

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**

*Методические рекомендации
для выполнения лабораторных работ*

Составитель:
Т.Н. Полякова

Воронеж
Издательский дом ВГУ
2015

Утверждено научно-методическим советом геологического факультета Воронежского государственного университета 24 декабря 2014 г., протокол № 5

Рецензент: кандидат геолого-минералогических наук, доцент В.В. Ильяш

Учебно-методическое пособие подготовлено на кафедре полезных ископаемых и недропользования геологического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для бакалавров дневного и заочного отделения геологического факультета Воронежского государственного университета.

Для специальности 020700 – Геология

Содержание

Введение	4
Цели и задачи интерпретации, оценки и разбраковки геохимических аномалий.....	5
I. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ.....	7
Тема 1. Определение статистических параметров геохимического поля. Выделение геохимических аномалий	7
Тема 2. Сравнение двух объектов по средним и дисперсиям.....	14
Тема 3. Оценка качества геохимической съемки.....	16
II. ОЦЕНКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ.....	20
Тема 4. Составление рядов зонального отложения химических элементов.....	20
Тема 5. Графическое изображение результатов литохимических поисков по первичным и вторичным ореолам. Определение параметров геохимических аномалий	23
Тема 6. Количественная обработка данных литохимических поисков по потокам рассеяния.....	28
III. РАЗБРАКОВКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ.....	34
Тема 7. Оценка прогнозных ресурсов по геохимическим данным. Основные термины и понятия.....	37
Библиографический список.....	39
Приложение 1. Значения F-критерия Фишера для уровня значимости $P = 0,05$	40
Приложение 2. Значения t-критерия Стьюдента при уровне значимости $P = 0,05$ (двухсторонний).....	41

Введение

Геохимические методы поисков, основанные на закономерностях распределения химических элементов в различных геосферах, прочно вошли в практику геологоразведочных работ и широко применяются во всем мире. Многолетний опыт выявления рудных месторождений по первичным, вторичным ореолам и потокам рассеяния доказал бесспорную полезность поисковой геохимии как единственного прямого и относительно недорогого метода поисков месторождений, который позволяет оценивать значительные по масштабам площади сравнительно небольшим числом проб. При этом суммарные затраты на производство геохимических работ в сотни раз ниже стоимости выявляемых рудных объектов. Так, например, в период с 1936 по 2001 г. только в бывшем СССР, а затем и в России с помощью геохимических методов было выявлено около 30 месторождений, среди которых такой гигант, как Мурунтау с запасами золота $\approx 5\ 000$ т.

Предметом исследования поисковой геохимии выступает геохимическое поле и его локальные аномалии. Практически любое рудное месторождение сопровождается первичными и вторичными ореолами основных и сопутствующих элементов, которые могут быть обнаружены геохимическими методами. Однако выделение ореолов и потоков рассеяния, установление их природы, промышленной значимости и, как следствие, прогнозная эффективность геохимических поисков во многом определяются профессионализмом геолога-геохимика на этапе проведения количественной интерпретации геохимических данных. В связи с этим навыки обработки данных геохимических поисков должны являться неотъемлемой составной частью профессиональных знаний бакалавров-геохимиков.

Среди методов и приемов прогнозирования и оценки месторождений по геохимическим ореолам наиболее известны и широко применяются геостатистические, которые используют статистические соотношения между характеристиками рудных тел и связанных с ними геохимических ореолов.

Настоящее пособие направлено на знакомство студентов с основными принципами этих методов и включает в себя изложение способов количественной интерпретации геохимических данных и графического изображения результатов, а также примеры типовых задач с подробным описанием их решения.

Структура пособия учитывает содержание и объем лабораторных занятий по дисциплине «Геохимические методы поисков» для бакалавров, обучающихся по специальности 020700 – Геология.

Цели и задачи интерпретации, оценки и разбраковки геохимических аномалий

Под *интерпретацией* геохимических аномалий в поисковой геохимии понимается последовательность действий, возникающая вслед за их выявлением и продолжающаяся вплоть до принятия обоснованного решения о степени перспективности объекта и целесообразности его дальнейшего изучения.

Оценка геохимической аномалии представляет собой качественную и количественную характеристику геохимических параметров выявленной аномалии, на основе которых определяются ее природа (рудная, безрудная, техногенная), продуктивность, тип прогнозируемого оруденения, уровень вскрытия аномалии (уровень эрозионного среза), промышленная значимость. Конечным результатом оценки геохимической аномалии является подсчет прогнозных ресурсов полезных ископаемых.

Разбраковка геохимических аномалий – это совокупность методических приемов, позволяющих получить ответы на два вопроса: связана ли данная аномалия с рудным объектом, и если да, то каковы параметры этого объекта (в частности, можно ли отнести его к промышленно значимым). Ответ на первый вопрос получается обычно уже при качественной оценке аномалий, например, путем выявления геохимической зональности элементов в пределах геохимического ореола. Ответ на второй вопрос требует количественной интерпретации аномалий, включая оценку их продуктивности.

В общем случае при интерпретации, оценке и разбраковке геохимических аномалий решаются следующие основные задачи:

- выделение и оконтуривание геохимических аномалий;
- определение рудно-формационной природы аномалий;
- выявление особенностей внутреннего строения аномалий (зональности);
- оценка уровня эрозионного среза аномалий;
- разбраковка зон рассеянной и концентрированной рудной минерализации;
- определение условий залегания оруденения;
- оценка масштаба оруденения.

Перечисленные задачи решаются в той или иной степени в зависимости от масштаба поисков и иерархического ранга изучаемого рудного объекта (рудный район, рудный узел, рудное поле, месторождение).

Широко распространенные геостатистические методы прогнозирования и оценки рудных объектов по геохимическим аномалиям включают в себя, по крайней мере, пять самостоятельных операций. На первом этапе оцениваются статистические параметры распределения элементов в геохимическом поле, на втором – в геохимическом поле выделяются анома-

лии путем вычисления нижней аномальной границы. На третьем этапе исследуются параметры геохимической аномалии (геометрические размеры, элементный состав, средние характеристики содержаний элементов, их корреляционные связи, зональность, продуктивность, формационную принадлежность и др.) и определяется ее природа (рудная, ландшафтная, техногенная и т.д.), на четвертом этапе производится оценка прогнозных ресурсов по геохимическим данным, на пятом – выполняется разбраковка геохимических аномалий по степени перспективности и очередности их дальнейшего изучения.

І. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Тема. 1. Определение статистических параметров геохимического поля.

Выделение геохимических аномалий

Оценка уровня геохимического фона. Выделение геохимических аномалий пришло в поисковую геохимию из практики интерпретации геофизических полей, где неоднородность структуры поля оценивается по отношению к фону.

Геохимический фон (C_{ϕ}) представляет собой среднее содержание химического элемента в пределах нормального геохимического поля. Для его оценки выбирается та часть площади выполненной геохимической съемки, где выдержаны ландшафтно-геохимические условия, однотипны по химизму горные породы и отсутствуют явные аномалии. Способы оценки геохимического фона зависят от математического закона, которому подчиняется распределение содержаний элементов в выборке (нормальному или логнормальному).

Для макроэлементов (породообразующих) характерно нормальное распределение, когда изменение содержаний от точки к точке определяется соизмеримым и независимым влиянием большого числа факторов (геологических, геохимических, биоклиматических и др.). В этом случае график функции распределения, получивший название кривой Гаусса, будет иметь колоколообразную форму с одним максимумом в точке m и симметрией относительно прямой $x = m$ (рис. 1). Величина m для нормального закона равна среднему арифметическому, в то же время она отвечает наиболее часто встречающемуся значению величины x , или ее моде, и совпадает с медианой – значением, делящим всю совокупность данных пополам. В связи с этим при нормальном распределении уровень геохимического фона (C_{ϕ}) представляет собой среднее арифметическое, наиболее часто встречающееся (модальное) и медианное содержание элемента в пределах однородного участка.

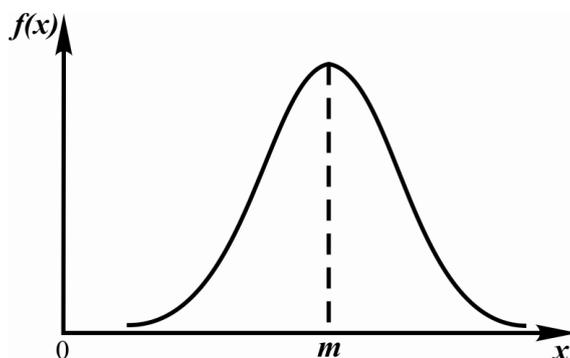


Рис. 1. График функции нормального распределения (кривая Гаусса)

В отличие от макроэлементов, для рудных компонентов распределение содержаний чаще всего не столь упорядочено, и график функции распределения отличается некоторой асимметрией. Однако после перевода содержаний элементов в десятичные логарифмы он снова будет соответствовать кривой Гаусса, и в этом случае говорят о логнормальном законе распределения. Геохимический фон (C_ϕ) для такого распределения содержаний будет равен величине антилогарифма от среднего арифметического десятичных логарифмов содержаний элемента в выборке.

Таким образом, при нормальном законе распределения уровень фона определяется по формуле 1.1:

$$C_\phi = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}, \quad (1.1)$$

при логнормальном – по формуле 1.2:

$$C_\phi = \text{ant lg} \frac{\sum_{i=1}^n \text{lg } C_i}{n}, \quad (1.2)$$

где n – количество проб в выборке, C_i – содержание элемента в пробе.

Задача определения математического закона, которому подчиняется то или иное распределение содержаний элементов в выборке, решается двумя методами. Первый из них (графический) заключается в построении гистограмм или кумулятивных кривых распределения частот встречаемости содержаний элементов и позволяет высказывать гипотезу о виде распределения. Второй метод (математический) дает возможность проверить эту гипотезу с помощью так называемых «критериев согласия» (критерий Пирсона и др.).

В практике интерпретации геохимических данных широкое применение получил достаточно простой и наглядный метод построения гистограмм. Он заключается в определении математического закона по форме гистограммы распределения частоты встречаемости содержаний элементов. Симметричная форма, когда максимальная частота встречаемости расположена в середине и постепенно снижается к обоим концам, характерна для нормального закона распределения, асимметричная – для логнормального (рис. 2).

