями долями процента, во внутренней части ореола (вблизи рудных тел) оно повышается до десятых долей процента. В первичных ореолах редкометалльных месторождений содержание основных элементов примерно на порядок ниже. Такие же содержания характерны для первичных ореолов гидротермальных месторождений урана.

Иногда при оковтуривании первичных ореолов содержание металлов в них выражается в единицах местного геохимического фона (ГФ). В этих случаях содержания основных рудообразующих элементов во внешней зоне ореолов обычно измеряются единицами и первыми десятками ГФ, а во внутренней зоне, прилегающей к рудным телам, многими десятками и сотнями ГФ. Для второстепенных элементов-индикаторов содержание обычно ниже на целый порядок — от единиц до первых десятков ГФ.

Зональность первичных ореолов урановых месторождений описана А. Д. Каблуковым и Г. И. Вертеповым (1960) на примере одного из гидротермальных месторождений. Ореолы рассеяния свинца и других им рудных тел, тогда как ореолы рассеяния урана и молибдена прослеживаются также в интервале рудных тел и ниже их. Коэффициенты соотношения свинца с ураном и молибденом с ураном закономерно уменьшаются с глубиной от надрудных частей ореолов к рудным и особенно подрудным горизонтам.

Зональность первичных ореолов зависит от многих факторов, в состав ореола. Поэтому ее проявления могут быть весьма разнообразны и в каждом конкретном случае подлежат специальному изучению.

### ЭЛЕМЕНТЫ-ПРИМЕСИ В МИНЕРАЛАХ-ВКРАПЛЕННИКАХ ПЕРВИЧНЫХ ОРЕОЛОВ РАССЕЯНИЯ

Важным поисковым признаком скрытого на глубине оруденения могут служить так называемые «надрудные индикаторы» и другие минералы-индикаторы первичных ореолов, развивающиеся часто на очень большом удалении от слепых рудных залежей и несущие отчетливые черты геохимического родства с ними. В ряде случаев эти минералы наследуют всю гамму рудных элементов, свойственных данному месторождению, и являются важным диагностическим признаком первичных ореолов.

Для выявления характерных элементов-примесей в минералах-вкрапленниках первичных ореолов урановых месторождений было изучено свыше 200 чисто выделенных мономинеральных фракций более чем с двадцати месторождений урана, полиметаллов, свинца и флюорита. Обнаруженные при этом элементы-примеси оказались возможным разделить на три группы:

- а) сквозные элементы, присутствующие практически во всех пробах данного минерала с указанных месторождений;
- б) элементы, присутствующие на месторождениях всех типов но только не во всех пробах;
- в) специфические элементы-примеси, характерные только минералов с урановых месторождений.

Для приротов к сквозным элементам-примесям Pb, Zn, As; к элементам, отмечаемым только в отделе Co, Ag, Sb, Bi, Mn. К специфическим элементам относятся только в пробах с урановых месторождений на месторождениях других типов, относятся Hg, причем ртуть отмечается в пробах развития промышленных урановых руд.

Сквозными элементами, присутствующими в пробах на месторождениях всех типов являются: Cu, Sb, As, Ag, Bi, Zn, Cd. Только

в галенитах с урановых месторождений, отобранных из рудных тел и ореолов над ними, установлены повышенные содержания U, Mo, Zr, Be, Hg (?), Ga, V, Ti, причем Be и Ga отмечены только в галенитах с горизонтов развития промышленного уранового оруденения.

Наличие специфических элементов-примесей в минералах может быть использовано для выделения геохимических аномалий, связанных с глубоко залегавшими слепыми урановыми рудными телами среди других аномалий, обусловленных полиметаллическими проявлениями, экзогенными концентрациями элементов в рыхлом покрове и другими причинами.

Содержание элементов-примесей, как правило, возрастает в направлении к рудным телам. Исключения составляют пик в галените и уран в флюорите, содержание которых в исследованных случаях вблизи рудных тел оказалось меньше, чем в удалении от них. Однако этот факт еще нуждается в проверке.

При подтверждении намечающихся закономерностей количественные соотношения элементов-примесей в минералах, так же как и количественные соотношения элементов в ореолах, могут быть использованы для оценки вероятной глубины залегания слепых рудных тел.

#### ПРОЧНЕ ПОИСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ СЛЕПЫХ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

**Вторичные ореолы рассеяния.** Наибольшее поисковое значение имеют вторичные ореолы рассеяния урана и сопутствующих ему элементов в рыхлом покрове над слепыми рудными телами, первичные ореолы которых в той или иной мере затронуты эрозией. Такие вторичные ореолы представляют собой довольно обычное явление на гидротермальных месторождениях урана, рудные тела которых кулисообразно расположены по глубине и находятся в разных стадиях эрозионного вскрытия. Наличие вторичных ореолов рассеяния в рыхлом покрове возможно также над слепыми урановыми месторождениями, первичные ореолы которых частично затронуты эрозией. Поэтому вторичные литохимические ореолы могут быть широко использованы как при поисках слепых эндогенных месторождений урана в известных промышленно рудных районах, так и при поисках слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях.

В ряде случаев при поисках слепых урановых месторождений могут быть с успехом использованы гидрохимические ореолы рассеяния урана и сопутствующих ему элементов, образующиеся за счет окисления слепых рудных тел и их первичных ореолов в зоне активного водообмена. Условия, благоприятствующие формированию таких ореолов, создаются при наличии глубоко промываемых рудных структур, а также в сфере влияния искусственного дренажа месторождений горными выработками.

Схема образования гидрохимического ореола, связанного со слепыми рудными залежами в одном из горных районов, показана на рис. 92. Вскрытие слепых рудных тел этого месторождения поисковыми скважинами облегчалось их пологим залеганием и значительными размерами в плане.

Образование радиогидрохимических аномалий в условиях дренажа месторождений горными выработками представляет собой весьма обычное явление и может быть с успехом использовано при поисках слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых

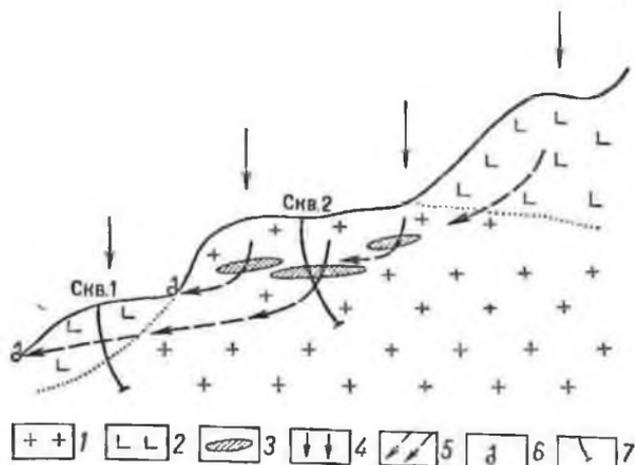


Рис. 92. Схема гидрохимического ореола слепого гидротермального месторождения урала, открытого по радиогидрохимической аномалии  
 1 — граниты, графопениты; 2 — осадочно-эффузивная толща;  
 3 — рудные тела; 4 — метеорные осадки и подземные воды нормального состава; 5 — радиоктивные воды; 6 — радиоктивный источник; 7 — поисковые скважины

месторождениях. Иногда выходы рудничных вод отличаются высокой радиоактивностью и могут представлять бальнеологический интерес.

Биогеохимические аномалии теоретически могут быть использованы при поисках слепых месторождений и рудных тел, например в тех случаях, когда их первичные ореолы выклиниваются по восстав на глубинах, достаточных для корневой системы опробуемых скважин, или когда затронутые эрозией первичные ореолы слепых рудных тел и образовавшиеся за их счет вторичные литохимические ореолы выщелочены на значительную глубину, но достигают поверхности по скважинам химического метода. Практически такие случаи встречаются редко и не имеют существенного значения.

Ореолы «пустой» жильной минерализации в окрестности гидротермальных месторождений урала (например, в районе оруденения окружены ореолами «пустой» (малоактивной или безрудной) жильной минерализации. Эти ореолы ставятся прерывистыми

как на флангах месторождений, так и вверх по восстанию над рудными телами. Расстояния между отдельными частями таких ореолов составляют от нескольких десятков до первых сотен метров. На одних месторождениях промышленные рудные тела бывают окружены ореолами безрудных карбонатных жил и прожилков, на других — безрудной кварц-карбонатной минерализацией, выходящей далеко за пределы промышленного оруденения. Аналогичные явления отмечаются на гидротермальных месторождениях цветных и редких металлов (Левинский и Смирнов, 1959).

Ореолы жильной минерализации обычно формируются в дорудную (высокотемпературный кварц) или пострудную фазу, (низкотемпературный кварц, карбонаты). В ряде случаев они, вероятно, содержат примесь рудных элементов и могут рассматриваться в качестве прямого поискового признака скрытого на глубине оруденения. Условия формирования, размеры и морфология ореолов жильной минерализации на урановых месторождениях не изучены. Околорудные вмещения пород, характерные для гидротермальных месторождений урана, описаны в книге Е. М. Яппшевского и др. (1963). Поисковое значение их применительно к слепым урановым месторождениям и рудным телам пока неясно. В тех случаях, когда околорудные изменения пород распространяются далеко за пределами первичных ореолов и сравнительно легко выявляются при поисках, их можно с успехом использовать в качестве косвенного признака скрытого на глубине оруденения. При развитии околорудных изменений в контурах, близких к контурам первичных ореолов, их поисковое значение снижается.

Для скарповых месторождений урана околорудные изменения пород (гранитизация и др.) являются весьма характерными. Они легко устанавливаются при геолого-геофизических съемках и могут рассматриваться как один из ведущих поисковых признаков слепых скарповых залежей.

**Геофизические аномалии.** Не останавливаясь на радиоактивных аномалиях, связанных с рассеянным рудным веществом в окружающих породах первичных и вторичных ореолов урановых месторождений, упомянем лишь о геофизических аномалиях, обусловленных некоторыми особенностями геологического строения этих месторождений, которые могут быть использованы при поисках слепых рудных тел. В основном это магнитные и электрические аномалии, связанные со структурами и породами, контролирующими урановое оруденение в районе поисков. Так, на некоторых гидротермальных месторождениях урана локализация рудных тел контролируется диабазовыми дайками, прорывающими толщу кристаллических сланцев. Выявление этих даек на первом этапе поисков слепых рудных тел с успехом может осуществляться при помощи магниторазведки. Часто гидротермально измененные участки даек и пород вмещающих урановое оруденение характеризуются резко повышенной магнитной восприимчивостью, что используется в практике как важный поисковый признак. Применение магниторазведки

рационально при поисках рудных тел, избирательно локализующихся в амфиболитах, в скарновых месторождениях урана, всегда содержащих примесь магнитных минералов.

Электрические аномалии в определенных геологических условиях могут рассматриваться в качестве косвенного поискового признака слепых урановых месторождений и рудных тел сульфидной и арсенидной формаций. Электрические аномалии могут быть связаны также с разломами, зонами дробления и другими структурами, контролирующими геологическую позицию эндогенных месторождений урана и локализацию отдельных рудных залежей. В будущем с развитием и усовершенствованием геофизических методов поисковое значение могут приобрести и другие геофизические аномалии, связанные со слепыми рудными телами урановых месторождений и с определенными особенностями их геологического строения.

### 3. МЕТОДИКА ПОИСКОВ СЛЕПЫХ ЭНДОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Изучение месторождений — эталонов. Выше было отмечено, что объектами специальных поисков, рассматриваемых в настоящей главе, являются не вскрытые эрозией (слепые) гидротермальные месторождения урана в известных промышленно рудных районах и слепые тела на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях того же типа. В обоих случаях речь идет о выявлении объектов, аналогичных уже известным, в связи с чем первостепенное значение приобретает изучение так называемых месторождений-эталонов, типичных представителей искомого оруденения, и установление их поисковых критериев и признаков, на основе которых в дальнейшем строится методика специальных поисков не вскрытых эрозией месторождений и рудных тел.

Важнейшим элементом работ на месторождениях-эталонах является изучение первичных ореолов, которые в настоящее время рассматриваются как ведущий поисковый признак скрытого оруденения. При изучении первичных ореолов должны быть освещены следующие основные вопросы:

- 1) форма и размеры ореолов рассеяния урана и соотношение элементов-индикаторов искомого оруденения (определяется элементом, образующим наиболее обширные ореолы рассеяния);
- 2) связь морфологии ореолов с морфологией контролирующими структурами;
- 3) влияние проницаемости и вещественного состава пород-хозяек на развитие ореолов;
- 4) явление зональности первичных ореолов, зависимость от типа месторождений, вмещающей среды и геологических особенностей элементов, входящих в состав ореолов;

раз-

5) сравнительная характеристика вещественного (минералогического и химического) состава рудных тел и первичных ореолов;

6) качественные и количественные характеристики распределения элементов-примесей в минералах рудных тел и околорудной вмещающей в различных зонах месторождения, включая надрудные горизонты;

7) выбор элементов-индикаторов, характерных для данного типа оруденения;

8) изменения морфологии и вещественного состава ореолов в зонах окисления и цементации.

Изучение перечисленных вопросов проводится на конкретном материале каждого месторождения, но полученные выводы обязательно обобщаются по генетическому и территориальному признакам, т. е. по генетическим типам месторождений и уранорудным районам с использованием литературных данных и неопубликованных материалов других исследователей. Необходимость такого подхода диктуется слабой изученностью первичных ореолов и отсутствием достаточно разработанной и апробированной методики их использования при поисках слепых урановых месторождений.

Изучение первичных ореолов производится путем систематического опробования горных выработок (квершлагов, ортов) и керн буровых скважин. Пробы рекомендуется брать пунктирной бороздой с интервала не более 5 м, а при узких ореолах — еще меньше (на расчטה не менее 2—3 аномальных проб в высечке и лещачем боках рудного тела). Пробы анализируются на уран (люминесцентным методом) и возможные элементы-спутники (спектральным методом).

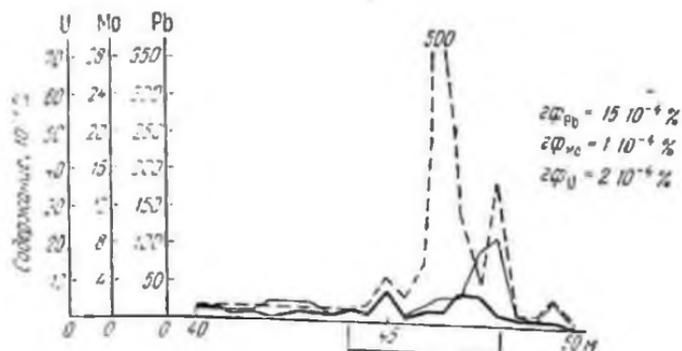
Опробование первичных ореолов надо производить на всех доступных горизонтах для установления их вертикальной зональности. При поисках особенно важно знать разницу в составе и количественных соотношениях элементов в ореолах над слепыми, слабо и глубоко эродированными рудными телами.

Параллельно с первичными ореолами должны быть тщательно изучены также вторичные ореолы месторождений-эталопов. Очень полезно произвести сопоставление вторичных ореолов с первичными, как это сделано на рис. 93.

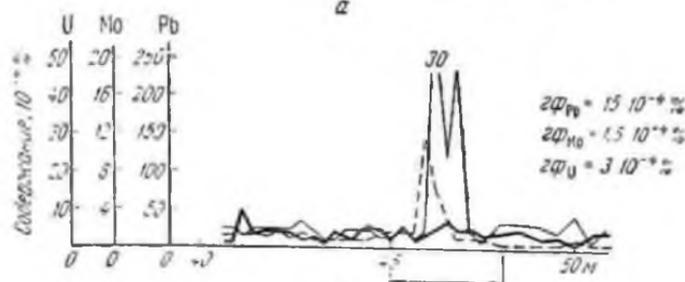
При наличии в районе благоприятных условий для применения гидрохимических и биохимических методов должны быть изучены также ореолы рассеяния урана и сопутствующих ему элементов в растительном покрове, подземных и поверхностных водах.

Исключительно важное значение при поисках слепых месторождений, начиная с выделения перспективных площадей и кончая оценкой выявленных поисковых признаков, имеет знание основных рукоконтролирующих факторов. Применительно к эндогенным месторождениям урана ими являются магматический, структурный и литологический контроль оруденения. Изучение этих вопросов входит в обязанности геологов, занимающихся разведкой месторождений и участвующих в эксплуатации рудников. Кроме того, ими занимаются специальные научные группы, работающие на тех же

10 0 10 20 30 м



а



б

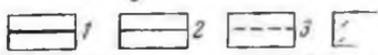
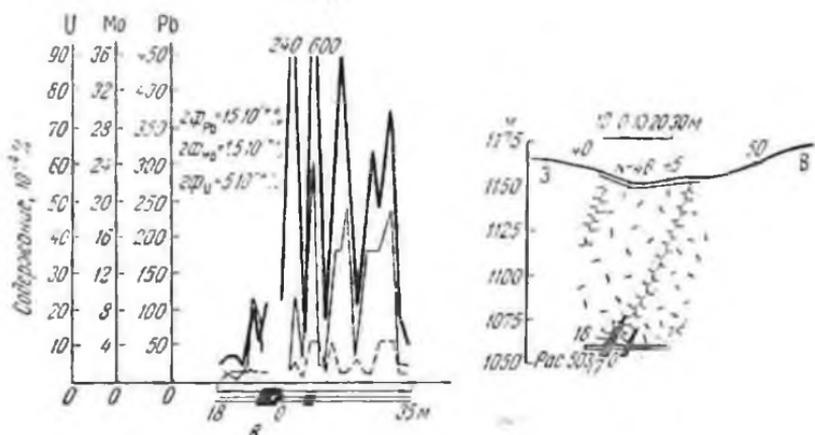


Рис. 93. Распределение элементов и первичном и вторичном железе и на рудном горизонте одного из гидротермальных месторождений. а — профиль 33, дельта-плот; б — навава 46 и обнажения; в — схематический геологический разрез по профилю 33. 1—3 — кривые распределения урана (1), молибдена (2) и свинца (3) в рудных телах; 4 — рудные тела; 5 — рудо-вмещающая тектоническая зона дробления; 6 — слепые рудные тела.

месторождениях и рудниках. Поэтому в данном случае речь скорее должна идти об использовании имеющихся материалов и выводов, чем о проведении самостоятельных исследований по вопросу о рудоконтролирующих факторах. То же можно сказать об ореолах жильной минерализации и окolorудных изменениях пород.

Геохимические исследования надрудных сульфидов и других минералов на элементы-примеси должны входить в программу изучения первичных ореолов месторождений-эталонов. Методика этих работ особых пояснений не требует.

Поиски слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях. Эта проблема не является новой, так как поиски слепых рудных тел всегда так или иначе входили в задачу промышленной и эксплуатационной разведки месторождений. Однако сейчас появился ряд новых возможностей, позволяющих сделать эти работы более эффективными. К ним относятся: 1) значительные успехи в изучении условий образования и размещения месторождений полезных ископаемых вообще и эндогенных урановых месторождений в частности, что позволяет более обоснованно выделять перспективные участки под поиски скрытого оруденения; 2) разработка новых геохимических методов поисков, отличающихся повышенной глубиной и рядом других преимуществ перед ранее практиковавшимися методами; 3) комплексный подход к решению поисковых и разведочных задач на основе рационального сочетания геологических, геохимических, геофизических и технических методов применительно к конкретным геологическим и природным условиям исследуемого участка (района). Использование этих новых возможностей позволяет сделать поиски слепых рудных тел достаточно эффективными даже в сложной геологической обстановке.

Выделение перспективных участков под поиски слепых рудных тел осуществляется с использованием всех имеющихся геологических материалов по данному месторождению и району. Объектом анализа должно быть рудное поле месторождения в целом. Если границы последнего не определились, то необходимые для этой работы включения в программу специальных поисков.

К перспективным в отношении возможного наличия слепых рудных тел в первую очередь относятся:

1) участки и блоки рудного поля, расположенные на продолжении известных рудоконтролирующих структур по их простиранию и падению;

2) участки, примыкающие к структурам, аналогичным рудоконтролирующим по генетическому типу, возрасту, ориентировке и т. п.;

3) участки, горизонты и блоки рудного поля, сложенные благоприятными для оруденения породами с учетом их пространственного положения на разных глубинах;

4) участки пересечения и сопряжения рудоконтролирующих структур друг с другом и с горизонтами благоприятных для оруденения пород;

5) участки непосредственного проявления прямых и косвенных признаков искомого оруденения.

В выделении перспективных участков для специальных поисков должны принимать участие как научные, так и производственные работники, занимающиеся изучением месторождения и прилегающего к нему района. Размеры выделяемых участков колеблются от нескольких до первых десятков квадратных километров.

Специальные поиски слепых рудных тел должны осуществляться по особому проекту, для составления которого нельзя дать общей схемы. Основными элементами этих работ являются следующие.

1. Геологоструктурное картирование рудного поля в масштабах: 1 : 10 000—1 : 5 000 обычными методами с использованием материалов геофизических и геохимических исследований, указанных ниже в пунктах 2—4.

2. Детальная металлотрическая съемка всего рудного поля в масштабах 1 : 10 000—1 : 5 000 с анализом проб на уран и сопутствующие ему элементы. Если эти работы были выполнены раньше, необходимо тщательно изучить имеющиеся материалы, обратив особое внимание на недостаточно надежно проверенные геохимические аномалии, которые могут свидетельствовать о наличии на глубине слепых рудных тел. Методика металлотрических исследований регламентируется соответствующей инструкцией. Возможны отступления от общепринятых сеток металлотрического опробования для более точного оконтуривания ореолов и изучения их зональности. Анализ металлотрических проб производится вначале на широкий круг элементов, а затем лишь на основные и второстепенные элементы-индикаторы искомого оруденения.

3. Специальные геофизические исследования в пределах всего рудного поля или отдельных его участков для прослеживания известных и выявления новых рудоконтролирующих структур «критических» горизонтов (благоприятных для оруденения пород) и других элементов геологического строения, обуславливающих наличие слепых рудных тел. Выбор геофизических методов и методика полевых работ определяются геологической обстановкой и решаемыми задачами. В случае необходимости производят предварительное исследование физических свойств пород месторождений-эталонов. В случае повышенной сульфидности развивающейся вблизи урановых рудных тел, в пределах геохимических ореолов, указывающих на возможность на глубине скрытых рудных тел, весьма рационально проводить работы методом вызванной поляризации (ВП). По результатам работ можно судить о верхней границе развития рудных тел и направлении падения зоны обогащения (С. С. Савинков и др., 1966), что позволяет уточнить глубину проверочных скважин.

4. Детальные гидрохимические и биогеохимические съемки в пределах всего рудного поля или отдельных его участков при наличии

благоприятных условий для использования этих методов с поисковыми целями.

5. Детальное металлометрическое опробование ранее пройденных горных выработок и керн буровых скважин для выявления первичных ореолов, повешенных и скрытых на глубине или в блоках между выработками и скважинами рудных тел. В дальнейшем такому опробованию подлежат все вновь проходимые горные выработки, особенно кварцлазного типа, а также поисковые и разведочные скважины.

Пробы отбираются и исследуются аналогично тому, как было указано выше для месторождений-эталонов. Параллельно изучаются элементы-примеси в минералах-вкраплениях первичных ореолов.

При отборе проб особое внимание обращается на участки, характеризующиеся оптимальными условиями для развития первичных ореолов (зоны тектонических нарушений, дробления и трещиноватости, участки гидротермально измененных пород и т. п.). Оконтавание ореолов производится на всех геологических картах, горизонтальных планах и разрезах с использованием имеющейся геологической документации и сводной графики по месторождению. Ожидаемое положение слепых рудных тел определяется путем экстраполяции выявленных первичных ореолов на глубину с учетом геологического, литологического и других рудоконтролирующих факторов. На основании этих построений намечаются поисковые скважины или горные выработки для вскрытия искоемых залежей.

6. Подземная радиогидрохимическая съемка путем опробования всех выходов трещинных и других вод в подаваемых выработках и буровых скважинах с анализом проб на радиоактивные элементы (U, Rn, Ra) и элементы-спутники, установленные в аномальных водах на месторождениях-эталонах.

7. Изучение ореолов безрудной жильной минерализации и околорудных изменений с повешением полученных данных на горизонтальные планы и разрезы для использования в качестве косвенных поисковых признаков.

Если какие-либо из перечисленных работ уже выполнены, то все материалы этих работ должны быть тщательно проанализированы и использованы с поисковыми целями.

При оценке выявленных поисковых признаков необходимо руководствоваться прежде всего наблюдениями и выводами, сделанными при изучении соответствующих месторождений-эталонов. Наряду с этим могут быть использованы закономерности, установленные для аналогичных месторождений в других рудных районах, особенно если эти закономерности находят достаточно широкое подтверждение у ряда исследователей.

В частности, при оценке перспективности геохимических аномалий в различных районах Средней Азии можно руководствоваться нижеследующим:

1) высокие и средние значения линейной продуктивности \* урановых ореолов при высокой продуктивности свинцовых ореолов и высоких значениях свинцово-уранового отношения (более 0,3%) и молибдено-уранового отношения (более 1,0) характеризуют надрудные толщи над не вскрытыми эрозией рудными телами;

2) высокие по содержанию и продуктивности ореолы рассеяния урана при средних и слабо проявленных свинцовых ореолах и величине свинцово-уранового отношения в пределах 0,1—0,3 характеризуют вскрытые эрозией рудные тела;

3) относительно высокая продуктивность урановых ореолов при низкой и очень низкой продуктивности свинцовых ореолов и величине свинцово-уранового отношения менее 0,1 характеризует нижние горизонты (корни) урановых рудных тел в нижней части рудоносных структур ниже границы балансовых руд.

Используя указанные соотношения элементов, отражающие вертикальную зональность ореолов, можно выделить наиболее перспективные аномалии, связанные с не вскрытыми рудными телами.

Ореолы над свинцовыми рудопроявлениями характеризуются высокими содержаниями свинца и цинка при полном отсутствии урана.

Изучение элементов-примесей, в первую очередь урана, титана и циркония в сульфидах, дает возможность устанавливать различия между полиметаллическими рудопроявлениями и глубоко залегающими слепыми урановыми рудными телами, над которыми ореол рассеяния урана не вышел на современную поверхность.

Для экзогенных скопленений урана при очень интенсивной  $\gamma$ -активности обычно совершенно не характерно присутствие свинца, что сближает их с аномалиями над корнями урановых рудных тел. Таким образом, при прочих равных условиях ореолы рассеяния урана и аномалии  $\gamma$ -активности, сопровождаемые ореолами рассеяния свинца, молибдена, меди, цинка, должны рассматриваться как более перспективные по сравнению с радиоактивными аномалиями, лишенными указанных элементов. Присутствие в ореолах всей совокупности элементов, сопровождающих урановое оруденение или хотя бы части их, свидетельствует о наличии гидротермального привноса и, следовательно, о перспективности аномалий.

Поиски слепых месторождений в промышленно рудных районах. Поиски слепых эндогенных месторождений урана во многих случаях опсаным выше поискам слепых рудных тел и месторождений и эксплуатируемых месторождениях. Выделение новых площадей производится на основе тщательного изучения имеющихся материалов по геологии и металлогении. При этом главное внимание уделяется выявлению перспективных ореолов уранового оруденения. Если последние связаны с определенными типами генетическими типами, то анализ материалов по геохимическое

\* Под линейной продуктивностью ореола понимается произведение его ширины в метрах на среднее содержание элемента.

прогнозирование ведутся по каждому типу отдельно, причем выделяемые перспективные площади могут частично перекрывать друг друга.

Выделение перспективных площадей производится с учетом геологической позиции известных месторождений и рудопроявлений урана по отношению к рудогенерирующим интрузиям и рудоконтролирующим структурам (приконтактные участки рудогенерирующих интрузий, площади развития малых интрузий, участки, прилегающие к региональным рудоконтролирующим разломам и т. п.). Размеры выделяемых перспективных площадей обычно измеряются десятками и первыми сотнями квадратных километров, т. е. они примерно на порядок больше участков, выделяемых под поиски слепых рудных тел на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях.

Работы, связанные с поисками слепых месторождений, в схеме можно разделить на два этапа. На первом этапе производится детальное геолого-структурное изучение перспективной площади в масштабах  $1 : 25\ 000$ — $1 : 10\ 000$  с обязательным применением геофизических и геохимических методов исследования. Геофизические методы (аэлектроразведка, магниторазведка, иногда сейсморазведка) используются для прослеживания рудоконтролирующих структур, контактов изверженных пород и других элементов, определяющих геологическую позицию искоемых месторождений. Особое внимание уделяется структурам пересечения, нередко вмещающим слепые рудные тела. Геологическое картирование сопровождается тщательной фиксацией всех признаков гидротермальной деятельности (околорудно измененные породы, ореолы жильной минерализации и пр.).

Геохимические исследования включают металлометрическую съемку масштабов  $1 : 50\ 000$ — $1 : 25\ 000$  с детализацией выявленных аномальных участков в масштабах  $1 : 10\ 000$ — $1 : 5\ 000$ . В горных районах иногда предварительно изучаются потоки рассеяния урана и сопутствующих его элементов в гидросети, а затем на наиболее интересных участках производится площадная металлометрическая съемка.

На первом этапе проводятся также радиогидрохимические исследования. Особое внимание уделяется опробованию вод, приуроченных к зонам разломов, дробления и смятия, контактам изверженных пород и другим геологоструктурным элементам, которые могут контролировать скрытое на глубине оруденение.

Главным поисковым признакам слепых урановых месторождений являются геохимические аномалии (металлометрические и радиогидрохимические). Выделение перспективных аномалий производится аналогично тому, как это было указано выше для первичных и вторичных ореолов слепых рудных тел.

Дальнейшие работы на отобранных для проверки аномалиях относятся уже ко второму этапу специальных поисков. Имеющийся небольшой опыт в этой области показывает, что наиболее рациональным и эффективным является следующий порядок работ.

1. Детальные геологоструктурные исследования на участке выявленных геохимических аномалий, имеющие целью установить особенности геологического строения участка, выделить благоприятные для локализации оруденения рудоконтролирующие, а в некоторых случаях и рудовмещающие структуры и горизонты. На сплошь задернованных и перекрытых элювально-делювиальными отложениями площадях целесообразно применение методов общей геофизики (магниторазведки, электроразведки) для прослеживания даек, зон разломов и установления контактов различных пород.

Ввиду трудоемкости этих работ они должны проводиться на ограниченных участках, где выявлены аномалии, подлежащие оценке. Обычный масштаб этих работ 1 : 2 000—1 : 5 000.

2. Вскрытие канавами и расчистками наиболее интересных участков для установления углов падения структур, опробования зон дробления, трещин и жил различных направлений.

3. Изучение гидротермально измененных пород. Для ряда районов и месторождений установлена своеобразная вертикальная зональность околорудных изменений вокруг урановых рудных тел. В верхних надрудных горизонтах чаще отмечаются карбонатизация и альбиситизация. Для нижних горизонтов и подрудных зон характерны серицитизация и окварцевание. Участки покраснения (гематитизация) развиваются как в непосредственной близости к рудным телам, так и над слепыми рудными телами в виде небольших слабо проявленных пятен и могут служить важным дополнительным признаком при оценке аномальных участков. Для этих работ, в отличие от предыдущих, обычно требуется проведение микроскопических исследований собранного каменного материала и анализы пород на щелочи (калий и натрий).

4. Тщательные минералогические наблюдения в районе выявленных аномалий сводятся к установлению наличия вкрапленности галенита, флюорита, карбонатов, часто наблюдаемых по восстановлению над слепыми урановыми рудными телами. Эта работа проводится одновременно с изучением околорудных изменений и имеет целью выяснение наличия и границ минералогических ореолов, визуальную оценку их интенсивности, отбор типичных штучков для последующего выделения мономинеральных фракций и исследования на содержание элементов-примесей.

По совокупности полученных данных принимается решение о целесообразности вскрытия аномалий на глубинных точках для заложения первых скважин.

#### 4. ПРИМЕРЫ ИЗ ПРАКТИКИ СЛЕПЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В процессе разработки методики поисков слепых месторождений урана производилась проверка выявленных геохимических аномалий горными выработками и буровыми скважинами. Часть этих примеров приводится ниже.

*Месторождение 1.* Рудные тела приурочены к крутопадающим зонам дробления и опереющим их трещинам в кислых эффузивах и туфах. Большая часть рудных тел слепые. Мощные эффузивы летят от сантиметров до многих метров. Основными рудными минералами являются востурит и тесно ассоциирующие с ним молибденит и галенит. По восставию над слепыми рудными телами молибденит карбоатизация, альбитизация и слабая гематизация пород, а также вкрапленность галенита и флюорита. Для нижних горизонтов месторождения характерны серицитизация и окварцевание рудовмещающих пород.

После изучения первичных ореолов над известными рудными телами и выяснения их основных особенностей было произведено площадное опробование делювиальных отложений. Помимо ореолов рассеяния, обусловленных известными рудными телами, в северо-восточной части месторождения (рис. 94) была выявлена аномалия с относительно высокими содержаниями свинца и низким содержанием урана, что позволило рассмотреть ее как вторичный ореол арозней первичного ореола. При опробовании коренных пород по обнажениям были установлены первичные ореолы рассеяния свинца и молибдена, совпадающие со вторичными ореолами урана, элементов, а также зоны осветления и пиритизации с вкрапленностью флюорита.

На глубине участок аномалии был ранее пересечен кварцлазными выработками на четвертом и шестом горизонтах (160 и 240 м от поверхности). В этих выработках отмечались ореолы рассеяния свинца и урана, интенсивность которых увеличивалась к шестому горизонту. Проверка аномалии осуществлялась путем проходки подземных выработок на третьем и седьмом горизонтах (рис. 95 и 96). На третьем горизонте этими выработками были установлены только ореолы, хорошо увязывающиеся с поверхностью и четвертым горизонтом. На седьмом горизонте было вскрыто несколько сближенных рудовосных зон с промышленным содержанием урана. Как установлено последующей разведкой, все они являются слепыми и по восставию выклиниваются ниже шестого горизонта. Протяженность рудных тел по простиранию на седьмом горизонте значительно превышает длину первичных и образовавшихся за их счет вторичных ореолов. Следовательно, на поверхность выходили только отдельные наиболее протяженные (280 м по восставию) краевые части первичных ореолов.

*Месторождение 2.* Месторождение расположено в гранитах. Лявавидные рудные тела, имеющие небольшую длину по падению с резко проявленными пережимами по простиранию, приурочены к зонам дробления и окварцевания. Урановая минерализация представлена смолкой, отмечается редкая вкрапленность молибденита и галенита.

При детальном площадном опробовании делювиальных отложений, помимо ореолов рассеяния урана, свинца и молибдена над

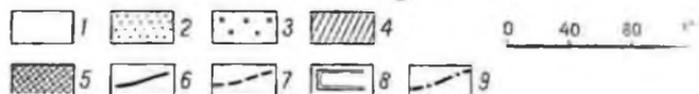
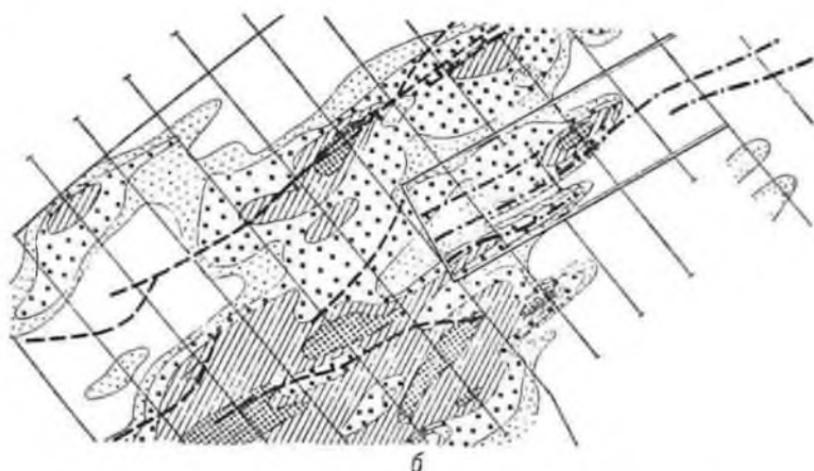
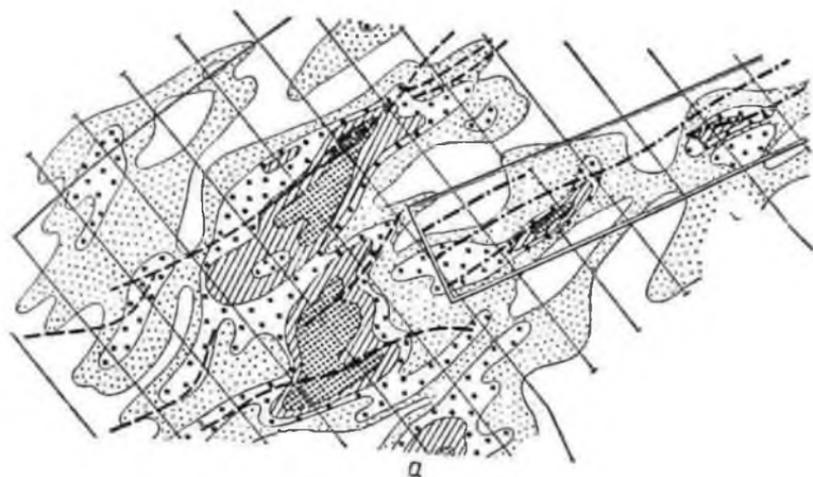


Рис. 04. Вторичные ореолы рассеяния урана (а) и свинца (б) — содержание в алювиально-делювиальных отложениях (геохимических фонов), 2 — от 2 до 4 г/т, 3 — от 4 до 20 г/т; свинца — 1 — менее 3 г/т, 2 — от 3 до 10 г/т, 3 — не более 100 г/т; 6 — выходящие на поверхность по восставанию выхода слепого уранового рудного месторождения металлотрической аномалии, рекомендованный к разведке; 8 — слепые урановые рудные зоны, вскрытые на горизонтальной скважине; 9 — слепые урановые рудные зоны, вскрытые на горизонтальной скважине (по восставанию) на дневную поверхность.

известным слепым рудными телами, в стороне от них был выявлен слабый ореол урана (содержание до 2 ГФ) и молибдена (до 50 ГФ). Скважины, а затем подземные выработки, пройденные на горизонте III под этим участком, вскрыли серию слепых рудных тел с промышленным содержанием урана. Их длина значительно превышала протяженность соответствующих ореолов на поверхности. Вверх по восставию рудные тела выклиниваются на глубине около 100 м от поверхности.

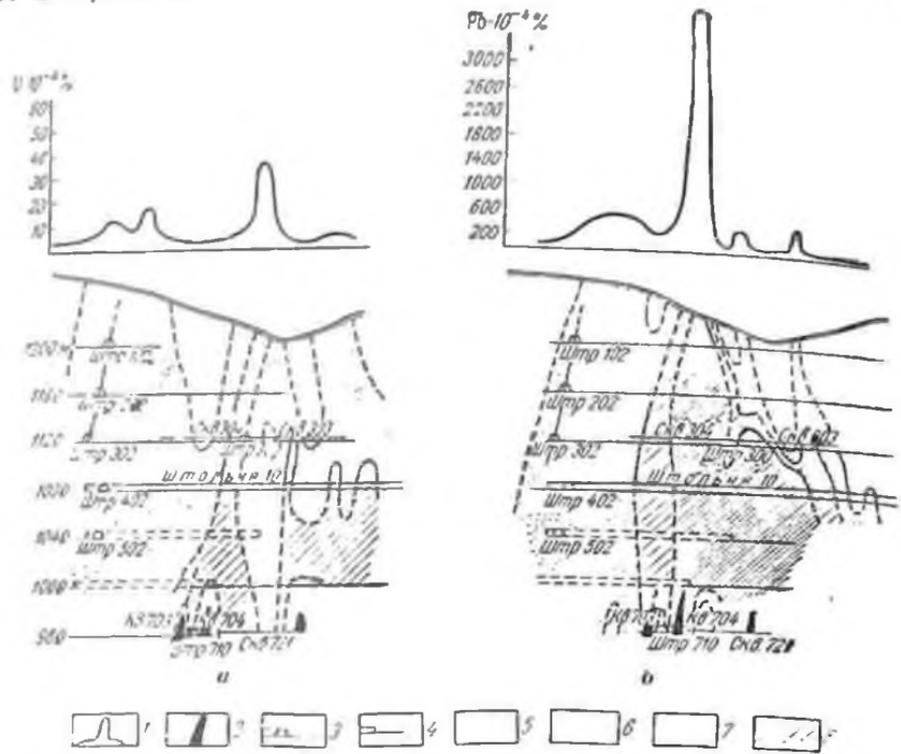


Рис. 95. Первичные ореолы рассеяния урана (а) и свинца (б) на урановом месторождении М 1 1 — кривые распределения урана и свинца в аэрозольно-дегустивальных отложениях; 2 — слепые рудные тела, выщелоченные по первичным и образовавшимся за их счет вторичным ореолам рассеяния, 3 — горные выработки; 4 — горные скважины подземного бурения; 5—6 — содержание урана и свинца: 5 — менее 2 гф (геохимических фонов), 6 — от 2 до 8 гф, 7 — от 8 до 25 гф, 8 — более 25 гф

Второй ореол рассеяния урана, свинца и молибдена, имевший аналогичное первому соотношению элементов, был расположен далее по простиранию зоны, в пределах которой на глубине были известны рудные тела. Он был разбурен на глубине двумя горизонтальными скважинами подземного бурения.  $\gamma$ -Картаж скважин дал отрицательный результат, в связи с чем подземными горными выработками этот участок не разведывался.