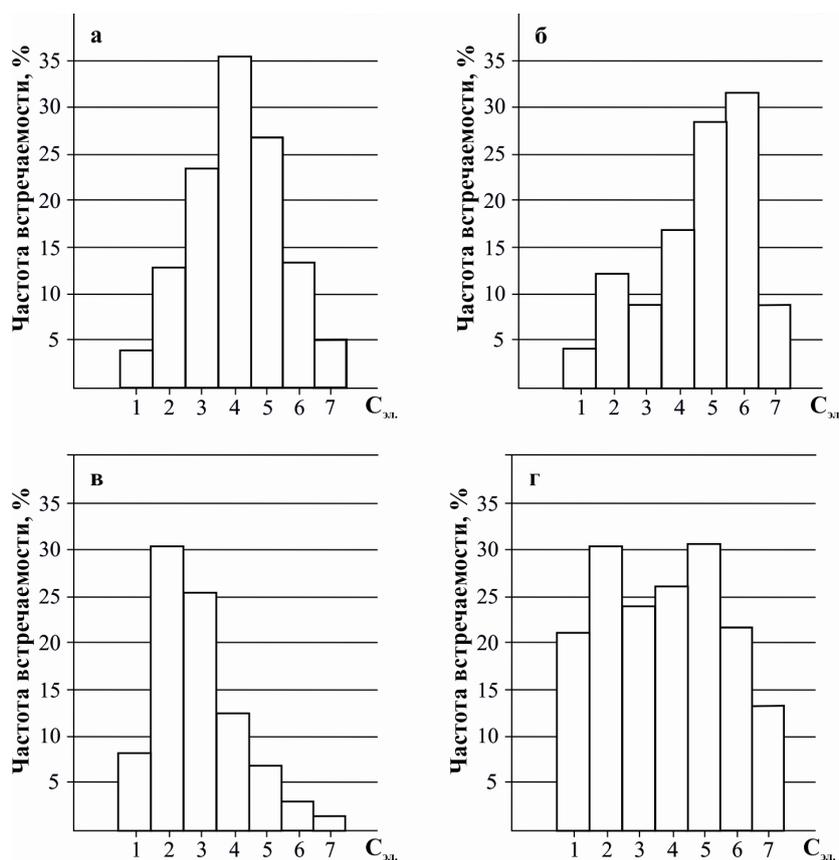


Рис. 2. Основные формы гистограмм распределения: а – симметричная; б–г – асимметричная: б – отрицательно скошенное распределение; в – положительно скошенное распределение; г – гребенка

Оценка неоднородности распределения элементов в области фона. В каждой отдельной точке геохимического поля даже в пределах безрудного участка с однородными геологическими и ландшафтно-геохимическими условиями фоновые содержания элементов характеризуются некоторым разбросом значений. Для характеристики уровня таких отклонений от среднефоновое значения при нормальном распределении используется величина стандартного отклонения (1.3):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_i - C_\phi)^2}{n - 1}} \quad (1.3)$$

В случае логнормального закона роль стандартного отклонения выполняет безразмерная величина ε , получившая название «стандартный множитель» и определяемая как антилогарифм стандартного отклонения десятичных логарифмов содержаний (1.4):

$$\varepsilon = \text{ant lg } S_{lg} \quad (1.4)$$

Стандартное отклонение (стандартный множитель) является важнейшей характеристикой нормального геохимического поля, позволяя судить о степени неоднородности геохимического фона – чем выше значение S (ε), тем больше величина случайных колебаний фона в пределах участка съемки. Попытки установления конкретных причин подобных отклонений фоновых содержаний от их среднего уровня лишены практического смысла и заведомо обречены на неудачу, однако при статистической обработке геохимических данных без учета стандартного отклонения (стандартного множителя) невозможно выделение геохимических аномалий.

Выделение геохимических аномалий проводится по величине порога аномальности (C_A) – наименьшему значению содержания химического элемента, которое можно считать с некоторой степенью вероятности выходящим за пределы колебания фона. Этот параметр связывает уровень геохимического фона со стандартным отклонением при нормальном распределении (1.5):

$$C_A = C_\phi + t \times S, \quad (1.5)$$

или со стандартным множителем при логнормальном распределении (1.6):

$$C_A = C_\phi \times \varepsilon^t. \quad (1.6)$$

Вероятность попадания некоторого количества проб в число аномальных за счет случайных колебаний фона зависит от выбора величины $t > 0$. Если принять C_A на уровне $t = 3$ («жесткий» вариант), вероятность ошибочного отнесения колебаний фона в разряд геохимических аномалий составит 99,86 %, однако при этом будет утрачена часть слабых аномалий, лишь незначительно отличающихся от уровня C_ϕ и имеющих отношение к глубоко залегающим рудным объектам. Если принять C_A на уровне $t = 1$ («мягкий» вариант), то все слабые аномалии выделяются для последующего изучения, но при этом к их числу будет ошибочно отнесено еще 15,87 % фоновых содержаний элементов. При поисковых работах общее число таких фиктивных аномалий может достигать нескольких тысяч. Их геологический осмотр, детализация и оценка в полном объеме невозможны, в результате чего без внимания могут остаться рудные аномалии, и в итоге геохимические поиски окажутся малорезультативными.

В связи с этим существует определенное правило выбора величины t . Коэффициент $t = 3$ (правило «трех стандартов») используется только в случае оценки единичных точек наблюдений с аномальными значениями признака. Если число аномальных проб больше, а пространственная группи-

ровка предполагает их общую природу, применяют более «мягкий» вариант расчета с $t = \frac{3}{\sqrt{m}}$, где m – количество пространственно сближенных точек (например, на одном профиле и/или на соседних профилях), допускающих объединение их в один контур. Величина m берется в пределах от 1 до 9, так как дальнейшее ее увеличение может привести к значительному росту ложных (необоснованно, случайно выделяемых) геохимических аномалий.

Порог аномальности в этом случае при нормальном распределении определяется по формуле 1.7:

$$C_A = C_\phi + S \times \frac{3}{\sqrt{m}}, \quad (1.7)$$

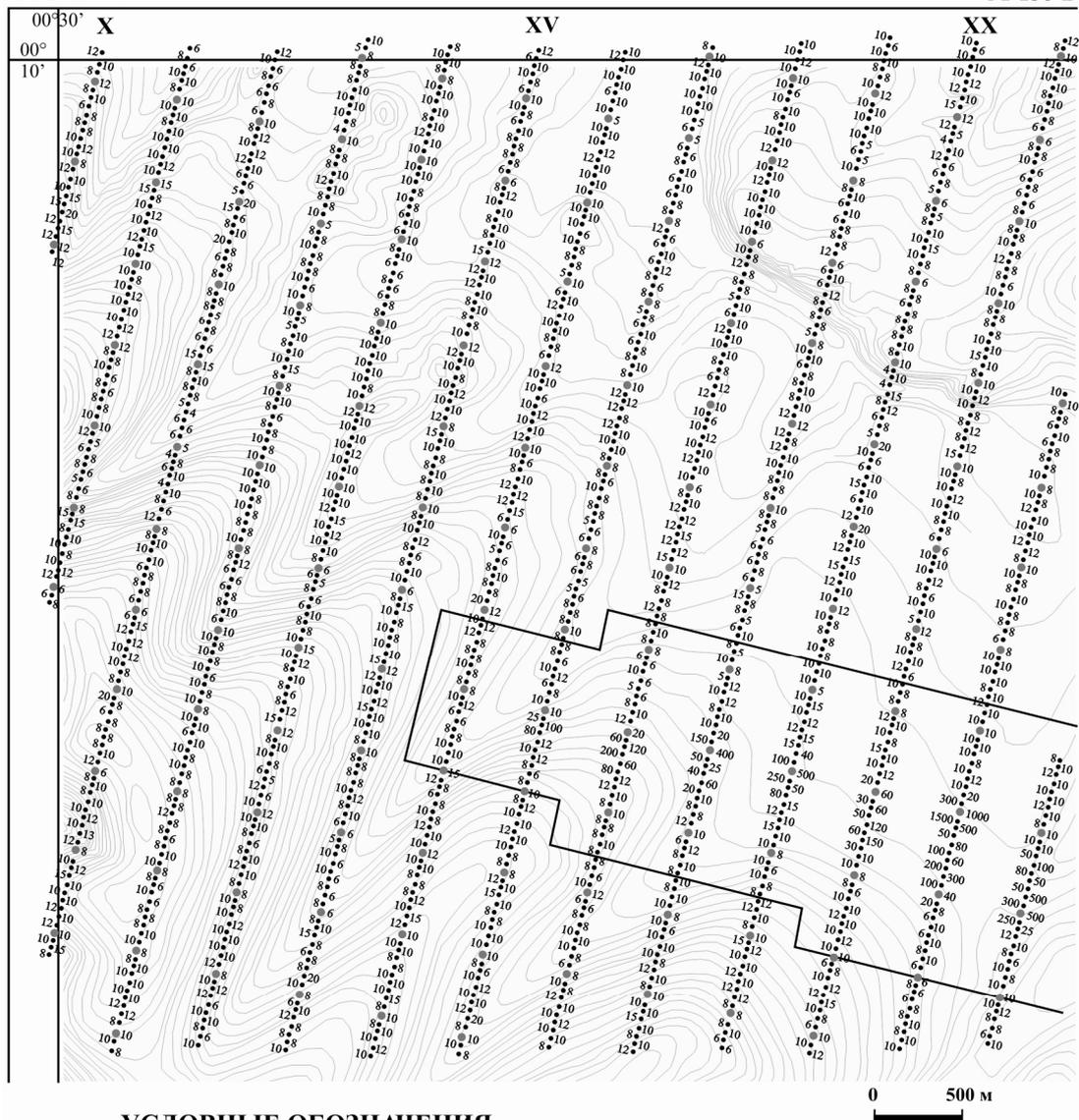
при логнормальном – по формуле 1.8:

$$C_A = C_\phi \times \varepsilon^{\frac{3}{\sqrt{m}}}. \quad (1.8)$$

С учетом вышесказанного, для выделения аномалий вычисляется девять значений порога аномальности C_A . Проверяемые содержания в сближенных точках опробования считаются аномальными, если для каждого из них преодолен соответствующий порог аномальности: $C_i \geq C_{Am}$.