**Поисковый участок 3.** Участок расположен в пределах рудного поля на расстоянии нескольких километров от ближайшего уранового месторождения. Вмещающие породы — интрузивные кварце-

вые порфиры — разбиты рядом параллельных разломов. В оперяющих структурах одного из разломов с поверхности были установлены точки с высокой  $\gamma$ -активностью и в канавах была вскрыта вторичная урановая минерализация (казолит, урапофан). Макрократность пирита; в сульфидных прожилках, не имеющих повышенной  $\gamma$ -активности, присутствуют галенит, халькопирит,

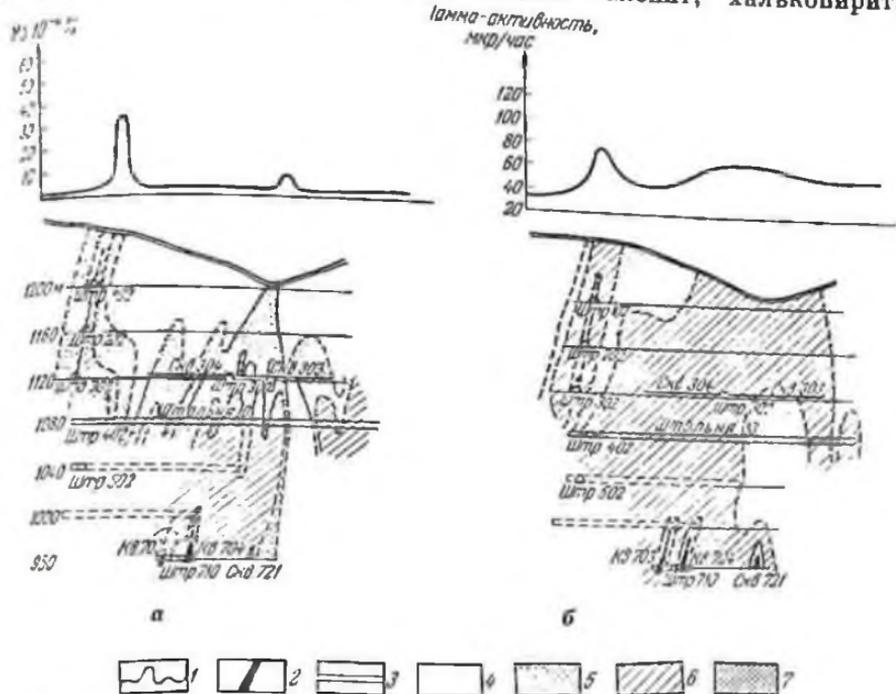


Рис. 96. Ореолы молибдена (а) и гамма-активность (б) на урановом месторождении № 1  
 1 — кривые распределения молибдена и гамма-активности в алювиально-делювиальных отложениях; 2 — сленитовые рудные тела, выявленные по ореолам рассеяния свинца и урана; 3 — опробованные интервалы выработок; 4—7 — содержание молибдена и  $\gamma$ -активности: 4 — менее 2 гф, 5 — от 2 до 8 гф, 6 — от 8 до 25 гф, 7 — свыше 25 гф

пирит. Опробование делювиальных отложений показало, что все эти канавами минерализованные зоны характеризуются небольшими ореолами рассеяния урана при очень слабо по ореолах рассеяния свинца (рис. 97, юго-восточная)

Такие соотношения элементов в ореоле, как характерны для корней рудных тел. Поэтому в заключение можно отметить, что отмеченная на поверхности зона быстро выклинивается на глубину. Опробование зон и оперяющих ее структур подтверждает это.

На некотором расстоянии от разведываемой зоны параллельно ей на поверхности были обнаружены небольшие свинцово-молибденовые ореолы. Содержание урана и  $\gamma$ -активность в них были близки к фоновым, но соотношение элементов в ореолах указывало

на возможность обнаружения на глубине слепых урановых рудных тел. Высокие содержания Рb и Мо в ореолах свидетельствуют о наличии интенсивного гидротермального привноса, который подтверждается также наличием в районе ореола окварцованных и серицитизированных порфиров.

В дальнейшем на участке были пройдены на двух горизонтах квершлагги, вскрывшие богатые слесы урановые рудные тела.

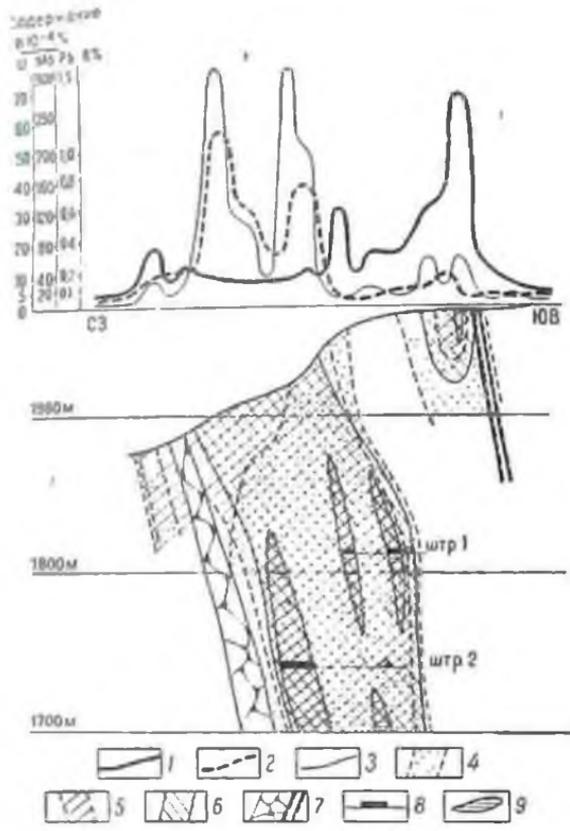


Рис. 97. Первичные ореолы слепых урановых рудных тел на участке № 3

1 — кривая распределения урана в делювиальных отложениях над слепыми рудными телами; 2 — то же, для свинца; 3 — то же, для молибдена; 4 — граница ореола рассеяния урана в коренных породах; 5 — то же, для свинца; 6 — то же, для молибдена; 7 — разломы и тектонические нарушения; 8 — штервалы балансовых урановых руд, вскрытых горными выработками; 9 — урановые рудные тела

**Месторождение 4.** Это месторождение расположено в другом рудном районе на значительном удалении от месторождений 1 и 2. Выещающие породы, представленные бурями фельзит-порфирами среднедевонского возраста, разбиты многочисленными сбросами и разломами различных направлений.

Оруденение контролируется дизъюнктивными нарушениями с различными (как крутыми, так и сравнительно пологими) углами падения. Рудные тела в большинстве случаев являются слепыми. Помимо вострава, в них присутствует молибденит, иногда в значительных количествах. На поверхности над некоторыми рудными телами отмечаются небольшие  $\gamma$ -аномалии (площадью до первых десятков квадратных метров, интенсивностью до 100 мкp/ц), имеющие обычно

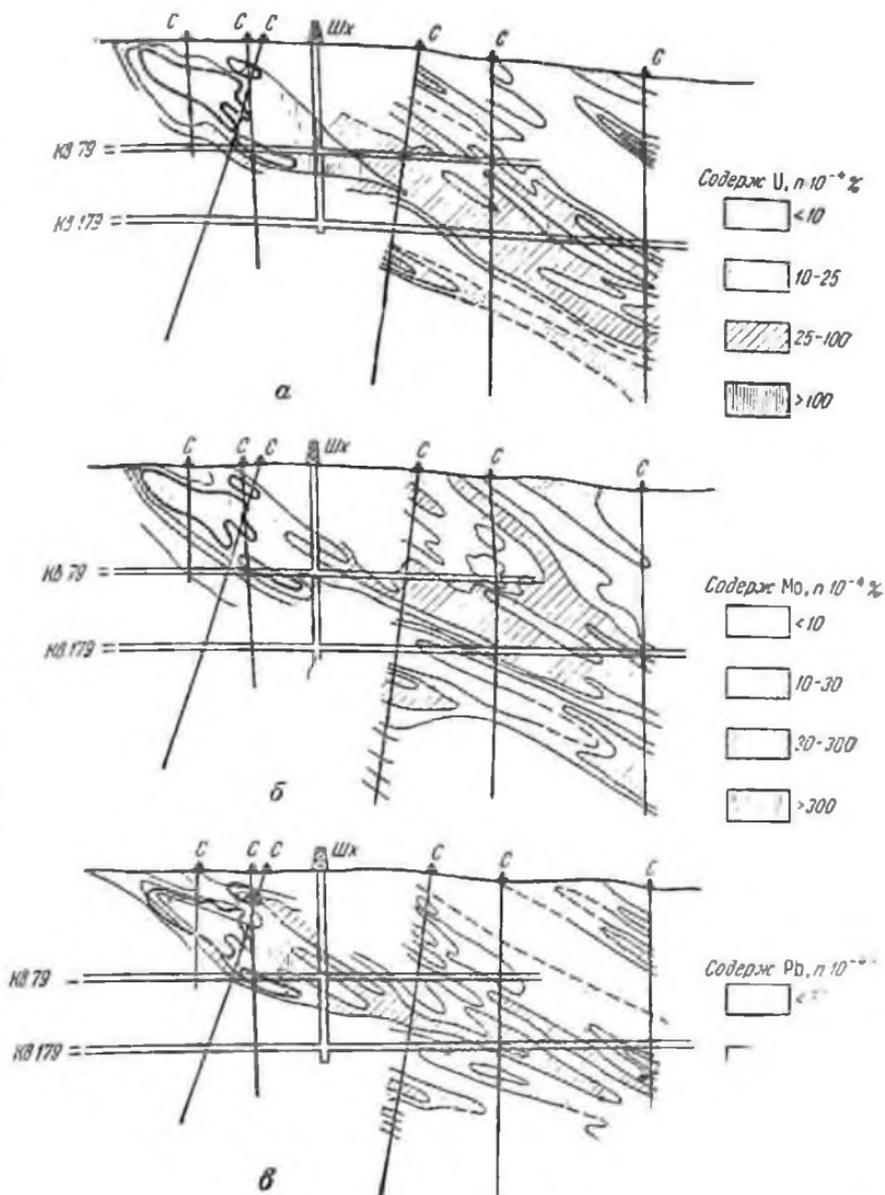


Рис. 98. Первые ореолы рассеяния урана (а), молибдена (б) и свинца (в) в поперечном вертикальном разрезе месторождения № 4. Жирной линией показаны контуры рудных тел.

ранном

изометрическую форму и располагающиеся, как правило, над частично вскрытыми денудацией рудными телами. При их разведке по падению обнаруживаются самостоятельные слепые рудные тела, залегающие на глубине 30—100 м от поверхности (рис. 98).

Изучением кернового материала и подземных выработок установлено наличие вокруг рудных тел широких и интенсивных ореолов рассеяния урана и молибдена и менее четких ореолов рассеяния свинца, вытягивающихся вверх по восстанию над слепыми рудными телами. В аллювиальных отложениях над слепыми рудными телами наиболее четко проявляются ореолы рассеяния молибдена. Они имеют на поверхности ширину до 60—100 м, а их длина по простиранию превосходит длину соответствующих рудных тел на 40—50 м. Содержание молибдена в ореолах достигает 30—10 ГФ.

Менее четко выражены на поверхности ореолы рассеяния свинца, представляемые отдельными разобщенными пятнами, располагающимися над рудными телами. Еще слабее проявлены ореолы рассеяния урана в виде отдельных точечных аномалий внутри контура молибденового ореола.

На поверхности в 250—300 м от известного рудного тела в сторону его висячего бока были зафиксированы выдержанные по простиранию ореолы рассеяния молибдена, в пределах которых отмечались небольшие свинцовые ореолы и отдельные точки с повышенной радиоактивностью. Заложена для их проверки скважина пересекла слепые рудные тела с балансовым содержанием урана.

## ГЛУБИННЫЕ ПОИСКИ ПОГРЕБЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАНА

Глубинные поиски урановых месторождений, перекрытых рыхлыми отложениями, начали проводиться в последние годы. Высокая стоимость глубинных поисков требует создания совершенной методики поисков, выбора наиболее рационального комплекса исследований и применения новых высокопроизводительных технических средств опосредования.

Основные положения методики глубинных поисков погребенных рудных месторождений, в том числе и урановых, для условия степных районов СССР изложены в коллективной работе «Глубинные поиски рудных месторождений» (1963).

В настоящей главе на основе опыта, накопленного производственными и научно-исследовательскими организациями, рассматриваются основные положения методики глубинных поисков погребенных урановых месторождений для равнинных и мелкогорных районов СССР.

Поиски погребенных урановых месторождений проводятся на закрытых площадях, под которыми понимаются области с двухъярусным строением: цоколь сложен древними интенсивно дислоцированными осадочными, метаморфическими и магматическими комплексами, чехол представлен более молодыми осадками, залегающими в большинстве случаев горизонтально.

В настоящее время глубинные поиски проводятся в промышленно освоенных рудных районах и направлены в первую очередь на выявление в породах нижнего структурного яруса аналогов известных месторождений с установленными поисковыми критериями и признаками. Практический интерес для глубинных поисков представляют также рудные тела на разведываемых и эксплуатируемых месторождениях урана, погребенные под мощным чехлом рыхлых отложений.

Во многих закрытых районах Советского Союза, характеризующихся развитием рыхлых отложений, широко распространена кора выветривания по породам нижнего яруса. Все разнообразие петрографического состава (магматических, осадочных и метаморфических) в формировании трех горизонтов коры выветривания: щебнистого, пестроцветного глинистого. Каждый горизонт различен и зависит от условий формирования коры гипергенных процессов и степени денудации. Кора выветривания встречается относительно редко. На возвышенных участках обычно сохраняются только нижние (щебнистые) горизонты коры; в депрессиях и на равнинных участках — средние

(пестроцветные глинистые) горизонты. На локальных площадях встречается каолиновый горизонт.

В некоторых районах, приуроченных к современным или древним речным долинам и абразионным морским побережьям, кора выветривания полностью эродирована.

## 1. ПОПСКОВЫЕ ПРИЗНАКИ ПОГРЕБЕННЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

**Прямые поисковые признаки.** На поверхности прямые поисковые признаки погребенных урановых месторождений отсутствуют. Поисковыми признаками перекрытых месторождений могут быть первичные ореолы, вторичные ореолы и потоки рассеяния урана в коре выветривания, рыхлых отложениях, природных водах, реже в растении.

Характерной особенностью литохимических, гидрохимических и газовых ореолов рассматриваемых месторождений является их полное или почти полное экранирование рыхлым покровом и связанное с этим отсутствие либо крайне слабое проявление ореолов на дневной поверхности, исключающее возможность эффективного использования обычных радиометрических методов поисков.

Погребенные первичные литохимические ореолы рассеяния урановых месторождений на участках отсутствия коры выветривания являются прямыми поисковыми признаками. Морфология, параметры и особенности их развития подробно изложены в гл. XIV. При поисках урановых месторождений по первичным ореолам рассеяния опробование ведется на уровне пород складчатого фундамента.

Погребенные вторичные литохимические остаточные ореолы рассеяния развиваются в древней коре выветривания; они встречаются в любых современных климатических условиях (пустыни, степи, тайга) и являются наиболее устойчивым поисковым признаком. В периоды формирования коры выветривания происходило рассеяние урана и сопутствующих элементов из рудных тел и образование вторичных ореолов рассеяния в щебенчатом пестроцветном глинистом и обеленном каолиновом горизонтах.

По своей природе погребенные остаточные ореолы рассеяния являются смешанными (солевыми и механическими), как правило, с преобладанием солевых. По мере удаления от рудных тел содержание полезных компонентов убывает до уровня геохимического фона, вместе с тем резко увеличивается площадное распространение ореола.

Так, вторичный ореол рассеяния одного рудопроявления радиоактивных элементов распространяется по остатанию от рудного тела в пределах пестроцветной глинистой коры выветривания почти

на 100 м, а ширина его более, чем в 20 раз превышает горизонтальную мощность рудной залежки (рис. 99\*).

На верхнего обеленного каолинового горизонта коры выветривания, где интенсивность проявления гипергенных процессов максимальна, большинство рудных элементов выщелочено и вторичные ореолы резко ослаблены.

Следовательно, наличие вторичных ореолов рассеяния в коре выветривания пород нижнего структурного яруса является благоприятным поисковым признаком, облегчающим выявление погребенных месторождений. Благодаря тому что размеры вторичных ореолов

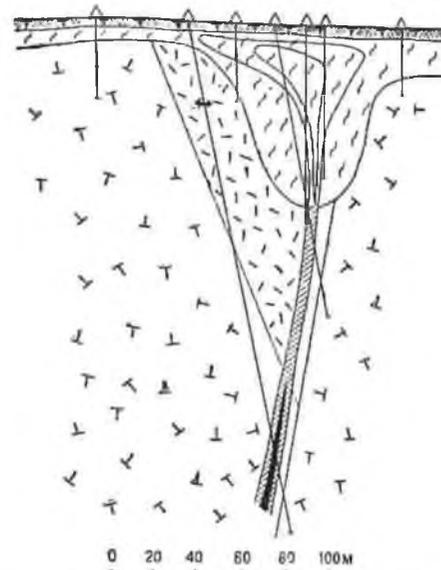


Рис. 99. Вторичный ореол рассеяния урана в пестроцветной коре выветривания

1 — кора выветривания; 2 — туфы; 3 — туфоконгломаты; 4 — рудное тело; 5 — первичный ореол рассеяния; 6 — вторичный ореол рассеяния; 7 — скважины

рассеяния в несколько раз превосходят параметры их первичных ореолов, допустимо разрежены без ущерба для эффективности работ. Кроме того, рассеяния более приближены к дневной поверхности, что позволяет производить опробование на большей глубине.

\* Рисунки к гл. XV заимствованы из сборника «Глубинные поиски рудных месторождений». Госгеолтехиздат, 1963.

Погребенные и открытые вторичные литохимические палеоэпигенетические ореолы рассеяния имеют меньшее значение при глубинных поисках. Открытые палеоэпигенетические ореолы рассеяния обычно развиваются лишь в определенных палеоклиматических условиях при небольшой мощности рыхлых отложений. Погребенные палеоэпигенетические ореолы рассеяния урана образовались в соответствующих палеоклиматических условиях (во время перерыва осадкоаккумуляции) в отложениях малой мощности. Формирование палеоэпигенетических ореолов рассеяния зависит от многих факторов: мощности и состава рыхлых отложений, глубины залегания поверхностных и подземных вод, климата, неотектоники, физико-химических свойств рудовмещающих минералов и т. д. Определенные закономерности в формировании погребенных палеоэпигенетических ореолов пока не установлены. Но в ряде случаев (см. рис. 99) в элювиально-делювиальных лёссовидных суглинках мощностью около 2,0 м повышенное содержание урана фиксировалось на уровне не более 0,5 м выше кровли пестроцветной коры выветривания. В другом случае кора выветривания была перекрыта неогеновыми озерными глинами мощностью 0,7—1,0 м, и эпигенетический ореол рассеяния четко обнаруживался на поверхности глин. Эти примеры показывают, что связь вторичных палеоэпигенетических ореолов рассеяния с определенными горизонтами не выявляется. Поэтому данный тип ореолов является не очень надежным поисковым признаком, и на него не следует ориентироваться при поисках, учитывая его, однако, при оценке геохимических аномалий.

Погребенные литохимические потоки и ореолы рассеяния проявляются в ряде районов Советского Союза в пределах современных и древних озерно-аллювиальных равнин. В условиях равнин и мелкогорий, основных районов проведения глубинных поисков, погребенные потоки и ореолы рассеяния встречаются редко. Значительно чаще в определенной геохимической обстановке могут наблюдаться экзогенные аккумуляции в рыхлых отложениях. Характерными признаками потока и ореола рассеяния является его избирательная приуроченность к делювиально-пролювиальным, аллювиально-пролювиальным осадкам. Не исключена возможность формирования механических и солевых палеопотоков и ореолов рассеяния в областях древних долин. Не каждая радиоактивная и уранометрическая аномалия в рыхлых отложениях имеет пространственную и генетическую связь с урановым оруденением. Довольно часто эти аномалии образуются в молодых и древних долинах за счет механического сноса обломков пород с повышенными содержаниями радиоактивных элементов.

В благоприятных геологических и палеоклиматических условиях литохимические потоки и ореолы рассеяния могут служить рекогносцировочным поисковым признаком погребенных месторождений.

Гидрохимические ореолы и потоки и ореолы рассеяния. Образованию гидрохимических ореолов и потоков и ореолов рассеяния могут способствовать следующие факторы:

а) наличие в зоне гипергенеза хорошо растворимых урановых соединений и минералов;

б) наличие глубоко промываемых структур, облегчающих доступ подземных вод к рудным телам и их ореолам;

в) определенный химический состав вод и замедленный водообмен, обеспечивающий длительное соприкосновение подземных вод с рудным телом и водовмещающими породами.

Однако наличие верховодок приводит к значительному разбавлению растворов и, следовательно, затрудняет обнаружение по водным ореолам коренного оруденения.

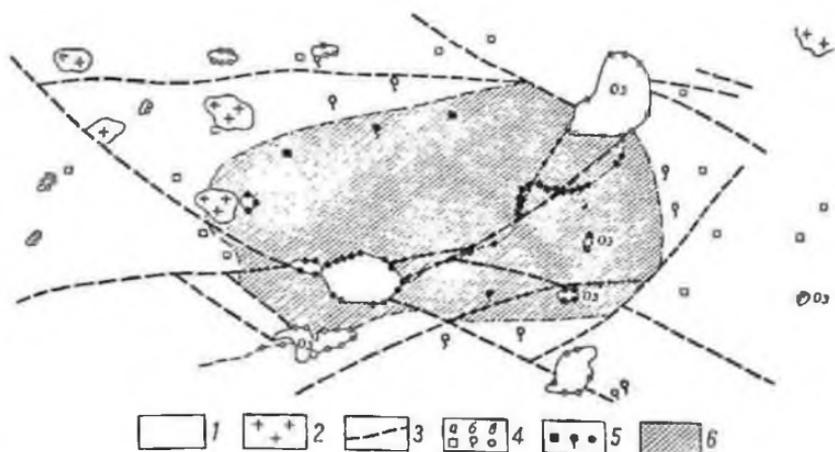


Рис. 100. Локализация перспективной площади по данным рекогносцировочной гидрохимической съемки (по З. И. Деевой)

1 — эффузивно-осадочные отложения палеозоя; 2 — гранитоиды; 3 — тектонические нарушения; 4 — опробованные водоузлиты: а — колодцы, б — родники, в — озера и реки; 5 — аномальное содержание урана в водах; 6 — перспективная площадь, околтуренная по данным радиогидрохимической съемки

В районах с хорошо развитой гидросетью выходы подземных вод иногда фиксируются как радиогидрохимические аномалии в низинных и прикляновых болотах, торфяниках, озерах и ручьях. Т радиогидрохимическое опробование источников вдоль побережья озер в одном из районов СССР, проведенное в процессе рекогносцировки поповской площади, позволило околтурить перспективный участок, в пределах которого содержание урана в водах достигло  $5 \cdot 10^{-5}$  г/л, и рекомендовать здесь проведение работ (рис. 100).

На закрытых площадях преимущественно подземные воды. Растворенные рудные элементы выносятся на поверхность на значительное расстояние. Разбраковывать радиогидрохимические аномалии значительно труднее, чем литохимические. При этом вода воды, отличающиеся повышенной ураноносностью, генетически связаны с погребенными месторождениями. Поэтому гидрохимические ореолы

п поток рассеяния имеют рекогносцировочное значение в начальные стадии глубинных поисков. Можно предполагать, что гидрохимические ореолы будут играть более существенную роль при глубинных поисках на участках, лишенных коры выветривания.

Газовые (радоновые и гелиевые) ореолы рассеяния. Ореолы этого типа развиваются в экранярующем рыхлом покрове при отсутствии газонепроницаемых прослоев и горизонтов верховодок. Кроме того, неблагоприятными факторами являются высокий уровень стояния грунтовых вод, хорошая растворимость радона и гелия в водах, приводящая к уменьшению их первоначальной концентрации и ряд других.

Специальные исследования показали, что погребенные ореолы радона практически полностью совпадают с литохимическими ореолами. Существовавшее ранее представление о более широком развитии газовых ореолов не подтвердилось. Вместе с тем по техническим признакам, о которых будет сказано ниже, выявление ореолов рассеяния радона сложнее, чем литохимических, в связи с чем этот поисковый признак имеет второстепенное значение.

До настоящего времени еще не установлен характер развития ореолов гелия вокруг уранового оруденения. Исходя из теоретических предпосылок, гелиевый ореол по сравнению с радоновым и литохимическими ореолами представляется наиболее широким. Однако многие вопросы, связанные с формированием, морфологией, параметрами гелиевых ореолов остались еще невыясненными. Поэтому сейчас преждевременно рассматривать их как прямой поисковый признак. Со временем, после получения дополнительных данных, возможно, что это положение будет пересмотрено.

Биогеохимические ореолы рассеяния. Использование этих ореолов ограничивается ландшафтно-геохимическими особенностями зоны гипергенеза и глубиной проникновения в грунт корневой системы опробуемых растений. В тундре, например, глубина проникновения корневой системы составляет 0—1 см, в степях 0,5—2 м, в песчаных пустынях 2—25 м. Исходя из общих представлений, последний случай наиболее благоприятен для использования биогеохимических ореолов как самостоятельный поисковый признак. Однако каких-либо научно-методических исследований в этом направлении проведено не было. До сих пор отсутствует фактический материал, позволяющий обосновать возможность выявления погребенного оруденения в данных условиях и определить основные положения методики биогеохимических поисков и оценки аномалий.

Таким образом, биогеохимические ореолы рассеяния имеют ограниченное значение при поисках погребенных месторождений урана.

Следовательно, главным прямым устойчивым поисковым признаком являются погребенные вторичные остаточные ореолы рассеяния, развитые в древней коре выветривания, ниже обеленного каолинового горизонта. На бескорых участках таким признаком служат первичные ореолы.

**Косвенные поисковые признаки.** Следует подчеркнуть, что роль косвенных признаков, особенно устанавливаемых с поверхности, при поисках погребенных месторождений значительно повышается. К косвенным поисковым признакам относятся: геофизические аномалии, сопутствующие элементы и минералы, гидротермальные изменения, современные и древние геоморфологические особенности и т. д.

Важное значение при поисках погребенных урановых месторождений имеют особенности проявления в физических полях самих месторождений, вмещающих их пород, рудоконтролирующих структур и т. д. Так, в некоторых рудных районах положительным признаком являются резко дифференцированные магнитные поля  $\Delta Z$  и  $\Delta T$  в связи с приуроченностью урановых месторождений к определенным литологическим комплексам пород, обладающих различной магнитной восприимчивостью. В других районах косвенным признаком могут служить линейно вытянутые магнитные аномалии, связанные с дайками диабазов, контролирующими урановое оруденение. При наличии в рудах сульфидной минерализации используются аномалии естественного поля, вызванной поляризации и др. Изучение магнитных, гравитационных и электрических полей пород нижнего структурного яруса осуществляется в процессе геологоструктурного картирования.

Не менее важную роль как косвенные поисковые признаки играют сопутствующие урану минералы и элементы, а также гидротермальные изменения пород, характерные для месторождений в данном рудном районе. Все эти признаки выявляются главным образом на основании изучения и опробования керна картировочных скважин.

В ряде случаев при поисках погребенных месторождений могут быть использованы геоморфологические признаки — рудный карст, пологие понижения и борозды над рудоконтролирующими структурами, унаследованные в рельефе синклиналильные прогибы, жерлы вулканов, выражающиеся в виде цирков, и т. п.

## 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ГЛУБИННЫХ ПОИСКОВ

Для каждого рудного района на основании изучения легко открываемых месторождений и рудолитов устанавливаются определенные закономерности в геохимических, структурных, магматических, геологических и геофизических условиях уранового оруденения. Они являются основой для выбора поисковых площадей и направлений работ. Однако отсутствие для большинства участков, особенно в районах с осадками, достоверных геологических карт сильно затрудняет в начальный период использование подобных поисковых критериев

и признаков. В связи с этим глубинные поиски сопровождаются составлением геологоструктурной схемы нижнего структурного яруса. На схеме отражаются наиболее благоприятные для локализации уранового оруденения комплексы пород, структуры, дизъюнктивные нарушения, малые впадины, в экзоконтактах которых располагаются урановые руды, и т. д. Геологоструктурные схемы позволяют более целенаправленно вести поиски, обоснованно выделять перспективные участки для детальных работ и с большей надежностью оценивать результаты поисков.

Для правильного выбора методов и технических средств поисков погребенных месторождений исключительно важное значение имеет выяснение положения в разрезе рыхлых образований так называемого представительного горизонта ополскования, под которым подразумевают горизонт максимального площадного и надежного развития ореолов рассеяния (рис. 101). Представительным горизонтом в районах повсеместного развития современной или древней коры выветривания являются соответственно алювиально-делювиальные образования или глинистая кора выветривания ниже обеленного каолинового горизонта.

В случае отсутствия коры выветривания поиски ведутся по первичным ореолам, а представительным горизонтом будет кровля пород фундамента. Если древняя кора выветривания или породы складчатого фундамента выведены на дневную поверхность, то пешеходные автомобильные и воздушные съемки надежно обеспечивают выявление ореолов рассеяния. При погружении представительного горизонта под рыхлый покров вторичные ореолы рассеяния могут быть выявлены только глубинными методами поисков. В этом случае главными факторами, определяющими не только методику работ и выбор технических средств, но и экономическую целесообразность проведения глубинных поисков, являются мощность и состав рыхлых отложений, перекрывающих представительный горизонт. Поисковое опробование, проведенное выше представительного горизонта, может оказаться безрезультатным и привести к пропуску погребенного уранового месторождения. Опробование нижних частей коры выветривания или кровли пород складчатого основания снижает эффективность поисков, удорожая их за счет излишней глубины шурфов и необходимости сгущения поисковой сети в связи с уменьшением размеров ореолов рассеяния с глубиной (см. рис. 101).

В районах с гумидным климатом в условиях развития автохтонных образований при наличии с поверхности зоны интенсивного выщелачивания урана и других рудных элементов представительным горизонтом являются алювиально-делювиальные образования ниже указанной зоны.

Для гидрохимических и газовых ореолов рассеяния погребенных урановых месторождений представительным горизонтом может быть, например, водоносный горизонт, лежащий в верхней части дезинтегрированных пород основания. Этот вопрос еще недостаточно изучен и требует уточнения.

В каждом рудном районе до начала массового проведения геологических поисков на погребенных урановых месторождениях и рудогоризонтов ставятся специальные исследования с целью выявления их горизонтов для поисков.

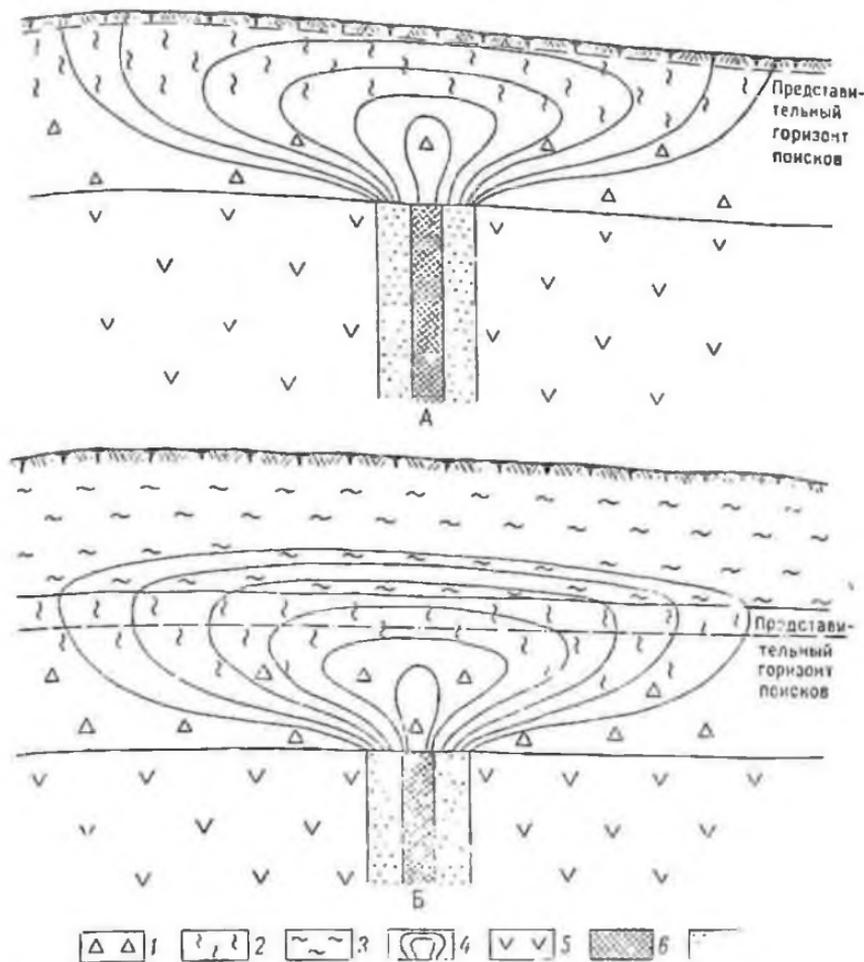


Рис. 101. Представительный горизонт опенкования (по А

а — открытый ореол рассеяния; б — погребенный ореол рассеяния; 2 — глинистая кора выветривания; 4 — изоконцентрация радиоактивных элементов; 5 — рудное тело; 7 — первичный ореол

Детальное изучение положения представительного горизонта или, как принято называть, районирование площадей по категории трудности опенкования для технических средств, глубинность

которых не превышает 25 м, является важным условием методически правильного и экономически целесообразного ведения глубинных поисков и входит составной частью в общий комплекс поисковых работ. Расчеты соотношений площадей с разной мощностью рыхлого чехла, выполненные для нескольких районов СССР, показывают, что затраты на предварительное районирование участка и проведение поисков методами и техническими средствами, соответствующими глубине залегания представительного горизонта, на 10—20% ниже затрат на радиометрические измерения на средней для данной площади глубине. Кроме того, применение указанной методики резко сокращает недостоверно опробованную площадь.

Литологический состав рыхлых отложений также во многом определяет возможность проведения  $\gamma$ -измерений в пределах представительного горизонта. Если в толще пород верхнего структурного яруса встречаются уплотненные горизонты (лентзы песков, гравеллитов, вязких глин), то снаряды поисковых агрегатов не достигают представительного горизонта, и такие участки даже при небольшой мощности рыхлого покрова (5—10 м) оказываются фактически неопробованными.

К настоящему времени производственными и конструкторскими организациями разработаны и созданы различные самоходные агрегаты, позволяющие вести опробование в пределах представительного горизонта при различных мощностях и составе перекрывающих отложений на глубине до 25 м (см. табл. 31).

Погребенные руды, залегающие на глубине 25—100 м и более, в настоящий период обнаруживаются при помощи колонкового бурения, осуществляемого самоходными установками типа СБУ-150, БСК-2-100 и др.

Для подобных глубоко погребенных участков районирование поисковой площади по категориям трудности опробования теряет актуальное значение.

Наряду с рассеянием полезного компонента в зоне гипергенеза и образующим вторичных ореолов в определенной геохимической обстановке происходит аккумуляция радиоактивных элементов в песчано-глинистых осадках верхнего структурного яруса. Например, при  $\gamma$ -поисках отмечаются аномалии, обусловленные накоплением урана в заглинованных породах, лигнитах, торфах, костных и древесных остатках и т. п. Такие экзогенные аккумуляции урана в рыхлых отложениях часто формируются вблизи пород с повышенным содержанием урана (кислые эффузивы, гранитоиды и т. д.).

Обычно они мешают проведению глубинных поисков, так как для установления их природы необходимо проведение значительных объемов горно-буровых работ. Самостоятельное промышленное значение такие аккумуляции урана имеют лишь в некоторых районах, где они являются объектом специальных поисков.

Работы, связанные с поисками погребенных урановых месторождений, можно разделить на ряд этапов\*, в каждом из которых должны быть решены определенные геологические задачи:

I. Выделение для глубинных поисков перспективных площадей и их полевая рекогносцировка.

II. Подготовка площадей для поисков.

III. Собственно поиски.

IV. Оценка аномалий и рудопроявлений.

Деление это условно, так как работы разных этапов могут проводиться одновременно не только в пределах одного и того же района, но и на сравнительно небольших участках. Тем не менее предусмотрительная этим делением последовательность работ имеет важное организационно-методическое значение и должна строго соблюдаться при выполнении работ по этапам поисков. Последовательное проведение работ по этапам позволяет более эффективно вести глубинные поиски, выделять наиболее перспективные участки для постановки детальных исследований и исключать площади мало перспективные либо с большой мощностью рыхлых отложений, недоступные для поисков с применением современных технических средств.

### 3. ВЫДЕЛЕНИЕ ДЛЯ ГЛУБИННЫХ ПОИСКОВ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ПЛОЩАДЕЙ И ИХ ПОЛЕВАЯ РЕКОГНОСЦИРОВКА

На этом этапе работ получают исходные данные для выделения перспективных площадей для глубинных поисков погребенных месторождений. Специально изучаются возраст, вещественный состав и мощность рыхлых образований с целью выбора рациональной методики и технических средств поисков. На основе дополнительных полевых исследований уточняют представление о геологическом строении изучаемой площади. Сбор таких сведений, как правило, производят за один-два года до проведения последующих этапов.

Предварительное выделение перспективных площадей проводится на основе анализа имеющихся по району геологических, геофизических, металлогенических, геохимических данных с учетом всех предшествующих поисковых работ на полезные ископаемые. На геологических картах показаны большей частью как области разноразличных

\* Согласно «Методическим указаниям по проведению поисков и разведочных работ на уран», (1961) весь процесс поисков соответствует поисковой и частично поисково-разведочным этапам. Из-за специфических особенностей глубинные поиски разделяются по задачам и характеру выполняемых работ на этапы, которые не следует смешивать с этапами общего геологоразведочного процесса.

более древних отложений, поэтому соответствующие отдельные участки приходится уточнять с использованием геомагнитных и гравитационных карт. По этим данным часто удается получать первые представления о строении фундамента на закрытой площади и проследживать в общих чертах основные структурные элементы. Такой анализ завершается составлением геологической схемы складчатого фундамента масштаба 1 : 100 000 со снятым чехлом рыхлых отложений.

Существенную помощь для выделения отдельных перспективных площадей оказывают данные магниторазведки и гравитразведки. Многочисленными работами установлено, что в ряде районов Советского Союза урановые месторождения, пространственно тяготеющие к участкам сложной дифференцированного магнитного поля, располагаются в зонах пониженных значений магнитного поля, в других случаях урановое оруденение приурочивается к краевым частям локальных минимумов гравитационного поля, обусловленных экстремивными телами.

Систематизируются и обобщаются данные по шлиховым, металлометрическим, гидрохимическим съемкам и другим специальным исследованиям.

На основании всех указанных материалов с учетом поисковых критериев выделяются для проведения глубинных поисков наиболее перспективные участки размером обычно в несколько сотен квадратных километров. Целесообразно, чтобы выделенная перспективная площадь примерно в полтора раза по размерам превышала площадь, на которой намечается проведение глубинных поисков. Это позволит в дальнейшем (на втором этапе работ) иметь необходимый резерв для исключения из опоскования отдельных участков с большой мощностью рыхлого чехла, недоступных для поисков с применением современных технических средств.

Одновременно с уточнением геологического строения складчатого основания собираются и анализируются все имеющиеся сведения о рыхлом покрове, его распространении, мощности, литологическом составе, генезисе и т. д. Для этих целей используются топографические и геоморфологические карты, аэрофотоматериалы, схемы развития четвертичных отложений, данные по вертикальным электрическим зондированиям и ранее пробуренным скважинам. В сельскохозяйственных районах значительный интерес представляют планы земельных участков, на которых отражаются посевные площади, часто расположенные на участках, перекрытых рыхлыми отложениями мощностью более 2 м. При дешифрировании аэрофотоснимков и гипсометрической основы довольно точно выделяются выходы пород нижнего структурного яруса и участки с мощностью рыхлых отложений до 2—5 м. Как показал опыт работ в степных и горных районах страны, площади, перекрытые рыхлыми отложениями свыше 2—5 м, по данным дешифрирования аэрофотоснимков оконтуриваются условно и подлежат уточнению с помощью ВЭЗ, симметричного электропрофилирования, картировочного бурения. Все эти

сведения дают возможность составить общее представление о характере рыхлого чехла и примерном изменении его мощности.

В результате полевой рекогносцировки, сопровождаемой при необходимости небольшим объемом бурения, уточняются основные черты геологического строения района, поисковые критерии уранового оруденения и контуры перспективных площадей.

Результаты систематизации фондовых и фактических материалов (полученных при полевой рекогносцировке) оформляются в виде геологической карты и схемы районирования перспективной площади по условиям ведения поисков (обычно в масштабе 1 : 100 000), которые служат основой для проектирования глубинных поисков погребенных урановых месторождений.

#### 4. ПОДГОТОВКА ПЛОЩАДЕЙ ДЛЯ ПОИСКОВ

Целью работ данного этапа является изучение геологического строения складчатого фундамента для выделения локальных участков под детальные глубинные поиски, а также проведение районирования площади по категориям трудности опоскования.

Эффективность глубинных поисков во многом зависит от того, имеются ли для данной поисковой площади геологоструктурная схема складчатого основания и карта глубин залегания представительного горизонта.

Главное внимание при подготовке площадей уделяется выявлению благоприятных рудоконтролирующих факторов, характерных для ожидаемых на данной площади месторождений. Картирование пород нижнего структурного яруса на закрытых площадях имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать в процессе проведения работ. Начало составления геологоструктурной схемы складчатого фундамента относится к предполевому периоду, когда осуществляется дополнительный сбор и анализ всех геологических, аэросъемочных, геофизических и геохимических материалов (наиболее крупных масштабов), полученных в результате ранее выполненных работ.

Камеральная обработка всех этих собранных материалов осуществляется составлением рабочей геологической схемы 1 : 50 000—1 : 25 000 с накладками (выполненными на которых отражены магнитные и гравитационные аномалии, геохимических, гидрохимических и газовых показателей отдельных объектов, результаты денсификации, сейсмических исследований и т. д. Геологические схемы систематически уточняются по мере получения новых данных и служат основой для проведения поисковых и оценочных работ в районе.

Полевые работы второго этапа включают широкий комплекс геофизических исследований, проводимых с опережением остальных видов работ — геологических маршрутов и бурения с геохимическим изучением керна. Геофизические исследования (магнитораз-

ведка, электроразведка, гравиразведка) выполняются на всей площади независимо от степени ее обнаженности.

Геологические маршруты проводятся на участках с маломощным чехлом рыхлых отложений, а также по всем опорным профилям, на которых бурение сочетается с геофизическими работами. В последнем случае особое внимание уделяется интервалам профилей, характеризующимся высокими значениями кажущихся сопротивлений, где наиболее вероятны выходы пород нижнего структурного яруса. Геологические наблюдения на открытых участках сопровождаются пешеходной  $\gamma$ -съемкой. Они ведутся по профилям с непрерывным осмотром оврагов, рек, балок и других мест, где можно предполагать наличие выходов коронных пород. Маршрутные наблюдения привязываются к пикетам и наносятся на план профилей в масштабе 1 : 50 000 или 1 : 25 000.

По данным электроразведочных и магниторазведочных наблюдений выбираются места для рационального размещения скважин на изучаемой площади.