Например, для выделения геохимических аномалий вычислены значения порога аномальности: $C_{A1} = 22$ г/т, $C_{A2} = 17$ г/т, ..., $C_{A9} = 12$ г/т. Исходя из полученных данных, девять и более точек могут быть оконтурены в виде аномалии при условии, что содержание элемента в каждой из них составляет ≥ 12 г/т. Две соседние точки можно считать принадлежащими к единой аномалии, если содержание элемента в каждой из них не менее 17 г/т. Однако, если хотя бы в одной из двух точек элемента менее 17 г/т, а в другой его содержание не достигает 22 г/т, то ни одну из них нельзя считать аномальной. С другой стороны, если даже в единичной точке съемки, без «подозрительных» соседей, содержание элемента составляет ≥ 22 г/т, она признается аномальной и оконтуривается на карте как локальная аномалия.

Пример задачи. Определить статистические параметры нормального геохимического поля (C_ϕ , ε) и порог аномальности (C_{A1} , C_{A2} , C_{A3} , ..., C_{A9}) свинца в элювио-делювии по данным литохимической съемки масштаба 1 : 50 000 (рис. 3). Выборка составляется из всех первых (одиннадцатых, двадцать первых и т.д.) точек съемочной сети.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

-  Изолинии рельефа
-  Профили, точки литохимического опробования и содержания Pb
-  Участок явной аномалии, исключаемый из рассмотрения при оценке параметров геохимического фона

Рис. 3. Фрагмент поэлементной карты-разности результатов спектрального анализа проб поисковой литохимической съемки масштаба 1 : 50 000

Ход решения. Предлагаемая карта является фрагментом поэлементной карты-разности, на которой около пикетов съемочной сети выписаны данные спектрального анализа проб в удобных для этого единицах, в данном случае $10^{-4}\%$ Pb. В юго-восточной части карты отчетливо выделяется геохимическая аномалия, уходящая за границы площади. Район этой яв-

ной аномалии в границах, зрительно относимых к области геохимического фона, из рассмотрения исключаем.

Расчет параметров фона и порога аномальности свинца ведем в программе MS Excel, где составляем таблицу из значений содержаний элемента, снятых с фрагмента карты-разноски.

Закон распределения, которому подчиняются содержания Pb, определяем по форме гистограммы. Для ее построения в программе MS Excel используем значения содержаний Pb в выборке (откладываем по горизонтальной оси) и рассчитанные в % показатели частоты встречаемости соответствующих содержаний (откладываем по вертикальной оси). Асимметричная форма гистограммы свидетельствует о подчинении содержаний свинца логнормальному закону распределения (рис. 4).

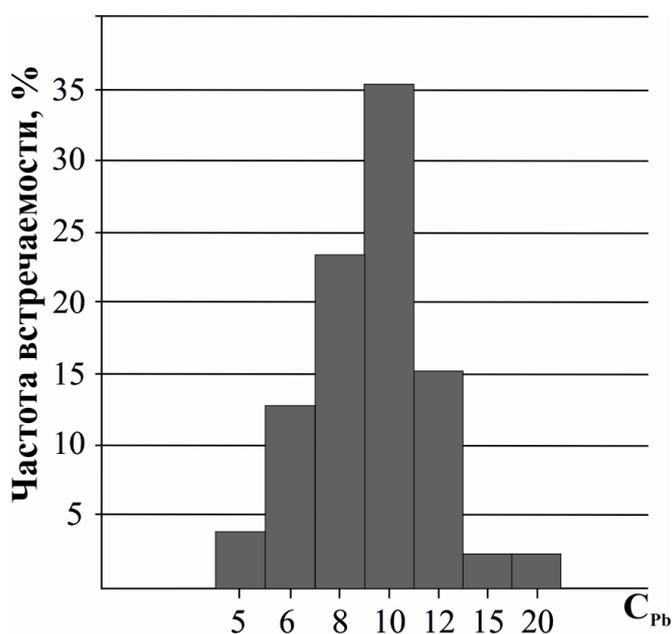


Рис. 4. Гистограмма распределения частоты встречаемости содержаний свинца

Дальнейшие расчеты статистических параметров нормального геохимического поля и порога аномальности выполняем по формулам для логнормального распределения: 1.2 – геохимический фон по $lg C_{Pb}$, 1.4 – стандартный множитель по $lg C_{Pb}$ и 1.8 – порог аномальности. Вычисленные статистические параметры нормального геохимического поля составляют $C_{\phi} = 8,9 \times 10^{-4} \%$ и $\varepsilon = 1,35$; порог аномальности $C_{A1} = 25 \times 10^{-4} \%$; $C_{A2} = 20 \times 10^{-4} \%$; $C_{A3} - C_{A7} = 15 \times 10^{-4} \%$; $C_{A8} - C_{A9} = 12 \times 10^{-4} \%$. Таким образом, на карте как аномалию свинца можно оконтурить одну точку с содержанием элемента $25 \times 10^{-4} \%$, две соседние точки с $Pb = 20 \times 10^{-4} \%$, от трех до семи точек с $Pb = 15 \times 10^{-4} \%$ и от восьми и больше точек с содержанием $Pb = 12 \times 10^{-4} \%$.

Тема 2. Сравнение двух объектов по средним и дисперсиям

При геохимических исследованиях нередко требуется дать обоснованное заключение о сходстве или различии двух и более геологических объектов (выходов однотипных интрузивных пород, зон минерализации и т.п.). При этом часто задачу сравнения приходится решать по ограниченному количеству наблюдений какого-либо признака. В этих условиях она сводится к решению вопроса о том, существенны ли различия в наблюдаемых величинах признака или они обусловлены случайными факторами. Наиболее часто в поисковой геохимии объекты сравниваются по двум основным параметрам распределения в них содержаний – среднему значению (C_{ϕ}) и дисперсии (S^2).

Значимость различий двух оценок дисперсий S_1^2 (большая) и S_2^2 (меньшая) по выборкам объемом соответственно n_1 и n_2 какого-либо показателя устанавливается с помощью F-критерия Фишера по формуле 2.1 при нормальном законе распределения:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (2.1)$$

по формуле 2.2 при логнормальном законе распределения:

$$F = \frac{(\lg \varepsilon_1)^2}{(\lg \varepsilon_2)^2} \quad (2.2)$$

Число степеней свободы для F-критерия Фишера (2.3):

$$f = n - 1 \quad (2.3)$$

Если вычисленное значение критерия F больше критического для определенного уровня значимости ($F_{табл.}$) и соответствующих чисел степеней свободы для числителя и знаменателя, то дисперсии считаются различными.

Значимость различий двух оценок средних величин (например, $C_{\phi 1}$ и $C_{\phi 2}$) с близкими значениями дисперсий определяется с помощью t-критерия Стьюдента при нормальном законе распределения по формуле 2.4:

$$t = \frac{C_{\phi 1} - C_{\phi 2}}{\sqrt{\frac{S_{\phi 1}^2}{n_1} + \frac{S_{\phi 2}^2}{n_2}}}, \quad (2.4)$$

при логнормальном законе распределения по формуле 2.5:

$$t = \frac{\lg C_{\phi_1} - \lg C_{\phi_2}}{\sqrt{\frac{(\lg \varepsilon_1)^2}{n_1} + \frac{(\lg \varepsilon_2)^2}{n_2}}} . \quad (2.5)$$

Число степеней свободы для двустороннего t-критерия Стьюдента (2.6):

$$f = (n_1 + n_2) - 1 . \quad (2.6)$$

При $t > t_{табл.}$ различия между средними величинами признаются статистически значимыми. В случае $t < t_{табл.}$ обе сравниваемые выборки могут быть объединены, так как принадлежат к одной генеральной совокупности.

Пример задачи. Золоторудное месторождение Советского рудного района (Красноярский край) генетически связывают с метаморфическими породами удерейской свиты протерозойского возраста. По геологическим данным свита сложена углеродистыми и биотит-серицитовыми сланцами. Рудовмещающими считаются углеродистые сланцы. При опробовании отложений удерейской свиты с целью оценки их специализации на золото на одном из участков района были получены следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1

Содержание золота в сланцах удерейской свиты

Сланцы биотит-серицитовые				Сланцы углеродистые			
№ пробы	C _{Ау} , г/т	№ пробы	C _{Ау} , г/т	№ пробы	C _{Ау} , г/т	№ пробы	C _{Ау} , г/т
1	4,5	14	3,0	1	7,0	21	3,5
2	1,7	15	5,3	2	7,0	22	12,3
3	2,4	16	12,0	3	6,9	23	3,0
4	7,4	17	15,0	4	5,0	24	10,0
5	2,2	18	2,3	5	10,0	25	8,0
6	2,7	19	2,9	6	14,7	26	12,0
7	4,0	20	3,6	7	5,9	27	2,7
8	3,3	21	3,1	8	8,9	28	9,3
9	4,0	22	2,1	9	6,3	29	11,0
10	11,0	23	5,1	10	5,3	30	7,3
11	12,0	24	4,3	11	5,9	31	2,7
12	2,9	25	3,5	12	8,3	32	5,5
13	8,0	26	2,9	13	15,0	33	5,0
				14	4,0	34	8,3
				15	6,8	35	7,0
				16	11,9	36	12,9
				17	12,0	37	9,0
				18	11,0	38	13,0
				19	10,0	39	4,5
				20	4,3	40	6,3

Пользуясь имеющимися аналитическими данными, определить параметры распределения золота в углеродистых и биотит-серицитовых сланцах, сравнить выделенные типы сланцев по критериям Фишера и Стьюдента, определить, существенны ли различия между геологическими объектами по дисперсиям и средним значениям. Распределение золота в сланцах подчиняется логнормальному закону.

Ход решения. Расчеты ведем в программе MS Excel. Вычисляем параметры распределения золота отдельно для углеродистых и биотит-серицитовых сланцев по формулам 1.2 (геохимический фон) и 1.4 (стандартный множитель): сланцы биотит-серицитовые – $C_{\phi} = 4,17$ г/т, $lgC_{\phi} = 0,62$, $\varepsilon = 1,82$, $lg\varepsilon = 0,26$; сланцы углеродистые – $C_{\phi} = 7,26$ г/т, $lgC_{\phi} = 0,86$, $\varepsilon = 1,59$, $lg\varepsilon = 0,20$.

Определяем F-критерий Фишера по формуле 2.2, при этом в числителе используем большее значение ε : $F = (0,26)^2 / (0,20)^2 = 0,07 / 0,04 = 1,68$. Число степеней свободы для числителя (сланцев биотит-серицитовых) составляет $f_1 = 26 - 1 = 25$, для знаменателя (сланцев углеродистых) $f_2 = 40 - 1 = 39$.

Сравнивая полученные результаты с табличными данными (прил. 1), устанавливаем, что вычисленное значение критерия F меньше критического для уровня значимости $P = 0,05$ (95 %) и соответствующих чисел степеней свободы для числителя и знаменателя ($F_{табл.} = 2,11$). Следовательно, наблюдаемые различия между дисперсиями биотит-серицитовых и углеродистых сланцев статистически не значимы.

Вычисляем t -критерий Стьюдента по формуле 2.5, учитывая, что в качестве $C_{\phi 1}$ необходимо использовать большее значение: $t = (0,86 - 0,62) / \sqrt{(0,20)^2 / 40 + (0,26)^2 / 26} = 0,24 / 0,06 = 4,03$. Число степеней свободы для t -критерия $f = 26 + 40 - 1 = 65$. Сравнивая полученные результаты с табличными данными (прил. 2), устанавливаем, что вычисленное значение критерия t больше критического для уровня значимости $P = 0,05$ (95 %) и соответствующего числа степеней свободы ($t_{табл.} = 1,9986$). Следовательно, наблюдаемые различия средних значений для биотит-серицитовых и углеродистых сланцев статистически значимы, и предположение о преимущественной специализации на золото углеродистых сланцев удерейской свиты подтверждается математически.

Тема 3. Оценка качества геохимической съемки

Качество поисковых геохимических съемок определяется воспроизводимостью их результатов при двукратных независимых наблюдениях по случайно выбранным профилям и точкам. Для этого в ходе полевых работ предусмотрено контрольное опробование, объем которого должен составлять не менее 3 % от общего объема проб.

В камеральный период качество геохимических работ определяется путем вычисления относительной средней систематической ($S_{cuct.}$) и случайной ($S_{случ.}$) погрешности, значения которых не должны превышать установленных допусков. Наличие большой систематической погрешности, характеризующей качество аналитических исследований, не требует переделки работ, необходимо только немедленно выявить и устранить ее причину. Основными из них при спектральном анализе являются: а) несоответствие анализируемого материала (пробы) и эталонов по валовому и минералогическому анализу; б) устойчивые, но неучтенные нарушения условия проведения анализа (режим съемки спектра, проявление пластинки и т.д.). Случайная погрешность характеризует, главным образом, качество полевой геохимической съемки и вызывается весьма большим числом причин, не поддающихся точному учету. В связи с этим превышение величиной $S_{случ.}$ допустимых значений означает брак геохимической съемки и влечет за собой повторное геохимическое опробование.

Спектральный анализ основан на принципах сравнения – во сколько раз содержание определяемого элемента в данной пробе отличается от его содержания в эталонной пробе. В связи с этим все вычисления погрешностей геохимических съемок ведутся по логарифмам содержаний.

Для оценки относительной средней систематической погрешности $S_{cuct.}$ определяют среднюю систематическую погрешность $\Delta_{сист.}$ (3.1):

$$\Delta_{cuct.} = \frac{(\lg C_{i1} - \lg C_{k1}) + (\lg C_{i2} - \lg C_{k2}) + \dots + (\lg C_{in} - \lg C_{kn})}{n}, \quad (3.1)$$

где C_i – содержание элемента в рядовой пробе, C_k – содержание элемента в контрольной пробе, n – количество проб, подвергшихся контролю.

Антилогарифм средней систематической погрешности дает величину $S_{cuct.}$ (3.2), которая показывает, во сколько раз первые результаты систематически больше или меньше вторых:

$$S_{cuct.} = \text{ant } \lg \Delta_{cuct.} \quad (3.2)$$

Значения $S_{cuct.}$ в интервале от 0,95 до 1,05 считаются допустимыми. В случае если величина $S_{cuct.}$ выходит за пределы 0,9–1,1, средняя систематическая погрешность подлежит исключению, для чего $\Delta_{сист.}$ алгебраически вычитают из всех $\lg C_i$. По полученным данным без существенного систематического расхождения ($\lg C_i^*$) вычисляют среднюю случайную погрешность геохимической съемки $\Delta_{случ.}$ (3.3):

$$\Delta_{случ.} = \frac{|\lg C_{i1}^* - \lg C_{k1}| + |\lg C_{i2}^* - \lg C_{k2}| + \dots + |\lg C_{in}^* - \lg C_{kn}|}{n \times \sqrt{2}} \quad (3.3)$$

Величина относительной средней случайной погрешности $S_{случ.}$ представляет собой антилогарифм средней случайной погрешности $\Delta_{случ.}$ (3.4):

$$S_{случ.} = \text{ant lg } \Delta_{случ.} \quad (3.4)$$

и показывает, во сколько раз полученные значения содержаний элементов больше или меньше истинных. Согласно «Инструкции... по геохимическим методам поисков рудных месторождений» значение $S_{случ.}$ не должно превышать 1,6 при отборе проб рыхлых образований и растений и 2,0 – в случае опробования коренных пород, т.е. измеренные содержания элементов в геохимическом поле могут в среднем отличаться от истинных не более чем в $1,6^{\pm 1}$ или в $2,0^{\pm 1}$ раза соответственно. При большей величине случайной погрешности съемка считается браком.

В число пар проб (C_i и C_k), по которым производят подсчет погрешности, включают лишь те, где хотя бы в одной пробе из двух обнаружено значимое содержание элемента. Если при этом в другой пробе элемент не установлен, то ей приписывается содержание, равное половине порога чувствительности анализа.

Пример задачи. Определить качество выполненного литохимического опробования на медь для участка «Поисковый» по пикетам 0–31 профиля 104 путем сопоставления результатов первичной и повторно-контрольной съемки (табл. 2) и вычисления относительной средней систематической ($S_{сист.}$) и случайной ($S_{случ.}$) погрешностей.

Таблица 2

Содержание меди в рядовых (C_i) и контрольных (C_k) пробах участка «Поисковый»

Профиль/пикет	Cu, 10 ⁻³ %		Профиль/пикет	Cu, 10 ⁻³ %	
	C_i	C_k		C_i	C_k
104/0	5	4	104/16	6	8
1	10	6	17	10	8
2	4	1	18	10	10
3	8	10	19	10	8
4	20	10	20	8	5
5	15	20	21	12	8
6	10	8	22	15	8
7	25	12	23	10	6
8	8	8	24	6	4
9	8	10	25	8	5
10	25	15	26	8	20
11	8	15	27	8	20
12	20	25	28	8	5
13	15	15	29	25	12
14	15	25	30	8	7
15	12	30	31	12	6

Ход решения. Расчеты ведем в программе MS Excel. Вычисляем десятичные логарифмы содержания меди в рядовых (C_i) и контрольных (C_k) пробах – $\lg C_i$ и $\lg C_k$. Находим $\Delta_{\text{сист.}}$ по формуле 3.1 ($\Delta_{\text{сист.}} = 1,96/32 = 0,06$) и $S_{\text{сист.}}$ по формуле 3.2 ($S_{\text{сист.}} = \text{antlg } 0,06 = 1,15$). Полученное значение $S_{\text{сист.}}$ выходит за пределы установленного инструкцией интервала 0,9–1,1, поэтому для исключения систематической погрешности величину $\Delta_{\text{сист.}}$ алгебраически вычитаем из всех $\lg C_i$. По исправленным значениям ($\lg C_i^*$) вычисляем $\Delta_{\text{случ.}}$, используя формулу 3.3. При этом учитываем, что разница логарифмов содержаний в рядовых и контрольных пробах определяется по модулю, т.е. все полученные значения должны быть положительными ($\Delta_{\text{случ.}} = 6,36/(32 \times \sqrt{2}) = 6,36/45,25 = 0,14$). Находим $S_{\text{случ.}}$ по формуле 3.4 ($S_{\text{случ.}} = \text{antlg } 0,14 = 1,38$). Рассчитанная величина $S_{\text{случ.}}$ не превышает допустимого при отборе проб рыхлых образований предела в 1,6, что свидетельствует об удовлетворительном качестве выполненного в пределах участка «Поисковый» литохимического опробования на медь.

II. ОЦЕНКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Тема 4. Составление рядов зонального отложения химических элементов

Одной из важнейших характеристик первичных ореолов рассеяния является их зональность. Она проявляется в закономерном изменении содержаний элементов в различных частях ореола. Различают зональность осевую, продольную и поперечную. *Осевая (вертикальная)* зональность развивается в направлении движения гидротермальных растворов (обычно по восстанию рудного тела), *продольная* – в направлении растекания растворов по простиранию рудного тела, *поперечная* – в направлении, перпендикулярном к осевой плоскости рудного тела, т.е. вкрест простирания ореола.

Для решения наиболее важной задачи геохимических поисков по первичным ореолам – обнаружения слепого оруденения – главное значение имеет осевая (вертикальная) зональность, играющая ведущую роль при оценке уровня эрозионного среза оруденения.

Наиболее подробно ряд осевой (вертикальной) зональности изучен для сульфидных гидротермальных месторождений. В обобщенном виде он выглядит следующим образом (снизу вверх): W – Be – As₁ – Sn – Au₁ – U – Mo – Co – Ni – Bi – Au₂ – Cu – Zn – Pb – Ag – Hg – As₂ – Sb – Ba – J, Br.

По отношению к сульфидсодержащим (например, полиметаллическим) рудам эти элементы можно разделить на подрудные (W, Mo, Co, Ni), рудные (Cu, Pb, Zn, Au) и надрудные (Ag, As, Hg). Конечно, они присутствуют в повышенных концентрациях во всем объеме первичного ореола, но их количественные соотношения меняются весьма контрастно снизу вверх, позволяя оценивать уровень среза первичного ореола и масштабы оруденения.