Картировочные скважины колонкового бурения проходятся по опорным профилям вкrest простирания ожидаемых рудоносных структур. Необходимо подчеркнуть двойное назначение картировочных скважин — они служат как для прослеживания пород нижнего структурного яруса, так и для изучения пород рыхлого чехла. Следовательно, при выборе мест заложения скважин должны учитываться оба эти фактора. Точки заложения скважин в основном должны выбираться в областях минимальных и устойчиво умеренных значений кажущихся сопротивлений, отвечающих максимальной и средней мощности рыхлого покрова. Вместе с тем эти точки располагаются в характерных магнитных полях с таким расчетом, чтобы каждая скважина (с учетом интерпретации магниторазведочных данных) освещала геологическое строение по простиранию аномалии и вкrest его. На рис. 102 приводится пример размещения картировочных скважин по совокупности геолого-геофизических данных. Картировочные скважины проходятся со сплошным отбором керна и обязательным  $\gamma$ -каротажем. Иногда для корреляции сложных геологических разрезов в скважинах с низким выходом керна проводят электрокаротаж.

Для установления нормального геохимического фона и оковтуривания возможных ореолов рассеяния рудных элементов производится литохимическое опробование картировочных скважин пунктирной бороздой с интервалом в 2 м, а монотонные толщи с интервалом 5 м. Отобранные пробы весом около 200 г поступают на спектральный анализ для определения широкого круга элементов подобно тому, как это делается при поверхностных литохимических съемках. Особое внимание уделяется элементам, сопутствующим в данном районе урановому оруденению. Часть проб (5—10%) направляется на перлово-люминесцентный анализ.

В результате совместного рассмотрения и обобщения всех геологических, геофизических и геоморфологических материалов, собран-

ных в камеральный и полевой периоды, составляется рабочий вариант геологоструктурной схемы складчатого фундамента с разрезами по опорным профилям. Анализ геологоструктурной схемы и всего собранного фактического материала позволяет более обоснованно выделить перспективные участки для проведения детальных глубинных поисков.

В процессе работ второго этапа при подготовке площадей для поисков также уделяется большое внимание изучению мощности,

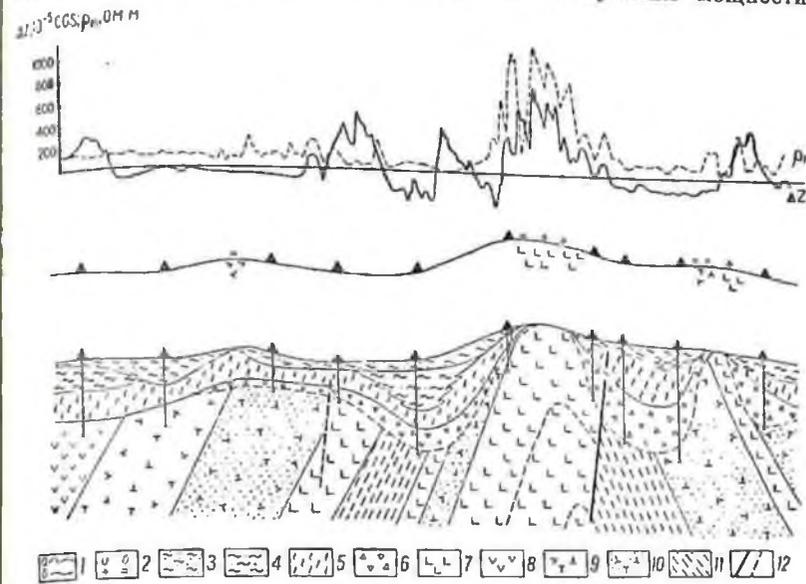


Рис. 102. Выбор мест заложения скважин картировочного бурения по совокупности геолого-геофизических данных (по А. С. Ключкову, 1963 г.)

1 — графики электрогеофизирования ( $\rho_k$ ) и магниторазведки ( $\Delta Z$ ); 2 — выходы палеозойских пород; 3 — четвертичные делювиально-пролювиальные отложения; 4 — миоценовые осевые глин; 5 — глинистая кора выветривания; 6 — щебенчатая кора выветривания; 7 — роговообманковые порфириты; 8 — туфоагломераты; 9 — туфы андезитовых порфиритов; 10 — туфопесчаники; 11 — кремнистые алевролиты; 12 — разломы

состава и происхождения рыхлых образований. Для использования в первую очередь результаты геологических и геофизических наблюдений, картировочное бурение, вертикальное электрическое зондирование, вертикальное электрическое зондирование районов целесообразна замена ВЭЗ симметричным зондированием, осуществляемым совместно с картированием, осуществляемым совместно с картированием в небольшом объеме, что значительно сокращает время на выполнение полевых работ, интерпретации материалов, не в ущерб эффективности исследований. На основе всех полученных данных составляется карта районирования площади по категориям трудности опосредования в масштабе 1 : 50 000—1 : 25 000.

При ее составлении не используются геолого-геофизические разрезы по опорным профилям, карта изом, гипсометрическая основа и аэрофотоснимки. Районирование поисковой площади проводится в генерализованных контурах в соответствии с принятыми категориями трудности (рис. 103). Понятие о категориях трудности опоскования

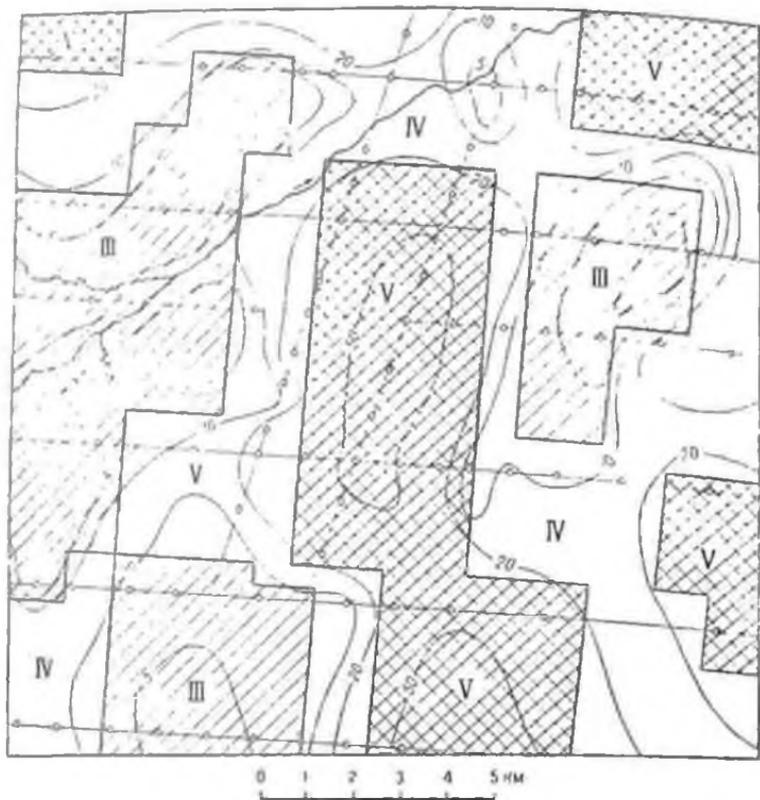


Рис. 103. Карта районирования площади по категориям трудности опоскования

Горизонталы — изопахиты рыхлых отложений; римскими цифрами обозначены площади различных категорий трудности ведения поисковых работ; линии с кружками — опорные профили со скважинами

в зависимости от особенностей развития вторичных ореолов рассеяния и мощности дальнеринносных отложений введено в практику В. И. Красниковым и Ю. В. Шарковым (Красников, 1959). Этот геолого-геохимический принцип целесообразно дополнить характеристикой применяемых методов и технических средств поисков, определяющих возможность обнаружения вторичных ореолов на глубине. В качестве примера в табл. 32 приводятся характеристика категорий трудности и соответствующие им методы и технические средства поисков для одного из районов Советского Союза.

Таблица 32

## Группирование площадей по категориям трудности опонскования для одного из районов

Категория трудности	Краткая характеристика площади	Тип ореолов рассеяния	Методы и технические средства ведения поисков	Ориентировочная производительность на агрегат за смену
I	Обнаженные участки коренных пород (древней коры выветривания) с маломощным (до 0,5 м) покровом элювально-делювиальных отложений	Открытые нормальной интенсивности	Пешеходная, автомобильная, воздушная γ-съемка	
II	Участки с покровом рыхлых, главным образом делювиальных отложений мощностью до 2 м	Ослабленные у дневной поверхности	Шпуровая γ-съемка с гидрозадавливателем до глубины 1,5 м	400 физических точек
III	Участки с покровом рыхлых, главным образом дальнепреносных отложений мощностью от 2 до 5 м	Резко ослабленные и неглубоко погребенные	Глубинная γ-съемка с виброагрегатом СВА-2	1300 м
IV	То же с мощностью рыхлых отложений от 5 до 25 м	Погребенные	Глубинная γ-съемка с агрегатом СУГП-10	500 м
V	То же с мощностью рыхлых отложений более 25 м	Глубоко погребенные	γ-Каротаж колонковых и шпуровых скважин с применением станков: УГБ-50А до 50 м, БСК-2-100, СБУ-150 до 100 м	100 м, 60 м, 40 м

На карте районирования обязательно выделены участки отсутствия коры выветривания, с большой мощностью отложений, развития несков, гравелитов, конгломератов, площади, недоступные для опонскования самими методами СВА-2, СУГП-10, из опонскования исключены участки геологически перспективные, то на них проводятся поиски с помощью колонкового бурения.

Карта районирования служит основой для рационального выбора методов и технических средств глубинных поисков.

## 5. СОБСТВЕННО ПОИСКИ

В задачу этого этапа входит выявление и предварительная оценка радиоактивных аномалий, возможных ореолов урановых месторождений и выделение перспективных участков для детальных поисков.

Главные методические вопросы данного этапа сводятся к выбору ведущего радиометрического метода, расчету оптимальной плотности поисковой сети, определению геохимического фона и нижних аномальных значений, а также оценке достоверности проведенных поисков.

Поиски осуществляются по профилям, ориентированным вкrest простирания ожидаемых рудовоспных структур, путем опробования на уровне представительного горизонта шпуров, или скважин, расположенных на профилях через равные интервалы.

Ведущим радиометрическим методом поисков являются  $\gamma$ -измерения в шпурах. Создание сцинтилляционной аппаратуры, обладающей высокой эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения, дало возможность полностью отказаться от амацационной съемки, заменив ее  $\gamma$ -каротажем шпуров, который может выполняться в увлажненных и обводненных породах. Воспроизводимость  $\gamma$ -каротажа значительно выше, чем амацационной съемки. Среднеквадратичная ошибка, подсчитанная по ряду районов, определяется величиной  $\pm 2,0$  мкр/ч.

Широкому внедрению амацационной съемки при глубинных поисках мешают следующие обстоятельства.

1. Концентрация радона в горных породах меняется в течение сезона в зависимости от многих трудно учитываемых факторов: колебания атмосферного давления, температуры, относительной влажности, литологического состава, трещиноватости и обводненности горных пород. При проведении амацационной съемки не сохраняется идентичность условий отбора и измерений проб, что влияет на воспроизводимость наблюдений и выделение аномальных значений. Достаточно отметить, что по ряду районов Советского Союза среднеквадратичная ошибка, подсчитанная по большому количеству измерений, достигала 8—24 аман, хотя методические работы выполнялись правильно.

2. Взятая проба почвенного воздуха характеризует собой концентрацию радона в неизвестном усредненном объеме горных пород, зависящем от ряда трудно учитываемых факторов. (При  $\gamma$ -каротаже шпуров участки повышенной активности точно привязываются по глубине).

3. Амацационной съемкой выявляется большое число аномалий, не связанных с коренным оруденением, а обусловленных тектоническими зонами дробления, трещиноватости и т. п. Разбраковка рудовоспных аномалий требует затрат значительного объема горно-бурильных работ.

4. На обводненных участках отбор проб воздуха производится лишь из верхней части шпура (выше уровня грунтовых вод), в то время как  $\gamma$ -измерения выполняются на всю глубину шпура.

Применение сцинтилляционной аппаратуры устраняет недостатки амацационной съемки.

Разные размеры ореолов рассеяния различных генетических типов жильных и штокерковых месторождений урана не позволяют применять универсальные масштабы поисковой сети для всех районов СССР.

В связи с высокой стоимостью глубинных поисков к оптимальной сети наблюдений предъявляются следующие требования: расстояние между профилями и точками наблюдений на них должно быть максимальным, но надежно гарантирующим (с вероятностью, близкой к единице) выявление ореолов погребенных урановых месторождений.

Для каждой конкретной рудной провинции оптимальная поисковая сеть определяется в зависимости от ожидаемых размеров вторичных ореолов, которые в свою очередь связаны с морфологией и масштабами запасов искомого оруденения. При этом учитывается коэффициент рассеяния урана в зоне гипергенеза, который выбирается эмпирическим путем или по аналогии с другими районами. В качестве примера на рис. 104 приведены размеры вторичных ореолов рассеяния урановых месторождений и рудопроявлений одного из районов Советского

Союза. Наиболее вероятные значения (моды) длины и ширины ореолов соответственно равны 410 и 110 м. Размеры рассеяния, связанные с непромышленной минерализацией, значения мод. Для рудопроявлений и мелких месторождений они примерно равны наиболее вероятным значениям месторождений значительно их превышают. Они согласуются с расчетными, полученными для месторождений с рядовыми рудами (Красишков, 1959). Коэффициенте рассеяния в ореоле, равном 20 м (Соловьев, 1959). Таким образом, если глубинные поиски в данном районе направлены на выявление средних и крупных месторождений или рудных узлов, расстояние между профилями принимается равным 400—600 м. При поисках средних и мелких месторождений это расстояние

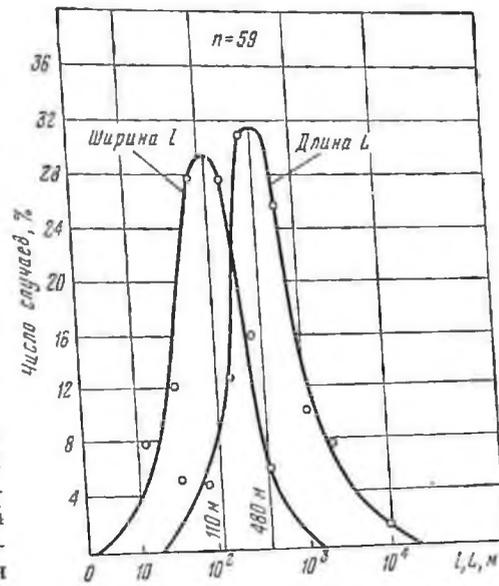


Рис. 104. Параметры вторичных ореолов рассеяния месторождений и рудопроявлений радиоактивных руд

составляет 200—300 м. Для выявления отдельных рудных тел в пределах рудных полей и на флангах месторождений расстояние между профилями сокращается до 100 м и менее.

Аналогичным образом рассчитывается расстояние между точками наблюдений. При наиболее вероятной ширине ореола 110 м расстояние между точками наблюдений выбирается равным 50 м (ореол будет зафиксирован не менее чем двумя точками).

Поисковые работы, выполняемые в разных масштабах при различной густоте сети наблюдений, обладают некоторыми специфическими особенностями, которые заключаются в следующем. При мелко-масштабных съемках геологической основой служат геолого-структурные схемы, составляемые на втором этапе. Поиски проводятся на значительных по размерам площадях, причем участки с большой мощностью рыхлых отложений и с неблагоприятными условиями для проходки шпуров исключаются из опискования. Работы завершаются выделением перспективных участков для детальных поисков.

При детальных поисках изучение пород нижнего структурного яруса осуществляется параллельно с поисковыми работами, охватывающими всю площадь исследования, независимо от мощности рыхлого покрова. Бурение носит поисково-картировочный характер.

Важным методическим вопросом при поисках является изучение геохимического фона радиоактивных элементов в породах и выделение аномалий. Выбор чрезмерно низкой границы аномальных содержания, лежащей ниже естественного уровня колебаний геохимического фона, может привести к выделению множества мелких аномалий, на оценку которых будут затрачены неоправданно большие объемы работ. Нежелателен и выбор слишком высокой границы аномальных значений, не гарантирующий от пропуска концентрации радиоактивных элементов, связанных с ореолами рассеяния. Наиболее обобщенно принимать за нижнее аномальное значение следующую величину содержания радиоактивных элементов:

$$I_a = I_{\phi} + \frac{3S}{\sqrt{n}},$$

где  $I_{\phi}$  — наиболее вероятное значение суммарной  $\gamma$ -интенсивности в породе;

$S$  — стандартное отклонение;

$n$  — количество коррелируемых точек.

В случае логнормального распределения за нижнее аномальное значение содержания химических элементов  $C_a$  принимается величина

$$C_a = C_{\phi} \cdot e^{\frac{3}{\sqrt{n}}},$$

где  $e$  — стандартный множитель.

Определение  $I_{\phi}$ ,  $S$  или  $e$  производится путем статистической обработки результатов радиометрических поисков.

В результате глубинных поисков выявляется большое количество радиоактивных аномалий самого различного генезиса. Много радио-

активных аномалий обнаруживается в породах верхнего структурного яруса и коры выветривания, развитой по кислым разностям эффузивные и интрузивных пород. Значительная часть выявленных аномалий не имеет практической ценности, однако, не исключена возможность, что даже самая незначительная аномалия может указывать на наличие уранового месторождения. Поэтому все без исключения выявленные радиоактивные аномалии подвергаются предварительной оценке. По своему характеру все признаки, используемые для предварительной оценки аномалий, можно подразделить на радиометрические — интенсивность  $\gamma$ -поля, характер его изменения с глубиной, природа радиоактивного начала, и геологические — среда развития аномалии, характер взаимоотношения с другими аномалиями.

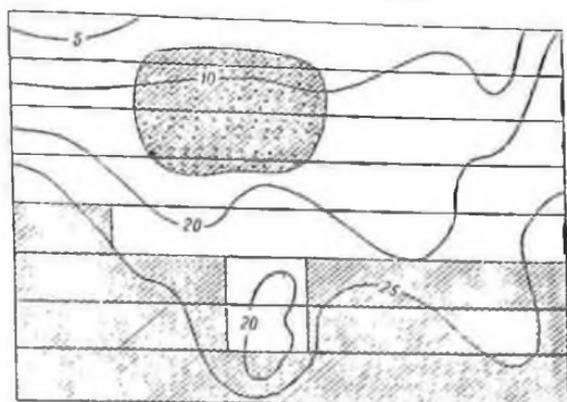


Рис. 105. Фрагмент карты достоверности ополскавания участка

1 — достоверно ополскаваемые площади, 2 — недостоверно ополскаваемые площади, 3 — песчаные горизонты, 4 — изопахты рыхлых отложений; 5 — почвенные профили



На основании предварительной оценки все выявленные аномалии по своей практической значимости обычно подразделяются на три группы:

1) перспективные аномалии, характеризующиеся относительно высокой  $\gamma$ -активностью, значительными размерами по простиранию и отчетливым возрастанием радиоактивности с глубиной и по отношению часто к коре выветривания осадочных, осадочно-генных и вулканогенных пород;

2) безрудные аномалии, отличающиеся низкой  $\gamma$ -активностью, небольшими размерами и резким падением и приуроченные, например, к рыхлым

3) сомнительные аномалии, природа и принадлежность которых остались невыясненными.

Аномалии первой группы заслуживают дальнейшего изучения, вторая группа выбраковывается. Аномалии третьей группы подвергаются дополнительному изучению с тем, чтобы определить их принадлежность к первой или второй группам.

Эффективность глубинных поисков зависит, в частности, от достоверности проведенного ополскавания. Недостоверно ополска-

важными называются также площади, в пределах которых  $\gamma$ -измерения проводились выше представительного горизонта. Оценка достоверности глубинных поисков выполняется в процессе работ на основании геологической документации геохимических проб, анализы карты районирования, глубины задавливания шпура и данные о геохимическом фоне пород.

Так, в ряде районов страны установлено, что суммарный геохимический фон радиоактивных элементов в рыхлых отложениях значительно отличается от фона в глинистой коре выветривания, являющейся представительным горизонтом. Это дает возможность по данным  $\gamma$ -каротажных поисковых шпуров судить о положении забоя каждого шпура и тем самым о достоверности проведенных поисков. В качестве примера на рис. 105 приводится фрагмент карты достоверности опоскования участка одного уранового рудопроявления в начальный период детальных поисков. Описываемый район характеризуется сложными условиями проходки шпуров, вызванных наличием в разрезе маломощных линз разнозернистых песков и плотных глин, не выдерживавших по простиранию. На недостоверно опоскованных участках были поставлены повторные поиски с помощью шнекового бурения на глубине представительного горизонта, которые привели к обнаружению вторичного ореола рассеяния протяженностью до 500 м.

## 6. ОЦЕНКА АНОМАЛИЙ И РУДОПРЯВЛЕНИЙ

Завершающим этапом глубинных поисков является оценка выявленных радиоактивных аномалий, т. е. установление их геологической природы и промышленной значимости.

По сравнению с поверхностными радиометрическими аномалиями оценка глубинных аномалий отличается большой сложностью, связанной с трудностью выяснения конкретной геологической ситуации, в которой локализуется аномалия (в связи с ее расположением на глубине), и громоздкостью технических средств, применяемых при детализации.

В настоящее время опыт оценки радиоактивных аномалий весьма небогатой, в связи с чем единая методика их интерпретации применительно к различным районам Советского Союза не разработана. Поэтому ниже излагаются лишь основные приемы оценочных работ.