Для выявления зональности первичных ореолов существуют различные методы составления рядов зонального отложения элементов, однако наиболее широкое применение в практике геохимических работ получила методика, предложенная С.В. Григоряном и вошедшая в действующую «Инструкцию по геохимическим методам поисков рудных месторождений». Она основана на расчете показателя зональности элементов-индикаторов оруденения, который представляет собой отношение линейной продуктивности ореола данного элемента к сумме продуктивностей ореолов всех элементов-индикаторов оруденения в первичном ореоле.

По результатам расчета составляется ряд зональности, который отражает величины относительного накопления элементов по горизонтам изучаемого первичного ореола в направлении осевой зональности. Элементы с максимальными показателями зональности на нижних горизон-

тах будут располагаться в левой части ряда (индикаторы нижних частей ореолов), на верхних горизонтах – в правой части.

Для уточнения местоположения в ряду зональности элементов, максимальные значения показателей зональности которых установлены на одних и тех же горизонтах, рассчитывается градиент показателя зональности в исследуемом направлении по формуле 4.1:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{D_{max}}{D_i}}{n}, \quad (4.1)$$

где G – градиент показателя зональности; D_{max} – максимальное значение показателя зональности данного элемента; D_i – значение показателя зональности данного элемента на i -горизонте; n – число горизонтов (не считая горизонта максимального накопления).

При сравнении элементов, максимальное накопление которых установлено на крайнем нижнем горизонте, в ряду зональности они располагаются по убыванию градиента, т.е. чем выше градиент, тем левее (ниже) место элемента в ряду зональности. Когда максимальные значения показателей зональности элементов установлены на крайнем верхнем горизонте, в ряду зональности они располагаются по возрастанию градиента, т.е. чем выше градиент, тем правее (выше) место элемента в ряду зональности.

В тех случаях, когда максимальное относительное накопление нескольких элементов наблюдается на уровне средних горизонтов, для уточнения их местоположения в ряду зональности используется разность градиентов $G_1 - G_2$, где G_1 – градиент по восстанию рудной зоны, G_2 – градиент по падению от уровня максимального накопления элемента. Последовательность отложения этих элементов в ряду зональности будет определяться величиной разности градиентов – чем она больше, тем левее место элемента в ряду зональности и наоборот.

Пример задачи. На основе данных о линейной продуктивности ореолов на различных уровнях Северной рудной зоны месторождения «Перевальное» (табл. 3) определить ряд зонального отложения элементов по методу С.В. Григоряна.

Ход решения. Вычисляем показатели зональности для каждого элемента на всех горизонтах опробования путем деления линейной продуктивности i -элемента на суммарную продуктивность элементов данного горизонта (например, $P_{Pb}/P_{Pb+Cu+Zn+Ag+Mn} = 40,75/213,79 = 0,191$). Сводим данные в таблицу (табл. 4). Для проверки правильности вычислений рассчитываем сумму показателей зональности по каждому горизонту, которая должна быть равна 1.

Таблица 3

Линейная продуктивность ореолов на различных уровнях Северной рудной зоны месторождения «Перевальное»

Элементы	Горизонты опробования		
	+100	+200	+300
Pb	40,75	85,5	28,28
Zn	40,66	88,5	30,23
Cu	4,07	1,95	1,61
Ag	0,586	0,271	0,082
Mn	127,72	41,12	73,1
Сумма	213,79	217,34	133,30

Таблица 4

Показатели зональности элементов на различных уровнях Северной рудной зоны месторождения «Перевальное»

Элементы	Горизонты опробования		
	+100	+200	+300
Pb	0,191	0,393	0,212
Zn	0,190	0,407	0,227
Cu	0,019	0,009	0,012
Ag	0,003	0,001	0,001
Mn	0,597	0,189	0,548
Сумма	1,000	1,000	1,000

Анализируя табл. 4, устанавливаем, что на нижнем горизонте (+300) максимальное накопление характерно для марганца, на среднем (+200) – для свинца и цинка, на верхнем (+100) – для меди и серебра. Учитывая, что элементы с максимальным накоплением на самом нижнем горизонте будут стоять крайними слева в ряду зонального отложения, а элементы с максимальными показателями зональности на самом верхнем горизонте – крайними справа, выводим следующий ряд вертикальной зональности (снизу вверх): Mn → (Pb, Zn) → (Ag, Cu).

В скобки заключены элементы, взаимоотношения которых между собой остаются неясными, поскольку максимальные значения их показателей зональности установлены на одних и тех же горизонтах рудной зоны. Для уточнения положения Ag и Cu, которые накапливаются на верхнем горизонте, рассчитываем градиенты показателей зональности по формуле 4.1:

$$\text{для меди} - G_{Cu} = ((0,019/0,009) + (0,019/0,012))/2 = 1,85;$$

$$\text{для серебра} - G_{Ag} = ((0,003/0,001) + (0,003/0,001))/2 = 3,33.$$

На крайних верхних горизонтах рудной зоны элементы располагаются по возрастанию градиента показателя зональности, в связи с этим

место серебра с $G_{Ag} > G_{Cu}$ в ряду зонального отложения правее (выше) меди, т.е. $Mn \rightarrow (Pb, Zn) \rightarrow Cu \rightarrow Ag$.

Для Pb и Zn, максимальное относительное накопление которых приурочено к среднему горизонту рудной зоны, рассчитываем по два градиента показателя зональности – G_1 по восстанию, т.е. для вышележащих горизонтов, и G_2 по падению, т.е. для нижележащих горизонтов. Расчеты выполняем по формуле 4.1.

$$\text{для свинца} - G_{1Pb} = 0,393/0,191 = 2,06; G_{2Pb} = 0,393/0,212 = 1,85 \\ \text{и } G_{1Pb} - G_{2Pb} = 0,21;$$

$$\text{для цинка} - G_{1Zn} = 0,407/0,190 = 2,14; G_{2Zn} = 0,407/0,227 = 1,80 \\ \text{и } G_{1Zn} - G_{2Zn} = 0,35.$$

Разность градиентов показателя зональности цинка больше, что позволяет расположить его в ряду зональности левее (ниже) свинца.

Записываем вертикальный ряд зонального отложения элементов Северной рудной зоны месторождения «Перевальное» в окончательном виде (снизу вверх): $Mn \rightarrow Zn \rightarrow Pb \rightarrow Cu \rightarrow Ag$.

Тема 5. Графическое изображение результатов литохимических поисков по первичным и вторичным ореолам.

Определение параметров геохимических аномалий

Результаты геохимических поисков по первичным и вторичным ореолам рассеяния принято изображать на геологической основе в виде линий изоконцентраций (линий равного содержания) элементов, т.е. на картах геохимические аномалии выглядят как изолинии вокруг проб с высокими содержаниями элемента.

При построении моно- или полиэлементных геохимических карт линия изоконцентраций с минимальным значением содержания элемента, как правило, отделяет фон от порога аномальности. Последующие изолинии по значению признака должны отличаться от предыдущих примерно в 2,5–3 раза. Например, если порог аномальности (C_A) равен 0,1 г/т, то первая линия изоконцентраций будет соединять пробы с содержанием элемента 0,1 г/т, следующая за ней – 0,3 г/т, далее – 0,9 г/т и т.д.

При вычерчивании линий равных содержаний элементов руководствуются общеизвестными правилами интерполяции:

– расчетные точки проведения линий изоконцентраций определяются путем разбивки расстояния между двумя ближайшими точкам отбора проб на равные отрезки в соответствии с принятым шагом размещения изолиний;

– линии изоконцентраций никогда не пересекаются;

– линии изоконцентраций никогда не обрываются на поле карты – они либо замыкаются сами на себя, либо выходят на границу рабочего листа;

– не могут соседствовать линии изоконцентраций со значениями, отличающимися более чем на один шаг. Так, например, при шаге 0,2 г/т между изолиниями 0,2 и 0,4 г/т всегда пройдет изолиния 0,3 г/т.

Для построения карт изоконцентраций элементов возможно применение компьютерных технологий: Surfer, ArcGis и др.

Определение параметров геохимических аномалий. Характеристики геохимических аномалий определяют размер, показатель контрастности и продуктивность.

Геометрические размеры аномалий целиком зависят от определения C_A , поэтому статистические границы геохимических ореолов, как правило, не совпадают с контурами металлогенических объектов.

Показатель контрастности (K) представляет собой безразмерную величину и позволяет сравнивать аномалии с учетом степени неоднородности геохимического фона. Его оценка производится путем нормирования амплитуды геохимической аномалии на стандартное отклонение S или на стандартный множитель ε . При нормальном законе распределения содержаний элементов по формуле 5.1:

$$K = \frac{C_{max} - C_{\phi}}{S}, \quad (5.1)$$

при логнормальном – по формуле 5.2:

$$K = \frac{I}{lg \varepsilon} \times lg \frac{C_{max}}{C_{\phi}}, \quad (5.2)$$

где C_{ϕ} – геохимический фон; C_{max} – максимальное значение содержания элемента в контуре аномалии; S – стандартное отклонение; ε – стандартный множитель.

Аномалии с показателем $K > 3$ считаются контрастными и надежно выявляются одной точкой опробования; для выделения слабоконтрастных ореолов с $1 < K < 3$ необходимо наличие от 2 до 9 точек; аномалии с показателем $K < 1$ наверняка будут пропущены.

Показатель контрастности аномалии не обязательно отражает масштаб оруденения, с которым связан ореол. Нередко контрастность аномалии зависит от глубины залегания рудного объекта или от свойств пород перекрывающей толщи. Так, например, многие месторождения на дневной поверхности проявляются лишь слабоконтрастными наложенными ореолами, если мощность аллохтонных перекрывающих отложений составляет десятки или сотни метров. При поверхностной съемке такие ореолы могут быть легко пропущены.

Продуктивность геохимической аномалии представляет собой надфоновое количество рудного элемента в ореоле, отнесенное к единице его длины (линейная продуктивность) или площади (площадная продуктивность). Этот показатель одновременно учитывает геометрические размеры аномалии и среднее содержание в ней рудного элемента, что обеспечивает предварительную сравнительную оценку выявленных геохимических ореолов, находящихся в сходных геологических и ландшафтно-геохимических условиях.