Как указывалось выше, аномалии могут быть обусловлены различными природными факторами и иметь разную поисковую значимость. Очень важно уже на первой стадии оценочных работ выяснить с минимальными затратами практическую значимость выявленной аномалии, что позволяет отбраковать бесперспективные и наметить методике дальнейших исследований на объектах, заслуживающих внимания. Целесообразно для каждого рудного района разработать классификацию глубинных аномалий.

В качестве примера в табл. 33 дается классификация глубинных радиоактивных аномалий одного из регионов Советского Союза (по А. Н. Еремесву, А. Г. Евдохину, В. А. Петрову, Е. А. Шашковой «Глубинные поиски рудных месторождений», 1963).

Как отмечалось выше, первостепенное значение для поисков имеет приуроченность аномалии к определенному структурному горизонту. По этим признакам выявленные аномалии указанными авторами подразделены на три класса: первый — аномалии в породах складчатого основания; второй — аномалии в древней коре выветривания; третий — аномалии в отложениях рыхлого чехла.

В зависимости от геологической природы аномалии первых двух классов подразделяются на группы: А — связанные с рудной минерализацией или с ее вторичным ореолом рассеяния; Б — обусловленные экзогенными аккумуляциями; В — вызванные породами с повышенным содержанием радиоактивных элементов. Аномалии третьего класса также разделяются на группы, но уже по другим признакам (см. табл. 33). В основу классификации радиоактивных аномалий в других районах могут быть положены иные характерные факторы.

Оценка глубинных аномалий начинается с выяснения горизонта ее развития. Эта задача довольно просто решается на основании геологической документации проб, отобранных с помощью песколовных шпуров или по керну с аномальных интервалов. Например, приуроченность повышенных концентраций радиоактивных элементов к минералам-новообразованиям (лимонит, халцедон, ярозит, псиломелан и т. д.) и рыхлым осадкам верхнего структурного яруса можно с уверенностью объяснить гипергенными процессами, и если эти концентрации не представляют самостоятельной промышленной ценности, обоснованно их отбраковать без применения дополнительных оценочных работ. Аномалии, выявленные на глубине в породах складчатого основания, часто бывают вызваны рудной минерализацией (если не обусловлены породами с повышенным содержанием урана) и рассматриваются как перспективные, подлежащие дальнейшей детализации и оценке. Значительно сложнее интерпретировать аномалии в древней коре выветривания. Повышенные концентрации радиоактивных элементов в ней или могут быть связаны с вторичными ореолами рассеяния, или могут являться следствием процессов аккумуляции в образованиях коры выветривания. При оценке подобных аномалий учитываются их пространственный характер изменения концентраций с глубиной, характер сопутствующих элементов и т. д.

Таким образом, установление приуроченности аномалий радиоактивных элементов к определенному структурному горизонту позволяет при минимальном объеме работ отбраковать большую часть аномалий, не связанных с гипогенным оруденением. На перспективных аномалиях проводится площадное и объемное детальное изучение ореолов рассеяния. При помощи бурения и геофизических методов выясняется геологическое строение

Классификация глубинных радиоактивных аномалий на примере аномалий одного района  
(по А. И. Еремееву, А. Г. Едобишину, В. А. Петрову,  
Е. А. Шашковой 1963)

Класс	Группа	Тип аномалий		Поисковое значение
		Подинный индекс	Геолого-геофизическая характеристика	
I. Породы складчатого докембрийского фундамента, слезные, реже погребенные аномалии	A. Гипогенная урановая минерализация или перитчатый ореол	I-A	Аномалии в геологической обстановке, аналогичной для промышленных типов месторождений. Разделяются на три типа в порядке убывания перспективности	Имеет
	B. Вторичная аккумуляция	I-B	Аномалии на небольшой глубине, приуроченные к контактам пород или тектоническим зонам без признаков рудной минерализации. Активность низкая, реже средняя, убывает с глубиной	Не имеет или учитывается как поисковый признак
	В. Породы с повышенным содержанием радиоактивных элементов («породные» аномалии)	I-B	Аномалии, приуроченные к дайкам, штокам и жилам кислых магматических пород, шиллам в гранитах, жилам пегматитов и т. д. Активность низкая	Не имеет
II. Древняя кора выветривания докембрийских пород («погребенные» аномалии)	A. Вторичный ореол рассеяния рудной минерализации	II-A	Аномалии в благоприятной геологической обстановке с переходом в коренные породы. Активность обычно возрастает с глубиной. Разделяются на три типа в порядке убывающей перспективности	Имеет
	B. Вторичная аккумуляция	II-B-1	1. Линейно вытянутые аномалии в коре выветривания тектонически ослабленных	Не имеет или учитывается как поисковый признак

Класс	Группа	Тип аномалий		
		Полный индекс	Геолого-геофизическая характеристика	Поисковое значение
II. Древняя кора выветривания докембрийских пород («погребенные» аномалии)	Б. Вторичная аккумуляция	II-Б-1	зоп в породах с повышенным содержанием радиоактивных элементов. Низкая и средняя активность шпуров в большей части, убывающая с глубиной	Не имеет или учитывается как поисковый признак
		II-Б-2	2. Аномалии, приуроченные к окисленным горизонтам, к зонам гипергенного окремнения — «халцедонитам». Средняя и низкая активность	То же
	В. Породы с повышенным содержанием радиоактивных элементов («породные» аномалии)	II-В	Изометрические и линейные аномалии часто больших размеров, разрезанные, иногда точечные, часто приуроченные к понижениям рельефа нижней границы коры выветривания пород. Активность низкая	Не имеет
III. Породы мезо-кайнозойского осадочного чехла («следы» аномалии)	А. Аккумуляция металла — аналог промышленных типов экзогенных месторождений	III-A-1	1. Аномалии среди песчаных водонепроницаемых толщ, наличие эпигенетических замкнутых зон	Имеет
		III-A-2	Средние, реже высокие значения 2. Торфяных	
	Б. Местные аккумуляции промышленных концентраций металла	III-Б-1	1. Аномалии в осадочных фациях с органическим веществом и иридием. Активность средняя, реже высокая	

Класс	Группа	Тип аномалий		Поисковое значение
		Полный индекс	Геолого-геофизическая характеристика	
Горизонт развития аномалий	Геологическая провинция радиогенных аномалий	III-B-2	2. Аномалии, связанные с современным или более древним засолением, часто этаметрической формы. Активность средняя, реже высокая Аномалии в современной или древней гидросети	Не имеет  Региональный поисковый признак
	Б. Местные аккумуляции перемещенных концентратов металла  В. Поток рассеяния	III-B		

аномального участка и минералого-геохимическая обстановка. Эти данные позволяют наметить точки заложения первых оценочных скважин.

Целесообразно также для каждой рудной провинции на основании анализа и обобщения комплекса сведений по ранее изученным радиоактивным аномалиям, рудопроявлениям и месторождениям урана разработать типовые оценочные критерии. На основании сравнения полученных при оценке вновь выявленной аномалии данных становится возможным объективно судить о ее промышленном значении.

Для района, применительно к которому была разработана вышеописанная классификация, в качестве типовых местных оценочных признаков выбраны следующие:

1) геологические — литолого-фациальный, стратиграфический, структурный и магматический контроль уранового оруденения;

2) минерально-геохимические — вещественный состав рудовещающих пород, минералы-индикаторы, элементы-спутники, характер окolorудных изменений;

3) геофизические — дифференцированность магнитного и гравитационного полей, наличие аномалий естественных токов, вызванной поляризации и т. д.;

4) оценочные — параметры аномалий на забое шпуров и уровне представительного горизонта, их морфология, величина, характер изменения содержания радиоактивных элементов с глубиной, количество металла в ореоле и т. д.

Роль отдельных оценочных критериев при изучении и оценке аномалий различных классов неодинакова. Геологические критерии (структурная позиция, стратиграфическое положение, фациальные

условия, проявление магматической деятельности) примерно равно-значны. Для оценки аномалий III класса важны лишь литолого-геохимические признаки: наличие геохимических барьеров, определенных сорбентов и т. д.

Для подтверждения намечившихся выводов по оценке масштаба уранового оруденения проводятся ряд скважин с таким расчетом, чтобы полученные данные характеризовали ожидаемые рудные или аномальной части структуры.

Непрерывной заключительной операцией при оценке вторичных ореолов рассеяния является подсчет прогнозных запасов урана, разведочных работ либо отбраковке выявленного объекта.

Как показано А. П. Солововым и Г. В. Мпорошпченко (1963), фактических данных и на основании общих геологических соображений не удовлетворяют требованиям категории С<sub>2</sub>, тем не менее их ориентировочный смысл имеет первостепенное значение.

Описываемый ниже метод количественной интерпретации вторичных ореолов рассеяния урана является дальнейшим развитием способа оценки запасов металла по ореолам рассеяния, ранее введенного в практику геохимических съемок А. П. Солововым (1959). Этот вторичный ореол в коре выветривания образуется в результате рассеяния рудных элементов, ранее находившихся в состоянии концентрации в интервале рудного тела, подвергшегося процессам выветривания.

Количество урана  $M$ , выраженного в метропроцентах эквивалентного металла ( $M\%$ ), для данного сечения ореола при постоянном расстоянии точек наблюдения по профилю ( $\Delta X$ ) вычисляется по следующей формуле

$$M = \frac{10^{-2}}{K} \Delta X (\sum I_x - n I_{\phi}),$$

где  $\sum I_x$  — арифметическая сумма измеренных значений активности радиоактивного излучения в точках

$I_{\phi}$  — величина геохимического фона, *мкр/ч*;

$n$  — число аномальных точек в пределах вошедших в подсчет;

$\frac{10^{-2}}{K}$  — коэффициент для перевода *мкр/ч* в час в проценты эквивалентности

Следует заметить, что при нарушении радиоактивного равновесия в пересчетный коэффициент должны быть внесены соответствующие поправки.

Метропроцент металла в любом сечении вторичного ореола рассеяния приближенно отражает то количество урана, которое содержалось в данном интервале рудного тела до его выветривания. Много-

численные подсчеты, выполненные А. П. Солововом и Г. В. Мирошниченко (1963) для ряда погребенных урановых месторождений и рудопроявлений, показывают, что ниже уровня представительного горизонта до забоя шпуров в 96% случаев количество металла в различных горизонтальных сечениях колеблется около средних значений — в пределах от 0,4 до 2,0  $M/M_{cp}$  (рис. 106). Практически нет необходимости выполнять погоризонтные подсчеты количества урана и анализировать изменения показателя  $M/M_{cp}$  с глубиной.

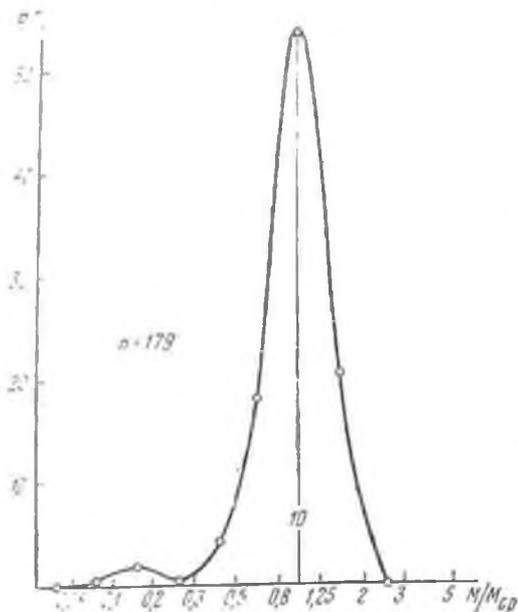


Рис. 106. Вариационная кривая значений  $M/M_{cp}$  (по А. П. Соловову и Г. В. Мирошниченко, 1963) 96% значений лежат в интервале от 0,4 до 2,0

Целесообразно выполнять подсчет ожидаемого количества урана в коренном выходе рудного тела ( $M\%$ ) по значениям  $M_{cp}$  на уровне максимальной глубины шпуров (на забое). Это геологически оправдано, так как соответствует условию наибольшего приближения ореола к коренным породам. Если количество металла ниже зоны окисления сохраняется более или менее постоянно и соответствует рудопосности равее существовавшего интервала рудного тела, то количество металла (в  $M\%$ ) в ореоле будет характеризовать коренное оруденение.

Запасы урана в ореоле  $q$  (в тоннах) для горизонтального слоя мощностью  $l$  м при постоянном расстоянии между профилями ( $l$ , м) определяют по формулам

$$q = l \cdot d \cdot 1 \cdot 10^{-2} \sum M \quad \text{или} \quad q = ld \frac{10^{-4}}{K} (\sum I_x - nI_\phi),$$

- где  $\sum M$  — арифметическая сумма количеств металла в ореоле по отдельным профилям;  
 $d$  — объемный вес рудовмещающих пород, равный в среднем  $2,5 \text{ г/см}^3$ ;  
 $\sum I_x$  — арифметическая сумма измеренных значений интенсивности  $\gamma$ -излучения в точках по профилю;  
 $I_\phi$  — значение натурального фона,  $\text{мкр/ч}$ ;  
 $n$  — число аномальных точек в пределах данного профиля, вошедших в подсчет;  
 $\frac{10^{-4}}{K}$  — множитель для перехода от значений микрорентгенов в час к тоннам металла.

От запасов урана во вторичном ореоле рассеяния для сечения в 1 м легко перейти к определению геологических запасов металла в рудопроявлении в тоннах ( $Q_H$ ), подсчитываемых на вертикальную глубину  $H$ :

$$Q_H = q \cdot H.$$

При этом выбор глубины подсчета  $H$  определяется геологической обстановкой и генетическим типом рудопроявления. В частном случае значение  $H$  может быть ограничено глубиной 100 или 200 м, либо величиной, равной половине длины ореолов и т. д. Вследствие приближенного характера подсчета значений  $Q_H$  они обычно выражаются только порядком величины. Таким образом, подсчет возможных (геологических) запасов металла по вторичным ореолам рассеяния вновь выявляемых объектов значительно расширяет возможности оценки глубинных аномалий, позволяет делать более обоснованные выводы об их промышленной значимости.

Необходимо подчеркнуть, что подсчет прогнозных запасов следует выполнять только для вторичных ореолов с доказанным оруденением в коренном залегании.

Рассмотренная выше этапность свидетельствует о том, что глубинные поиски погребенных месторождений урана представляют собой сложный комплекс геологических, геохимических, геофизических и буровых работ, выполняемых в определенной последовательности. В табл. 34 в обобщенном виде приводится схема методики глубинных радиометрических поисков с указанием задач, решаемых на каждом этапе общего поискового процесса.

В настоящее время глубинные поиски погребенных месторождений урана проводятся в ограниченных масштабах. Это объясняется недостаточной разработанностью рациональной методики поисков для различных районов страны, отсутствием высокопроизводительных технических средств, высокой стоимостью полевых работ и т. д.

Дальнейшее совершенствование рационального комплекса методов и технических средств глубинных поисков, резкое снижение их стоимости и повышение геологической эффективности должно развиваться в основном по следующим направлениям.

1. Разработка и внедрение в практику поисков высокопроизводительных (до 400—500 пог. м в смену) самоходных установок бурения на глубину 50—100 м с надежным отбором проб воды, газа с заданной глубины.
2. Разработка высокочувствительных ядерных трюскопических методов и аппаратуры для обнаружения рудных элементов в естественном залегании (каротаж).
3. Установление представительного горизонта орождения для основных рудных районов СССР.
4. Ландшафтно-геохимическое районирование территории всех основных рудных районов страны в масштабе 1 : 200 000—1 : 100 000.
5. Разработка методики оценки глубинных радиоактивных аномалий.

Этапы поисков	Задачи	Основные виды и методы работ
1	2	3
<p>I этап. Выделение перспективных площадей и их первичная рекогносцировка</p>	<p>1. Выделение перспективных площадей по имеющимся геологическим картам масштаба 1 : 100 000 и крупнее</p> <p>2. Составление схемы условий ведения поисков по категориям трудности в масштабе 1 : 100 000 для проектирования</p> <p>3. Уточнение контуров перспективных площадей</p>	<p>Сбор и анализ геологических, прогнозно-металлогенетических, геофизических и геохимических карт; учет поисковых критериев</p> <p>Дешифрирование аэрофотоматериалов, аэровизуальные наблюдения, полевая рекогносцировка</p>
<p>II этап. Подготовка площадей</p>	<p>1. Составление литолого-структурной схемы складчатого фундамента участка поисков в масштабе 1 : 50 000</p> <p>2. Районирование по категориям трудности опосконапия в масштабе 1 : 50 000</p> <p>3. Выделение локальных участков или детальных глубинных поисков</p>	<p>Магниторазведка, электропрофилирование, реке, гравитразведка, геологические маршруты, дешифрирование аэрофотоматериалов, картировочное бурение</p>
<p>III этап. Собственно поиски</p>	<p>1. Поиски масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000)</p> <p>2. Детальные поиски масштаба 1 : 10 000</p>	<p>Глубинные радиометрические поиски</p> <p>То же и магниторазведка, электроразведка, поисково-картировочное бурение с геохимическим опробованием керна</p>
<p>IV этап. Оценка аномалий</p>	<p>1. Детализация аномалий — площадное и объемное излучение ореола</p> <p>2. Составление геологической схемы участка ореола в масштабе 1 : 10 000 — 1 : 2 000</p> <p>3. Оценка рудопроявлений</p>	<p>Различные виды глубинных радиометрических исследований, шпекковое и картировочное бурение</p> <p>Детальная магниторазведка, электроразведка, картировочное бурение</p> <p>Шурфы, разведочное бурение с комплексом радиометрических, геофизических и геохимических исследований в скважинах, минерально-геохимические исследования</p>

7. ПРИМЕРЫ ИЗ ПРАКТИКИ ГЛУБИННЫХ ПОИСКОВ

В результате проведения глубинных поисков на закрытых площадях Советского Союза могут быть выявлены как вторичные ореолы рассеяния урановых месторождений, так и экзогенные аккумуляции радиоактивных элементов в породах верхнего структурного яруса. Для иллюстрации приводятся несколько примеров из практики глубинных поисков.

Выявление погребенного рудопроявления урана. Описываемое рудопроявление располагается в пределах сухой степи, развитой на аккумулятивной делювиально-пролювиальной равнине, выполненной современными суглинками и средневечетвертичными глинами мощностью от 5 до 8 м. Аномалия обнаружена шпуровой γ-съемкой по сети 250 × 40 м, проводимой самоходными агрегатами СУГП-10 в пределах представительного горизонта (рис. 107). В пестроцветной глинистой коре выветривания (мощностью от 40 до 60 м), развитой по туфогенно-осадочным породам остаточные ореолы имеют максимальные размеры, в 5 раз превышающие ширину эндогенных руд и их первичных ореолов рассеяния.

В рыхлых отложениях развиваются ослабленные наложенные ореолы рассеяния на высоту от 0,5 до 4 м от кровли коры выветривания. Эти ореолы не доходят до дневной поверхности на 2—7 м. По этой причине они не были выявлены воздушными, автомобильными и пешеходными радиометрическими поисками.

Детализация аномалий произведена в масштабе 1 : 10 000 по восьми профилям с выполнением колонкового бурения и шпуровой съемки. По кровле коры выветривания вторичные ореолы рассеяния оконтурены в виде двух зон северо-восточного простирания протяженностью от 300 до 580 м и шириной 80—120 м.

Проведенными работами установлено, что рудовмещающими породами являются пакки чередующихся алевроитов, алевролитов с лито- и кристаллокластическими туфами андезитового состава, прорванными маломощными дайками плагиогранит-порфиров и андезитовых порфиритов среднего палеозоя. Кондиционные урановые руды локализируются в зонах дробления и оперяющих их тел.

Рудная минерализация представлена урановыми соединениями (преимущественно солями ортофосфорной кислоты), а также с пиритом, окислами и полуторными окислами (лимонит) и анкеритом. Рудные тела со средним содержанием  $P_2O_5$  шириной от 18 до 20 м и длиной до 40 м. Размеры вторичных ореолов рассеяния, по данным рентгено- и перлово-люминоцентного анализа практически совпадают с размерами ореолов. Количество металла во вторичном ореоле для слоя мощностью 1 м составляет менее 1 т.

На основании минерально-геохимических исследований по двум оценочным скважинам установлено, что с глубиной уменьшается ширина ореолов урана, молибдена, фосфора, меди и падает интенсивность

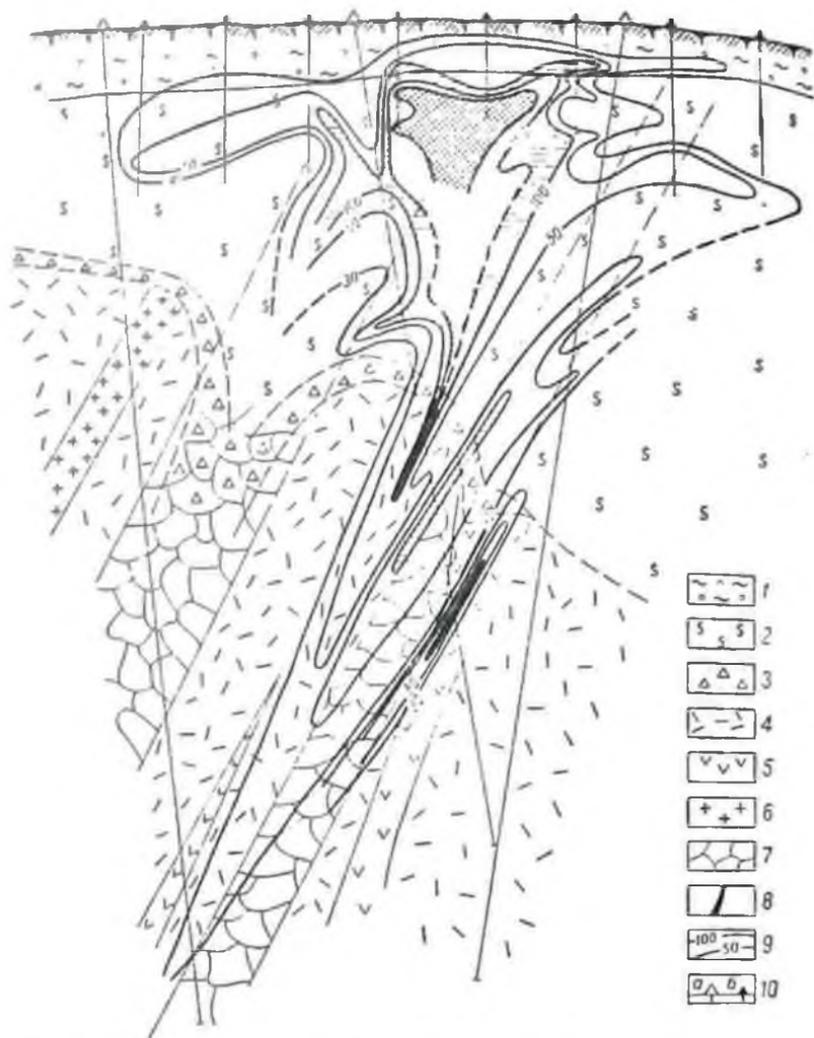


Рис. 107. Остаточный и наложенный вторичные ореолы рассеяния урана одного из рудопроявлений, открытого глубинными поисками

1 — современные суглинки; 2 — пестроцветная глинистая кора выветривания; 3 — щебнистая кора выветривания; 4 — чередование лито- и кристаллокластических туфов андезитового состава; 5 — андезитовые порфиры; 6 — плагиокласт-порфиры; 7 — зона дробления; 8 — рудные тела; 9 — изоконцентрации урана в  $\times 10^{-4}\%$ ; 10 — складки (а) и шпурь (б). Различной штриховкой показаны участки ореолов с содержанием урана выше  $100 \times 10^{-4}\%$

сильность гидротермальных измерений. Все эти данные послужили основанием для отрицательной оценки рудопроявления.

Выявление погребенного уранового месторождения. Поисковая площадь расположена на пологонаклонной аккумулятивной равнине, сложенная на пологонаклонных осадках с ливзами разнозернистых современных глинистыми отложений колеблется от 5 до 10 м. Эти осадки современными глинистыми вторичные ореолы рассеяния, вследствие чего полностью экраняют поверхности не отмечаются. Рыхлые отложения последние на дневной поверхности и щебнистой коре выветривания кварцево-слюдистых пород. Мощность площадной коры выветривания равна в среднем 4 м, увеличиваясь на участках дизъюнктивных нарушений.

Аномалия обнаружена шуровой  $\gamma$ -съемкой с помощью самоходных агрегатов СУГП-10 на уровне представительного горизонта. Детализация аномалии осуществлена в масштабе 1:2000 с применением колонкового бурения. В итоге этих работ вторичные ореолы рассеяния по кровле представительного горизонта оконтурены по простиранию на 800 м при средней ширине 150 м.

Детальное изучение ореолов рассеяния, проведенное по одному из профилей, показало, что урановое оруденение локализуется в кристаллических сланцах нижнего палеозоя (рис. 108). Вмещающая порода окварцована, на нее в свою очередь наложена сульфидная минерализация в виде пирита, арсенопирита, реже сфалерита. Околорудные изменения выполнены магнетитом-железистым хлоритом и карбонатом.

Контрастные урановые руды залегают на глубине от 2 до 30 м в виде серии ливзовидных тел. Слагаются урановой смолкой, тесно ассоциирующей с хлоритом и пиритом.

Рудные тела сопровождаются ореолами рассеяния мышьяка и меди, далеко выходящими за пределы ореолов урана. Количество урана в ореоле для слоя мощностью 1 м значительное.

На основании увеличения с глубиной интенсивности гидротермальной проработки, размеров рудных тел и первичных ореолов урана, мышьяка и меди данный объект сдан в предварительную разведку.

Выявление вторичных экзогенных муляжей урана в породах верхнего турного яруса. На рис. 109 приведен пример интерпретации аномалии, приуроченной к молодому, связанной с гипогенным оруденением. Аномалия выявлена в непосредственной близости от гидротермального месторождения, что способствовало ее положительной оценке. После выполнения значительного объема поискового бурения (4080 пог. м), сопровождаемого глубинным геохимическим обробованием, на глубине 28—32 м оконтурено аномальное поле северо-восточного простирания длиной 1200 м при ширине 100—400 м, с интенсивностью  $\gamma$ -излучения от 100 до 400 мкР/ч. Из-за низкого выхода керн по скважинам правильно оценить аномалию не представлялось возможным. На рис. 109, а

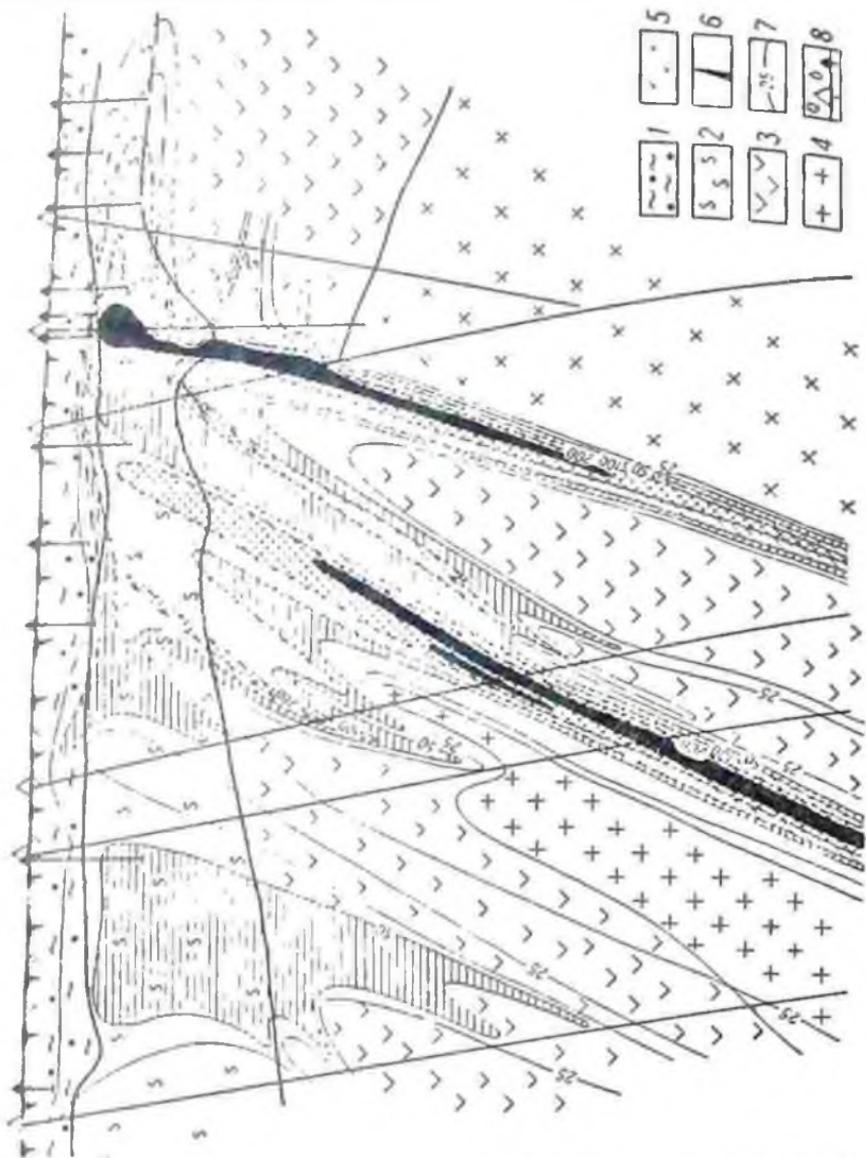


Рис. 108. Разрез остаточного и выжженного вторичных погребенных ореолов расселин Уранового месторождения (по Г. В. Мирошницкому и А. Н. Позднискому, 1963 г.)

1 — глина и суглинок; 2 — пестроцветная глинистая и глинисто-цементная кора выветривания; 3 — кристаллические сланцы; 4 — диориты; 5 — гранодиориты; 6 — рудные тела; 7 — изолинии у-активности в мкр 1/4; 8 — сланцы (а) и шпур (б). Радиальной штриховкой показаны участки ореолов с содержанием Урана выше  $100 \times 10^{-4} \%$



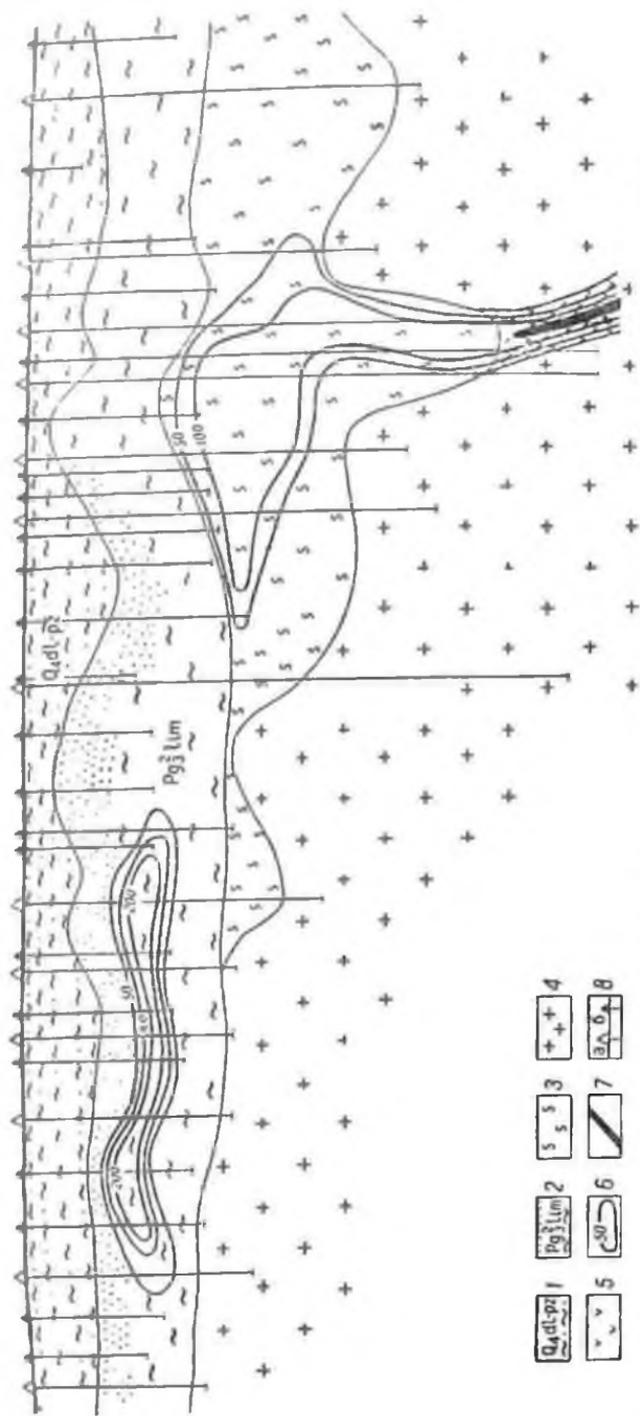


Рис. 110. Пример вторичных элювиальных аккумуляций урана в рыцких отложениях и погребенного рудопромысла

1 — четвертичные отложения; 2 — слиткообразные песчано-глинистые осадки; 3 — триас-юрская кора выветривания; 4 — граниты; 5 — лампрофиты; 6 — изоляции у-активности в м.м.р./ч.; 7 — рудное тело; 8 — изоляции у-активности с помощью СУГП-10

трации радиоактивных элементов оказались приуроченными к тонкодисперсным глинам и лессовидным суглинкам, обогащенным органическим веществом и пиритом. Представления о практической ценности аномалии оказались ошибочными и дальнейшие оценочные работы были прекращены.

Выявление вторичных экзогенных аккумуляций урана в рыхлых отложениях и покровного рудопроявления. В качестве наиболее типичного случая, когда под экзогенными аккумуляциями в осадочном чехле залегает промышленное гипогенное оруденение, рассмотрены установок на глубине 20 м (рис. 110).

Оруденение приурочивается к неотектонической впадине в кровле гранитной интрузии, развиваясь в виде аккумуляции урана в гумусированных глинах верхнего олигоцена. Повышенные концентрации урана в гумусированных глинах приурочиваются к прибрежным частям озерного бассейна олигоценового времени. Аномальное поле с перерывами прослежено по простиранию на 620 м. Форма рудного тела пластообразная, линзовидная, мощность от 0,1 до 2,0 м. Руды в рыхлых отложениях практической ценности во не представляют.

Вторичные ореолы рассеяния по кровле коры выветривания прослежены на 800 м в длину и 300 м в ширину. Гипогенное оруденение представлено маломощными линзами контрастных руд. Уран находится в них в форме солей ортофосфорной кислоты. Оценочным бурением установлено, что данное рудопроявление не представляет практического значения из-за малых масштабов оруденения. Экзогенные аккумуляции урана и гипогенное оруденение в данном случае генетически не связаны. Пространственная связь обусловлена тем, что в результате неотектонических движений по ранее заложенным ослабленным зонам, к которым приурочено урановое оруденение, произошло опускание участка. В олигоценовое время здесь образовалась система озер с восстановительной обстановкой. Из грунтовых вод, дремирующих массивы гранитоидов с резко повышенным содержанием урана металл осаждался в прибрежных участках озер, что и привело к образованию здесь экзогенных аккумуляций.

## ЛИТЕРАТУРА

- Аэрогамма-спектрометрический метод поисков месторождений урановых руд (методическое руководство). Ротапринт, ВНИР, Л., 1967.
- Б а л я с и н Н. Д. и др. Определение содержащий радия, тория и калия в горных породах с самолета. «Атомная энергия», т. 10, вып. 6, 1961.
- Б а р а н о в В. И. Об усвоении радиоактивных элементов растениями. Докл. АН СССР, т. 24, вып. 9. 1939.
- Б а р а н о в В. И. Радиометрия. Изд. первое и второе (исправленное). Академиздат, М., 1955, 1956.
- Б а т у л и н С. Г. Испарительная концентрация редких элементов в степях и пустынях. В сб. «Геохимия степей и пустынь». Географгиз, 1962.
- Б а т у л и н С. Г. и др. Экогенные эпигенетические месторождения урана Атомиздат, 1965.
- Б л о х И. М. Дипольное электропрофиллирование. Госгеолтехиздат, 1957.
- Б л о х И. М. Электропрофиллирование методом сопротивлений низкой частоты. Госгеолтехиздат, 1962.
- Б о в в и В. П. Экспериментальное исследование эффективности сцинтилляционных счетчиков. «Атомная энергия», т. 8, вып. 2, 1960.
- Б о н д а р е в В. М. и др. Гамма-опробование урановых руд в естественном залегапии. Изд-во «Недра», 1964.
- Б у л а ш е в и ч Ю. П. К теории интерпретации радиоактивных аномалий. Изв. АН СССР, т. IX, № 5, 1947.
- Б ы к о в а В. С. Ускоренный метод химической подготовки к люминесцентному определению урана в горных породах. «Сборник работ по радиохимии». Изд-во ЛГУ, 1955.
- В а с и л ь е в П. И., П о д в а л ь в а я Р. Л. Люминесцентный метод определения урана с предварительным выделением его на фосфате титана. В сб.: «Методы определения радиоактивных элементов в минеральном сырье». Госгеолтехиздат, 1958.
- В е ш е в А. В. Электроразведочная аппаратура низкой частоты. Гостоптехиздат, 1962.

- Вершиковская О. В. Первичные ореолы рассеяния ртути как поисковый признак ртутьно-сурьмяных месторождений. «Разведка и охрана недр», 1951, № 4.
- Виноградов А. П. Поиск рудных месторождений по растениям и почвам. Тр. Биохим. лабор. АН СССР, т. X. Изд. АН СССР, 1954.
- Воскобойников Г. М. Интенсивность гамма-излучения в однородной окружающей среде. Тр. Горно-геол. ин-та УФАН СССР. Геофизический сборник, № 2, 1957.
- Временные методические указания по проведению радиогеологических исследований при массовых поисках месторождений урана. Ротапринт. МГ СССР, М., 1966.
- Временное руководство по комплексным аэрогеофизическим поискам месторождений урана. 1-ое и 2-ое изд. Ротапринт ВИТР, Л., 1957, 1958.
- Выборных С. Ф. Промышленное геофизическое оборудование и аппаратура. Галишев Г. С., Огневецкий В. И., Орлов А. И. Теория многократного рассеяния гамма-лучей. «Успехи физических наук», т. XI, вып. 2, 1957.
- Гермаев А. И. и др. Некоторые закономерности распределения урана в подземных водах (доклад № 2499). Тр. Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, т. 3. Женева, 1959.
- Гинзбург И. И. Опыт разработки теоретических основ геохимических методов поисков. Госгеолтехиздат, 1957.
- Глубинные поиски рудных месторождений. Сб. статей под редакцией А. Н. Еремеева и А. П. Соловова. Госгеолтехиздат, М., 1963.
- Глубинные поиски рудных месторождений. Сб. статей под редакцией А. Н. Еремеева и А. П. Соловова, вып. 2. ВИМС, 1968.
- Горшков Г. В. Гамма-излучения радиоактивных тел и элементы расчета защиты от излучения. Изд. АН СССР, 1959.
- Грабовская Л. И., Астрахан Е. Д. Биохимические и геохимические исследования при поисках редкометалльных месторождений. Госгеолтехиздат, М. 1963.
- Грамаков А. Г. Некоторые вопросы теории эмацационного метода. В сб.: «Вопросы рудной геофизики», вып. 2. Госгеолтехиздат, 1961.
- Грамаков А. Г., Попретисский И. Ф. Распределение радона в рыхлых отложениях при наличии ореолов рассеяния радия. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 6, 1957.
- Грамаков А. Г. и др. Некоторые вопросы теории и методики радиометрических поисков и разведки. «Труды второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Женева, 1958 г. Доклады советских ученых, т. 3. Ядерное горючее и реактивные материалы. Атомиздат, 1959.
- Грамаков А. Г., Шашкин В. Л., Шпряева М. М. Поиски и разведка урана по гамма-опробованию радиоактивных руд в естественном дат, 1959.
- Грошев Л. В., Шапиро И. С. Спектроскопия в геофизике. Гостоптехиздат, 1952.
- Дахнов В. Н. Промышленная геофизика. Гостоптехиздат, 1952.
- Евдокимов Ю. Д. Анализ эффективности поисковой сети при съемке мобильных геофизических съемках В. сб.: «Вопросы рудной геофизики», вып. 3. Госгеолтехиздат, 1961.
- Евдокимов Ю. Д. Об определении предельно допустимых скоростей движения при автомобильной гамма-съемке. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 2. Гостоптехиздат, 1962.
- Евсеева Л. С., Перельман А. И. Геохимия урана в зоне гипергенеза. Атомиздат, 1962.

- Еремеев А. П., Шугин А. А. Некоторые вопросы методики составления детальных геолого-структурных карт закрытых площадей. «Советская геология», 1966, № 5.
- Жернов В. С., Мачиконя С. В. Новые радиометрические и спектротрические приборы. Атомиздат, 1960.
- Заборова А. И. Электроразведка. Гостоптехиздат, 1943.
- Запороженец В. М. Инструкция по каротажным и прострелочным работам. Госгеолтехиздат, 1952.
- Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. Изд-во «Недра», 1965.
- Инструкции по металлометрической съемке. Госгеолтехиздат, 1957.
- Инструкция по электроразведке. Госгеолтехиздат, 1952.
- Использование ореолов рассеяния урана и элементов-спутников при поисках и разведке гидротермальных урановых месторождений (Методическое руководство). Под ред. А. П. Соловова. Изд-во «Недра», 1964.
- Кайдуков А. Д., Вертепов Г. И. Ореолы рассеяния элементов вокруг урановых рудных тел. «Геология рудных месторождений», № 2, 1960.
- Каприлов Г. П. Портативная аstatическая установка. Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 1. Гостоптехиздат, 1962.
- Кватцевская И. В. Поиски рудных месторождений по потокам рассеяния. Сб. «Геохимические поиски рудных месторождений». Госгеолтехиздат, 1957.
- Кириков А. П. и др. Радиоактивные геофизические методы в приложении к геологии. ОНТИ. Горгеоиздат, 1934.
- Копыловский А. Л. О естественных радиоактивных элементах в растениях. Изв. Сиб. отд. АН СССР, № 4, 1962.
- Колубакин В. В., Лапина М. И. Обзор способов решения прямой и обратной задач магнитной разведки. Изд. АН СССР, 1960.
- Комаров С. Г. Техника промышленной геофизики. Гостоптехиздат, 1957.
- Комаров В. А. и др. Теоретические основы интерпретации наблюдений в методе вызванной поляризации. Изд-во «Недра», 1966.
- Красников В. И. Радиопальные поиски рудных месторождений. Госгеолтехиздат, 1959.
- Красников В. И. К вопросу о месте и роли геохимического метода в рациональных комплексах геологопоисковых работ. Сб. «Опыт разработки геохимических методов поисков рудных месторождений». Госгеолтехиздат, 1959.
- Красников В. И. Геохимические предпосылки поисков урановых месторождений. Атомиздат, 1964.
- Кувшинова К. Г. О распределении радия и урана в растении, выращенном в среде с различной концентрацией радиоэлементов. Тр. биогеохим. лабор. АН СССР, т. V. Академиздат, 1939.
- Кзылов Е. Л., Клейхемль Ф. С. Биохимические методы, применяемые для поисков урана (Доклад Р/509 США). Мат-лы международной конференции по мирному использованию атомной энергии, т. 6. Геология урана и тория. Госгеолтехиздат, 1958.
- Кюри М. Радиоактивность. Гостехиздат, 1947.
- Левинский О. Д., Смирнов В. И. Значение первичной зональности для поисков рудных тел гидротермального происхождения, не выходящих на поверхность. «Советская геология», № 2, 1959.
- Левин С. С. Сцинтилляционные спектрометры. Сб. «Радиоактивные изотопы и ядерные излучения в народном хозяйстве СССР». Труды Всесоюзного совещания 12—16 апреля 1960 г. в г. Риге, т. IV. «Поиски, разведка и разработка полезных ископаемых». Гостоптехиздат, М., 1961.