Линейная продуктивность (M) характеризует надфоновое количество рудного элемента в заданном сечении единой мощности по профилю геохимической аномалии. При равномерной съемочной сети она определяется по формуле 5.3:

$$M = \Delta x \times \left(\sum_{x=1}^n C_x - n \times C_{\phi} \right), \quad (5.3)$$

где Δx – шаг пробоотбора по профилю; $\sum_{x=1}^n C_x$ – арифметическая сумма содержаний элемента по профилю; C_{ϕ} – фоновое содержание элемента, n – число проб, введенных в подсчет. Выражается линейная продуктивность в метро-процентах (м%).

Площадная продуктивность (P) отражает надфоновое количество рудного элемента в контуре аномалии на плоскости, т.е. в заданном площадном сечении единой мощности. При правильной (прямоугольной) сети пробоотбора подсчет площадной продуктивности аномалии ведется по формуле 5.4:

$$P = \Delta x \times l \times \left(\sum_{x=1}^n C_x - n \times C_{\phi} \right), \quad (5.4)$$

где Δx – шаг пробоотбора по профилю; l – расстояние между профилями; $\sum_{x=1}^n C_x$ – арифметическая сумма содержаний элемента в контуре аномалии; C_{ϕ} – фоновое содержание элемента, n – число проб, вошедших в подсчет. Выражается площадная продуктивность в квадратных метро-процентах (м² %).

Вычисление линейной и площадной продуктивности аномалий следует вести, используя поэлементные карты-разноски с цифрами содержаний элемента в пробах после проведения линий изоконцентраций в контуре наружной изолинии $C_i \geq C_A$.

Пример задачи. Определить статистические параметры нормального геохимического поля и порог аномальности для меди в элювио-делювии по данным литохимической съемки масштаба 1: 10 000 в пределах участка Домба (рис. 5). Построить карту распределения меди. Определить показатель контрастности геохимической аномалии. Вычислить ее линей-

ную (по профилю 22) и площадную продуктивность. Сеть опробования составляет 100×20 м.

Ход решения. Расчет параметров фона и порога аномальности меди ведем в программе MS Excel, где составляем таблицу из значений содержаний элемента, снятых с фрагмента карты-разновки.

Для установления математического закона, которому подчиняется распределение Cu в элювио-делювии участка Домба, строим гистограмму распределения частоты встречаемости содержаний элемента (см. тему 1). Асимметричная форма гистограммы свидетельствует о логнормальном распределении меди (рис. 6).

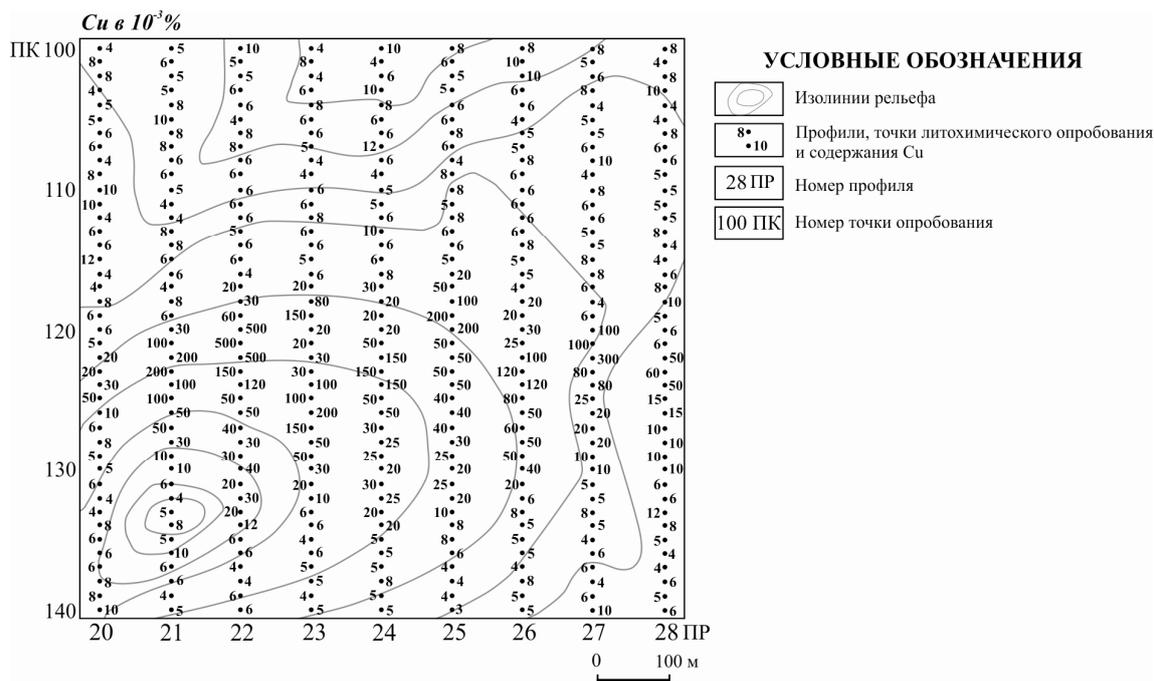


Рис. 5. Карта-разновка содержаний меди в элювио-делювии участка Домба по результатам литохимической съемки масштаба 1: 10 000

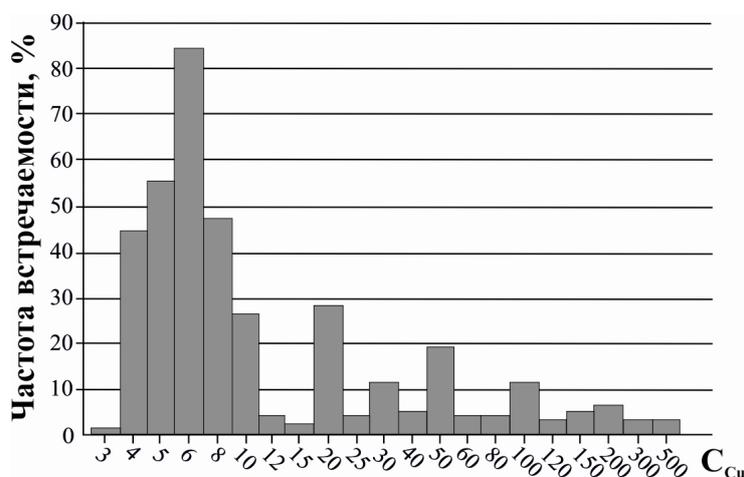


Рис. 6. Гистограмма распределения меди в элювио-делювии участка Домба

Дальнейшие расчеты статистических параметров нормального геохимического поля выполняем по формулам для логнормального закона: 1.2 – геохимический фон ($C_{\phi} = 11 \times 10^{-3} \%$), 1.4 – стандартный множитель $\varepsilon = 3,03$). Для выделения аномалий вычисляем девять значений порога аномальности C_A по формуле 1.8. Величину $C_{A9} = 34 \times 10^{-3} \%$ принимаем за минимальное значение линии изоконцентраций для оконтуривания девяти и более точек, $C_{A1} = 312 \times 10^{-3} \%$ учитываем при оценке аномальности единичных точек. Последующие значения изолиний вычисляем путем увеличения предыдущих в 3 раза. Таким образом, на карту распределения содержаний элемента выносим линии изоконцентраций $Cu = 34 \times 10^{-3} \%$; $102 \times 10^{-3} \%$ и $306 \times 10^{-3} \%$ (рис. 7).

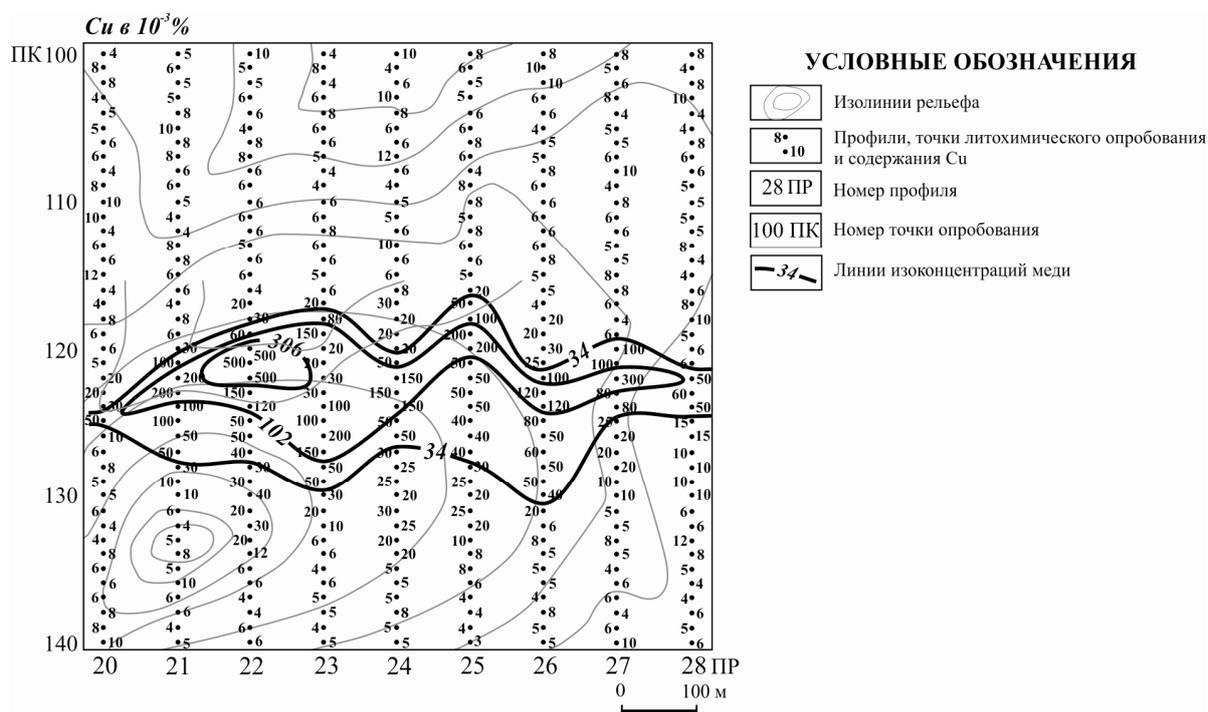


Рис. 7. Карта распределения меди в элювио-делювии участка Домба по результатам литохимической съемки масштаба 1: 10 000

Показатель контрастности (K) выделенной геохимической аномалии определяем по формуле 5.2 (для логнормального закона распределения): $K = (1/\lg 3,03) \times \lg(500/11) = 2,08 \times 1,65 = 3,43$. Рассчитанная величина > 3 , что позволяет говорить о высокой контрастности вторичного ореола меди.

В контуре наружной изолинии $C_i \geq 34 \times 10^{-3} \%$ вычисляем линейную продуктивность аномалии (профиль 22) по формуле 5.3 и площадную продуктивность по формуле 5.4. Исходя из сети опробования, расстояние между точками отбора проб на профиле составляет 20 м, между профилями – 100 м. Учитывая, что содержания меди приведены в $10^{-3} \%$, для перевода линейной продуктивности в м%, а площадной – в м²% расчетные

значения умножаем на 0,001. Таким образом, линейная продуктивность аномалии составила: $M = 20 \times (1970 - 9 \times 11) \times 0,001 = 37 \text{ м } \%$; площадная продуктивность: $P = 100 \times 20 \times (7520 - 63 \times 11) \times 0,001 = 13\,625 \text{ м}^2 \%$.

Тема 6. Количественная обработка данных геохимических поисков по потокам рассеяния

Литохимический поток рассеяния представляет собой массу разрушенных денудацией горных пород, перемещаемую поверхностными водами в сторону понижений рельефа.

Питание потоков рассеяния может осуществляться 4-мя путями:

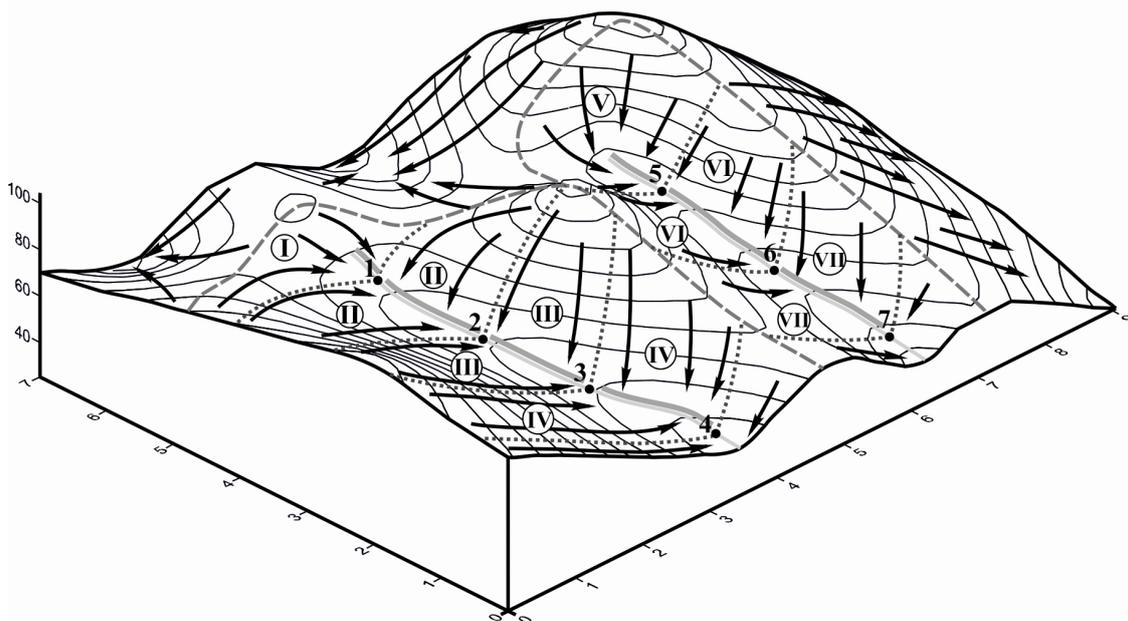
- 1) в результате осыпания, обваливания и смыва со склонов материала механических вторичных ореолов;
- 2) в результате непосредственного размыва коренных пород и руд;
- 3) путем переноса материала в растворенном состоянии подземными и поверхностными водами боковых склонов;
- 4) через солевые и газовые ореолы восходящей миграции.

Общеизвестно, что каждый водоток имеет свою площадь водосбора, т.е. участок земной поверхности, с которого вода по условиям рельефа стекает в водоток. Потоки рассеяния, формирование которых тесно связано с деятельностью поверхностных вод, также характеризуются наличием площадей водосбора, или областей сноса, откуда в аллювиальные отложения потоков рассеяния поступают химические элементы, в том числе и рудные. Без данных о площади сноса рыхлого материала невозможно пространственно локализовать источник рудных элементов в донных отложениях, а также оценить степень перспективности потоков рассеяния. В связи с этим количественная обработка данных геохимических поисков по потокам рассеяния всегда начинается с определения площади водосбора для каждой отобранной донной пробы. Известно, что перемещение частиц по склону происходит перпендикулярно к условным горизонтальным плоскостям, проекциями которых на дневную поверхность являются горизонтали. В связи с этим для определения площади водосбора донных проб от каждой точки опробования проводят перпендикуляр к ближайшей горизонтали, затем от места пересечения к следующей горизонтали и т.д. Восстанавливать перпендикуляры нужно до ближайшей водораздельной линии, а далее следовать ей (рис. 8).

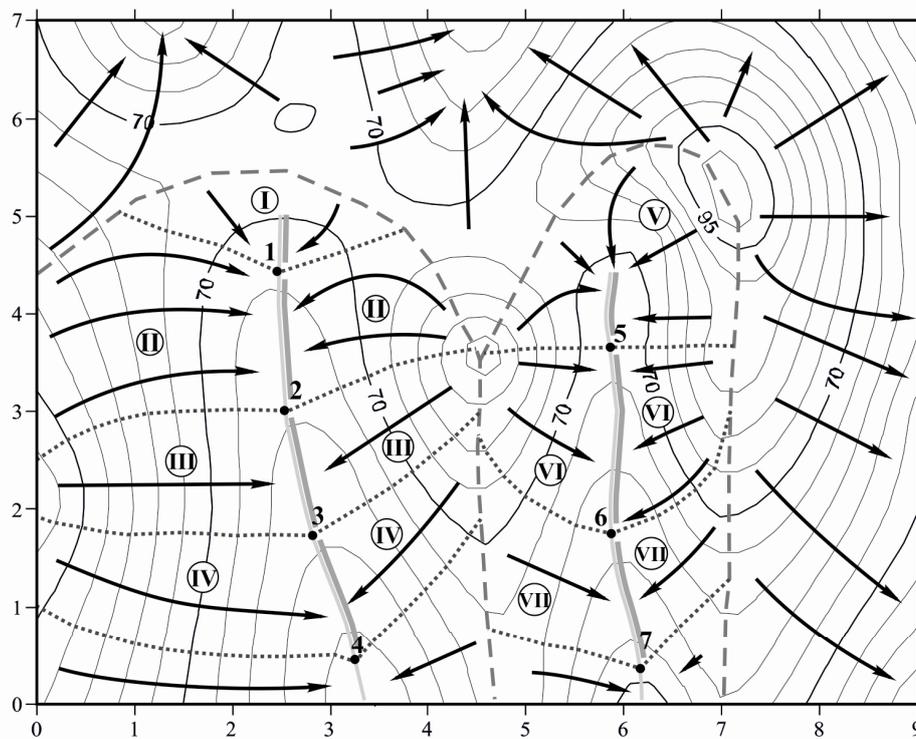
Площади водосбора для точек опробования удобно определять в среде ArcGis, где автоматически рассчитывается и величина площади (S_x).

Последовательность дальнейшей интерпретации результатов геохимических поисков по потокам рассеяния аналогична таковой при обработке данных литохимической съемки по первичным и вторичным ореолам рассеяния и включает в себя:

3D- проекция местности



Топографический план местности



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

	Изолинии рельефа		Водораздельная линия
	Поверхностный водоток		Контур и номер площади сноса материала в донную пробу (номер площади соответствует номеру пробы)
	Поток рассеяния		Направление сноса материала
	Точка отбора донной пробы и ее номер		

Рис. 8. Определение площади водосбора для точек опробования потоков рассеяния

- установление закона распределения элементов в донных пробах;
- расчет статистических параметров нормального геохимического поля (геохимического фона, стандартного отклонения или стандартного множителя);
- определение порога аномальности;
- определение параметров потоков рассеяния (величины площади водосбора и продуктивности).

Графически потоки рассеяния изображаются на карте в виде линий, параллельных оси опробования русла. Длина линии соответствует протяженности потока рассеяния, а толщина обозначает интервал содержаний элементов, в который попадает значение для потока рассеяния.

Интервалы содержаний могут быть как равные, так и неравные в зависимости от равномерности распределения элементов в потоках рассеяния. Наиболее простым и удобным является использование равных интервалов, выбор которых сводится к следующему:

- вычисляется диапазон содержаний R , представляющий собой разницу между минимальными и максимальными значениями. За минимальное содержание принимается порог аномальности для девяти и более точек (C_{A9}). В этом случае $R = C_{max} - C_{A9}$;

- вычисляется количество интервалов: $n = \sqrt{N}$, где N – число проб с $C_x \geq C_{A9}$;

- определяется длина интервала: $l = \frac{R}{n}$. Если в результате деления

получится дробное число и возникнет необходимость в округлении, то округлять нужно, как правило, в бóльшую сторону. Значения, находящиеся в точности на границе двух интервалов, рекомендуются относить к более низкому по рангу интервалу. Например, для интервалов 1–3 г/т и 3–5 г/т содержание элемента в 3 г/т будет принадлежать интервалу 1–3 г/т.

В случае крайне неравномерного распределения содержаний элементов в области наибольшей плотности распределения выбирают более узкие интервалы, чем в области меньшей плотности.

Продуктивность выявленных потоков рассеяния рудных элементов вычисляется по формуле 6.1:

$$P_x = S_x \times (C_x - C_\phi), \quad (6.1)$$

где C_x – содержание элемента в данной точке опробования, C_ϕ – фоновое содержание элемента в аллювии; S_x – площадь видимого водосбора для данной точки русла.

Потоки рассеяния, связанные с обширным по площади рудным участком, могут развиваться в нескольких смежных руслах. Общую про-

дуктивность такой группы потоков рассеяния определит сумма продуктивностей независимых потоков с учетом последовательного слияния русел. Показатель $P_{\text{общ.}}$ (6.2):

$$P_{\text{общ.}} = \sum_{x=1}^n P_i, \quad (6.2)$$

характеризует уже не отдельное русло, а конкретный геологический объект – рудное месторождение, образовавшее потоки рассеяния в n смежных руслах.