- Догогачев А. А. Методическое руководство по аэромагнитной съемке. Госгеолтехиздат, 1955.
- Догогачев А. А. Курс магниторазведки. Изд. 2-е. Гостоптехиздат, 1962.
- Донаткина А. П. Закономерности миграции урана в природных водах осадочных областей и их использование при определении гидрохимического фона урана. Геохимия, № 8, 1964.
- Маловичко А. К. Основной курс гравиразведки. ч. I. Изд. Пермского гос. ун-та, 1960.
- Малюга Д. П. Биогеохимический метод поисков рудных месторождений. Изд-во АН СССР, 1963.
- Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся в Женеве 8—20 августа 1955 г. Т. 6. Геология урана и тория. Госгеолтехиздат, 1958.
- Матвеев А. В. Приведение локальных гамма-полей к уровню земной поверхности. Сб. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 4. Гостоптехиздат, 1962.
- Матвеев А. В., Смирнов Г. С., Фляпцов В. В. Методы определения природы радиоактивности горных пород с самолета. Сб. «Вопросы рудной радиометрии». Атомиздат, 1962.
- Межиборская Х. Б., Шашкин В. Л., Шумилин И. П. Анализ радиоактивных руд  $\beta$  +  $\gamma$ -методом. Атомиздат, 1960.
- Мейер А. А. Каротаж скважин при разведке полиметаллических месторождений. Изд-во ЛГУ, 1960.
- Мелков В. Г., Пухальский Л. Ч. Поиски месторождений урана. Госгеолтехиздат, 1957.
- Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых. Госгеолтехиздат, 1962.
- Методические указания по проведению отдельных этапов геологоразведочных работ, Госгеолтехиздат, 1961.
- Муроками Ю. и др. Геохимические поиски урановых месторождений в Японии. Тр. второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958 г. Избранные доклады иностранных ученых, т. 8. Геология атомного сырья. Атомиздат, 1958.
- Мусиченко Н. П., Холмин В. И. Временная инструкция по проведению эманацционной съемки. Гостехиздат, 1951.
- Надпмов В. В. Применение математической статистики при анализе вещества. Физматгиз, 1960.
- Нелина Н. Ф. Введешие в теорию многократного рассеяния частиц. Атомиздат, 1960.
- Новиков Г. Ф. Эталонирование эмалометров СТ-11 твердым эталоном. Информ. сб. МГ и ОН СССР «Вопросы разведочной» № 2, Госгеолтехиздат, 1960.
- Новиков Г. Ф., Капков Ю. Н. Радиоактивные «Недра», 1965.
- Овчинников А. К. и др. Инструкция по гамма-геолтехиздат, 1962.
- Овчинников А. К., Колесов Б. М., Золотницкая методическая инструкция к гамма-каротажной аппаратуре ГАРК, ПГКР, используемой при проведении массовых поисков. Госгеолтехиздат, 1961.
- Овчинников А. К., Хайкович И. М. Об учете объемных весов при количественной интерпретации данных гамма-каротажа и радиометрического опробования на урановых месторождениях. В сб.: «Вопросы рудной геофизики», вып. 1. Госгеолтехиздат, 1960.
- Огильви А. А. Геоэлектрические методы изучения карста. Изд-во МГУ, 1957.
- Ожгинский И. С., Соколов П. В. и Юфа Б. Я. Как искать урановые руды. Госгеолтехиздат, 1959.

- Перельман А. И. Геохимия ландшафта. Изд-во «Недра», 1985.
- Перельман А. И., Шарков Ю. В. Опыт выделения на территории СССР провинций в районах с различными условиями проведения геохимических поисков. Сб. «Геохимические поиски рудных месторождений в СССР». Госгеолтехиздат, 1957.
- Петров П. И. и др. Методы геолого-геофизического обслуживания урановых рудников. Атомиздат, 1960.
- Полликарповичи В. В. и др. Сб. «Геохимические поиски месторождений полиметаллов в Восточном Забайкалье по план и водам». Госгостехиздат, 1958.
- Полликарповичи В. В., Полликарповичи Р. Т. Биогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых. Изд-во «Наука», 1964.
- Полов В. Н., Кудель Е. И. К вопросу о методике составления некоторых видов гидрохимических карт. Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии. Сб. ВСЕГПИГЕО, № 18. Госгеолтехиздат, 1959.
- Попретинский И. Ф. Определение коэффициентов диффузии радона в амфибулирующей способности горных пород по кривым эмалационного зондирования. Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 2. Госгеолтехиздат, 1961.
- Правис В. Регистрация ядерного излучения. Изд-во иностран. лит., 1960.
- Пухальский Л. Ч. Теория контрастности урановых руд. Атомиздат, 1963.
- Разумовский Н. К. Логнормальный закон распределения и его свойства. Уч. зап. ЛГУ, т. 20, 1948.
- Разумовский Н. К. К вопросу о выделении аномалий на фоне обычных содержащий элементов в породе при поисковых работах. Сб. «Вопросы разведочной геофизики», вып. 1. Госгостехиздат, Л., 1962.
- Радиометрические методы поисков и разведки урановых руд. Госгеолтехиздат, 1957.
- Рахтенко И. И. О сезонном цикле поглощения и выделения минеральных питательных веществ корнями древесных пород. «Физиология растений», т. 5, вып. 5, 1958.
- Россиа Г. И. Опыт изучения первичных ореолов рассеяния полиметаллических месторождений Рудного Алтая. Сб. «Геохимические поиски рудных месторождений в СССР». Госгеолтехиздат, 1957.
- Семёнов А. С. Электроразведка методом естественного электрического поля. Изд-во ЛГУ, 1955.
- Семёнов А. С., Турчаппов Л. В., Бархатов Д. Р. Метод среднего градиента при крупномасштабном геологическом картировании. Сб. «Вопросы рудной геофизики», вып. 2. Госгеолтехиздат, 1961.
- Смирнов В. И. Подсчет запасов минерального сырья. Госгеолпиздат, 1950.
- Смирнов В. И. Проблемы поисков рудных месторождений, не имеющих выхода на поверхность земли. «Советская геология», сб. 49, 1955.
- Смирнов В. И. О книгах по поискам и разведкам месторождений урана. «Геология рудных месторождений», 1959, № 2.
- Соловов А. П. Основы теории и практики металлометрических съемок. Изд. АН КазССР, Алма-Ата, 1959.
- Соловов А. П., Фурсов В. З. Поиски не выходящих на поверхность рудных тел месторождения Ашшап. «Советская геология», 1959, № 3.
- Соловов А. П., Миропиченко Г. В. Оценка геологических запасов в рудопроявлявшихся путем количественной интерпретации глубинных гамма-аномалий. Сб. «Глубинные поиски рудных месторождений». Госгеолтехиздат, 1963.
- Справочник геофизика. Т. 1. Госгостехиздат, 1960.
- Справочник по радиометрии для геофизиков и геологов. Под ред. В. И. Баранова. Госгеолтехиздат, 1957.

- Старик Н. Е., Старик Ф. Е., Михайлов В. А. К вопросу смещения изотопных отношений в природных образованиях. «Геохимия», 1958, № 5.
- Степанов В. М. К методике гидрогеохимических исследований при поисках рудных месторождений в одном из районов Сибири. Тр. Межведомственного совещания по гидрогеохимическому методу поисков рудных месторождений. Томск, 1962.
- Суражский Д. Я. Методы поисков и разведки месторождений урана. Атомиздат, 1960.
- Смирнягин Н. Г. Миграция изотопов урана, радия и тория и интерпретация радиоактивных аномалий. Изд. АН КазССР, Алма-Ата, 1961.
- Тархов А. Г., Сидорова А. А. О математической обработке геофизических данных. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 10, 1960.
- Титова Н. А. Организация и методика поисковых работ на уран в капиталистических странах. В кн. «Вопросы геологии и сырьевой базы урана и тория капиталистических стран». Изд. ВИННИТИ, 1959.
- Ткалич С. М. Опыт исследования растений в качестве индикаторов при геологических поисках и разведках. Вестн. Дальневост. фил. АН СССР, т. 32, вып. 3, 1938.
- Труды второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. Избранные доклады иностранного ученых, т. 8. Геология атомного сырья. Атомиздат, 1959.
- Фюллер Э., Нейерт Г. Счетчики палочек. Перепод 2-го немецкого издания. Атомиздат, 1961.
- Хальд А. Математическая статистика с техническими приложениями. Изд-во иностр. лит., 1956.
- Черепилов В. И. Магнитные измерения. Изд-во МГУ, 1963.
- Шашкин В. Л. Методы анализа естественно-радиоактивных элементов. Атомиздат, 1961.
- Юфа Б. Я. Инструкция по производству массовых пешеходных радиометрических поисков урана. Госгеолтехиздат, 1958.
- Якжин А. А. Опробование и подсчет запасов твердых полезных ископаемых. Госгеолтехиздат, 1954.
- Якжин А. А. Поиски и разведка урановых месторождений. Госгеолтехиздат, 1961.
- Яковлев А. Ф. О форме действующих и регистрируемых аномалий при аэрогамма-съемке. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 5, 1958.
- Яковлева М. Н. О влиянии возраста различных органов растений на определение их урана. Сб. «Вопросы прикладной радиогидрогеологии» издат, 1963.
- Якубович А. Л. Сцинтилляционная радиометрическая аппаратура возможности ее применения для геологических поисков и разведки. 1958.
- Якубович А. Л. Поисково-разведочная радиометрическая аппаратура. Геолтехиздат, М., 1960.
- Яншевский Е. М. и др. Эндемичные ореолы рассеяния некоторых радиоактивных месторождений. Госгеолтехиздат, 1963.
- Ahrens L. H. The lognormal distribution of the elements (A fundamental law of geochemistry and its subsidiary). Geochim. et cosmochim. acta, v. 5, № 2, 1954.
- Саннон Н. L. The effect of U—V deposits in the vegetation of the Colorado Plateau. Amer. Hof Sci. 250, No 10, 1952.
- Саннон Н. L., W. H. Starret. Botanical Prospecting for Uranium on la Ventana Mesa, Sandoval County New Mexico. Geol. Survey Bull., 1009—KZM. 1956.

- Davis F. and Reinhardt P. W. Instrumentation in aircraft for radiation measurements. Nuclear Science and Engineering, v. 2, p. 713-727, 1957.
- Evans R. D. and Evans O. R. Studies of self-absorption in gamma-ray sources. Reviews of Modern Physics, v. 20, p. 305-326, 1948.
- Froelich A. J. and Kleinhampl F. J. Botanical prospecting for uranium in the Deer Flat area, White Canyon district, San Juan county, Utah. U. S. Geol. Survey Bull. 1085-13, 1960.
- Goldstein M. Bull. Soc. Franc. Miner. et crist., v. 80, N 7-9, 1957.
- Gregory A. F. Geological interpretation of aeroradiometric data. Bull. Geol. Surv. Canada, N 86, 1960.
- Hawkes H. E. and Bloom H. Heavy metals in stream sediments used as exploration guides. Min. Engng, v. 8, N 11, p. 1121-1127, 1956.
- Nininger R. D. Minerals for atomic energy. A guide to exploration for uranium, thorium and beryllium. 5-th ed. Toronto, New-York, London, Van Nostrand Co., p. 367, 1955.
- Rosholt J. N. Natural radioactive disequilibrium of the uranium series. U. S. Geol. Surv. Bull., 1084-A, 1959.
- Sakakura A. J. Scattered gamma-rays from thick uranium sources. U. S. Geol. Surv. Bull., 1052-A, p. 50, 1959.
- Thompson Ch. E. and Lakin H. W. A field chromatographic method for determination of uranium in soils and rocks. U. S. Geol. Surv. Bull., 1036-L, p. 200-220, 1957.
- Zescke G. Prospektion von Uran- und Thoriumerzen. Stuttgart, E. Schweizerbart, 768, 1956.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие . . . . .	3
Введение (А. И. Никонов) . . . . .	4

### Раздел первый М Е Т О Д Ы

Глава I. Общая характеристика поисковых методов . . . . .	11
<i>В. И. Красников</i>	
Глава II. Физические основы радиометрических поисков . . . . .	21
<i>(А. Г. Граммиков, А. И. Никонов)</i>	
1. Общая характеристика радиометрических методов . . . . .	
2. Общие сведения по радиоактивности . . . . .	
3. Естественные радиоактивные семейства и элементы . . . . .	
4. Радиоактивное равновесие . . . . .	
5. Радиоактивные лучения, их спектральная характеристика и действие с веществом . . . . .	
6. Методы измерений и радиометрическая аппаратура . . . . .	11
Глава III. Аэрогеофизическая съемка . . . . .	81
<i>(Г. С. Смирнов, Н. Д. Тихомиров)</i>	
1. Геологические и физические предпосылки поисков урана методом аэрогеофизической съемки . . . . .	81
2. Аэрогеофизическая аппаратура . . . . .	91
3. Методика аэрогеофизической съемки и обработка результатов . . . . .	94
4. Геолого-геофизическая интерпретация аэрогеофизических материалов . . . . .	97
5. Наземная проверка аэрогеофизических аномалий . . . . .	107

	Стр.
<b>Глава IV. Автогамма-съемка</b> . . . . .	112
<i>(Ю. Д. Елдокимов)</i>	
1. Некоторые особенности замерений при автогамма-съемке . . . . .	113
2. Методика проведения автогамма-съемки . . . . .	117
3. Примеры практического применения автомобильной гамма-съемки . . . . .	124
<b>Глава V. Пешеходная гамма-съемка</b> . . . . .	129
<i>(Б. Я. Юфа, А. Г. Ветров)</i>	
1. Геологические и другие предпосылки эффективного применения метода . . . . .	130
2. Нормальное и аномальное поля гамма-активности . . . . .	133
3. Аппаратура . . . . .	136
4. Выбор масштаба съемки. Комплексирование с другими поисковыми методами и организация работ . . . . .	140
5. Методика пешеходной гамма-съемки . . . . .	141
<b>Глава VI. Эманиационная съемка</b> . . . . .	152
<i>(В. К. Титов)</i>	
1. Эмансирование пород и миграция эманаций в природных условиях . . . . .	152
2. Аппаратура и вспомогательное оборудование . . . . .	154
3. Особенности и условия применения эманационного метода. Масштабы эманационных съемок . . . . .	158
4. Методика эманационной съемки . . . . .	161
5. Интерпретация результатов съемки и оценка эманационных аномалий . . . . .	164
6. Особенности глубинной эманационной съемки . . . . .	168
<b>Глава VII. Уранометрическая съемка</b> . . . . .	173
<i>(А. Г. Андреев, Н. В. Квашневская, В. С. Комаров)</i>	
1. Общие положения . . . . .	173
2. Методы определения урана в ореолах и потоках рассеяния . . . . .	175
3. Условия применимости уранометрической съемки и сочетание ее с другими поисковыми методами . . . . .	177
4. Методика уранометрических съемок . . . . .	182
5. Обработка и геологическая интерпретация результатов уранометрической съемки . . . . .	187
<b>Глава VIII. Гидрохимические поиски</b> . . . . .	201
<i>(Г. К. Лапина, Е. Н. Куцель, Л. С. Есеева)</i>	
1. Теоретические основы метода . . . . .	201
2. Условия формирования и параметры ореолов рассеяния радиоактивных элементов в подземных водах . . . . .	208
3. Районирование территории СССР по условиям использования гидрохимического метода . . . . .	215
4. Гидрохимические исследования при поисках урановых месторождений . . . . .	218
5. Выделение и интерпретация гидрохимических аномалий . . . . .	221
6. Примеры использования гидрохимического метода . . . . .	227
7. Пути повышения эффективности гидрохимического метода поисков . . . . .	229

	Стр.
<b>Глава IX. Биогеохимическая съемка</b> . . . . .	<b>231</b>
<i>(М. Н. Яковлева, А. Л. Ковалевский)</i>	
1. Общая характеристика биогеохимического метода . . . . .	231
2. Особенности биогеохимии урана и радия в растепных и формироание флорометаллометрических аномалий . . . . .	238
3. Условия применения флорометаллометрии . . . . .	243
4. Методика проведения биогеохимических (флорометаллометрических) поисков месторождений урана . . . . .	244
5. Перспективы развития метода . . . . .	248
<b>Глава X. Гамма-каротаж и гамма-опробование</b> . . . . .	<b>249</b>
<i>(Т. Ф. Иващенко, Б. М. Колесов, А. К. Овчинников)</i>	
<b>А. Гамма-каротаж скважин</b> . . . . .	<b>249</b>
1. Основные положения теории гамма-каротажа . . . . .	249
2. Аппаратура . . . . .	251
3. Проведение поискового гамма-каротажа . . . . .	254
4. Количественная интерпретация результатов гамма-каротажа . . . . .	258
5. Комплексные геофизические исследования в скважинах . . . . .	264
<b>Б. Гамма-опробование урановых руд на месте залегания</b> . . . . .	<b>267</b>
<b>Глава XI. Методы общей геофизики при поисках урановых месторождений</b> . . . . .	<b>271</b>
<i>(Г. А. Тарасов)</i>	
1. Физические свойства горных пород . . . . .	271
2. Задачи и методы общегеофизических работ при поисках урановых месторождений . . . . .	275
3. Примеры применения методов общей геофизики при поисках урановых месторождений . . . . .	282
<b>Раздел второй</b>	
<b>П О И С К И</b>	
<b>Глава XII. Особенности современного этапа геологического поиска урана</b> . . . . .	
<i>(В. И. Красников)</i>	
<b>Глава XIII. Поиски выходящих на поверхность (легко выявляемых) месторождений урана</b> . . . . .	<b>296</b>
<i>(Ю. В. Шарков, Н. С. Райков)</i>	
1. Поиски в аридной зоне . . . . .	298
2. Поиски в таежной зоне . . . . .	302
3. Поиски в других ландшафтных зонах . . . . .	309
4. Оценка выявленных аномалий . . . . .	314
	<b>391</b>

Глава XIV. Поиски не вскрытых эрозией (слепых) эндогенных месторождений урана . . . . .	Стр.
<i>(В. И. Красников, Н. Н. Сочеванов)</i>	320
1. Объекты и задачи поисков . . . . .	320
2. Поисковые критерии и признаки слепых эндогенных месторождений урана . . . . .	321
3. Методика поисков слепых эндогенных месторождений урана . . . . .	329
4. Примеры из практики поисков слепых месторождений . . . . .	337
 Глава XV. Глубинные поиски погребенных месторождений урана . . . . .	 345
<i>(А. Н. Еремев, В. И. Красников, А. Н. Фокин)</i>	
1. Поисковые признаки погребенных урановых месторождений . . . . .	346
2. Общие вопросы глубинных поисков . . . . .	351
3. Выделение для глубинных поисков перспективных площадей и их полевая рекогносцировка . . . . .	355
4. Подготовка площадей для поисков . . . . .	357
5. Собственно поиски . . . . .	362
6. Оценка аномалий и рудопроявлений . . . . .	366
7. Примеры из практики глубинных поисков . . . . .	375
Литература . . . . .	382

Коллектив авторов

### МЕТОДЫ ПОИСКОВ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Редактор издательства *Л. И. Березовская*  
Технически редакторы *Е. С. Иерусалимская, Т. М. Шамова*  
Оформление художника *Ю. В. Сотникова.*      Корректор *Т. М. Кушнер*  
Художественный редактор *В. В. Евдокимов*

---

Сдано в набор 14/V 1969 г.	Подписано в печать 3/IX 1969 г.	Т-12833.
Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub> .	Печ. л. 25 с вкл.	Уч.-над. л. 26,13.
Индекс 1-4-1.	Заказ 494/2762-2.	Тираж 2400 экз.
		Бумага № 1.
		Цена 2 р. 89 к.

Издательство «Недра». Москва, К-12, Третьяковский проезд, д. 1/19.  
Ленинградская типография № 14 «Красный Печатник» Главполиграфпрома  
Комитета по печати при Совете Министров СССР, Московский проспект, 91.