Пример задачи. Провести интерпретацию результатов геохимических поисков кобальта по потокам рассеяния в пределах фрагмента Саурейской площади (рис. 9), включая: а) определение площади водосбора для каждой донной пробы; б) оценку статистических параметров нормального геохимического поля; в) определение порога аномальности кобальта в потоках рассеяния; г) построение карты распределения кобальта в потоках рассеяния; г) оценку площадной продуктивности каждого выявленного потока рассеяния кобальта и общей продуктивности группы потоков рассеяния в пределах участка. д) оценку геохимических ресурсов кобальта по категории P_3 . Масштаб работ 1: 200 000. Содержание кобальта в донных пробах приведено в табл. 5.

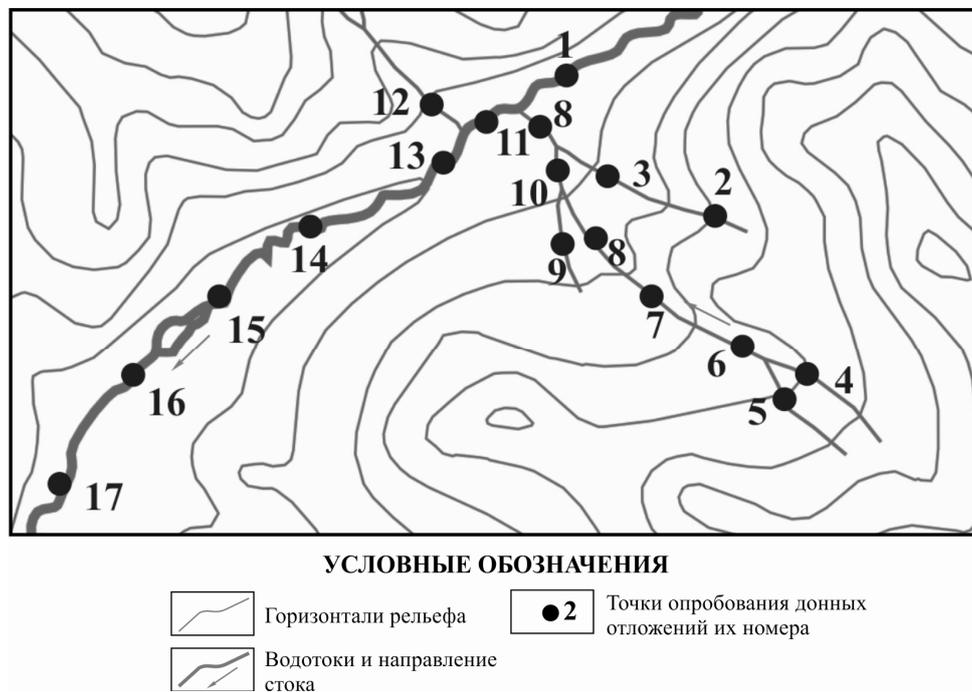


Рис. 9. Карта-разноска содержаний кобальта в донных отложениях фрагмента Саурейской площади по результатам геохимических поисков по потокам рассеяния масштаба 1: 200 000

Ход решения. На карте-разноске проводим водораздельные линии и, восстанавливая к ним перпендикуляры от каждой точки опробования донных отложений, определяем контуры площадей водосбора для донных проб.

Расчет параметров фона и порога аномальности ведем в программе MS Excel. Для выяснения закона распределения, которому подчиняется кобальт в донных отложениях фрагмента Саурейской площади, строим гистограмму распределения частоты встречаемости содержаний элемента (см. тему 1). Асимметричная форма гистограммы свидетельствует о лог-нормальном распределении кобальта (рис. 10).

Таблица 5

Содержание кобальта в донных пробах фрагмента Саурейской площади

№ пробы	$C_x, 10^{-3} \%$	$S_x, \text{км}^2$	№ пробы	$C_x, 10^{-3} \%$	$S_x, \text{км}^2$
1	9	4,5	10	10	0,14
2	9	0,6	11	10	0,20
3	13	0,52	12	9	0,35
4	15	0,68	13	11	0,32
5	15	1,22	14	12	0,25
6	17	0,20	15	9	0,61
7	15	0,44	16	9	0,87
8	15	0,18	17	10	0,72
9	15	0,37			

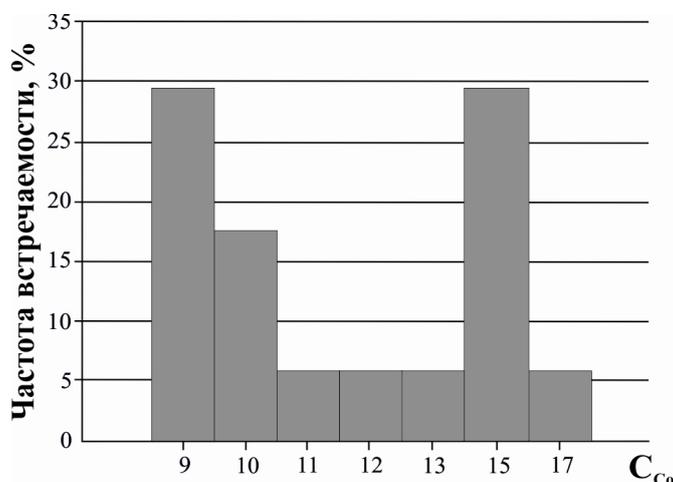


Рис. 10. Гистограмма распределения кобальта в потоках рассеяния фрагмента Саурейской площади

Дальнейшие расчеты статистических параметров нормального геохимического поля выполняем по формулам для логнормального закона: 1.2 – геохимический фон ($C_\phi = 12 \times 10^{-3} \%$), 1.4 – стандартный множитель $\varepsilon = 1,26$. Для выделения аномалий в потоках рассеяния вычисляем девять значений порога аномальности C_A по формуле 1.8: $C_{A1} = 24 \times 10^{-3} \%$; $C_{A2} = 19 \times 10^{-3} \%$; $C_{A3-A4} = 17 \times 10^{-3} \%$; $C_{A5} = 16 \times 10^{-3} \%$; $C_{A6-A9} = 15 \times 10^{-3} \%$.

Выбираем интервалы группирования содержаний кобальта: диапазон содержаний $R = 17 - 12 = 5 \times 10^{-3} \%$; количество интервалов $n = \sqrt{6} \approx 3$; длина интервала $l = 5/3 \approx 2 \times 10^{-3} \%$. Таким образом, для построения карты распределения кобальта в потоках рассеяния используем интервалы аномальных содержаний элемента $15 - 17 \times 10^{-3} \%$ и $17 - 19 \times 10^{-3} \%$. При этом учитываем, что максимальное содержание C_0 в аллювиальных отложениях участка работ ($17 \times 10^{-3} \%$) относится к интервалу $15 - 17 \times 10^{-3} \%$.

Изображаем на карте потоки рассеяния в виде линий, параллельных оси опробования русла. Толщина линий соответствует выбранным интервалам содержаний элемента. Анализируя полученные результаты, приходим к выводу, что на участке работ пространственно сближены шесть точек с содержаниями кобальта $\geq 15 \times 10^{-3} \%$. Согласно вычисленным значениям C_{A6} их можно рассматривать как единую аномалию (рис. 11).



Рис. 11. Карта распределения кобальта в потоках рассеяния фрагмента Саурейской площади по результатам геохимических поисков масштаба 1: 200 000

Площадную продуктивность для каждого из шести аномальных потоков рассеяния кобальта определяем по формуле 6.1, общую продуктивность в пределах перспективного участка – по формуле 6.2. Учитывая, что содержания кобальта приведены в $10^{-3} \%$, для перевода продуктивности в $m^2\%$ расчетные значения умножаем на 0,001. Величину площади водосбора для точек опробования берем из табл. 5. Таким образом, общая продуктивность аномальных потоков рассеяния на участке работ составила:

$$P_{\text{общ.}} = 0,010 + 0,018 + 0,003 + 0,007 + 0,003 + 0,005 = 0,046 m^2\%.$$

III. РАЗБРАКОВКА ГЕОХИМИЧЕСКИХ АНОМАЛИЙ

Тема 7. Оценка прогнозных ресурсов по геохимическим данным

Конечной целью геохимических исследований на всех этапах и стадиях геологоразведочного процесса, за исключением региональных работ масштаба 1 : 1 000 000 и мельче, является количественная оценка прогнозных ресурсов профилирующих металлов выявляемых геохимических аномалий. Не переоценивая точности прогнозных оценок по геохимическим данным, их результаты могут считаться удовлетворительными, если удастся избежать грубых ошибок.

В настоящее время известно несколько десятков методов количественной оценки прогнозных ресурсов по геохимическим данным: 1) по параметрам ореолов и потоков рассеяния; 2) по соотношению концентрированной и рассеянной форм нахождения элементов; 3) вероятностно-статистической корреляции; 4) кларковский; 5) металло-геохимический и др. Однако в действующую «Инструкцию по геохимическим методам поисков» вошла и широко применяется на практике оценка прогнозных ресурсов по параметрам ореолов и потоков рассеяния.

Метод оценки прогнозных ресурсов *по вторичным остаточным ореолам рассеяния* был предложен А.П. Солововым еще в 1952 г. Подсчет ресурсов рекомендуется производить по формуле 7.1:

$$Q_{np.} = \alpha \times \frac{1}{k} \times \frac{1}{40} \times P \times H, \quad (7.1)$$

где: $Q_{np.}$ – прогнозные ресурсы металла; k – местный коэффициент остаточной продуктивности; α – доля забалансовых руд; P – продуктивность остаточного ореола ($m^2\%$); $1/40$ – множитель, отвечающий переходу от квадратных метро-процентов к тоннам металла на 1 м; H – вероятная вертикальная протяженность оруденения данного типа.

Коэффициент k отражает соответствие между продуктивностью коренного оруденения и вторичного ореола рассеяния ($k = \frac{P_e}{P_k}$) и зависит от индивидуальных свойств элементов, морфологии коренного оруденения, а также местных ландшафтно-геохимических условий.

Исходя из общих законов гипергенной миграции химических элементов, можно дать априорные оценки значениям коэффициентов остаточной продуктивности k в зависимости от ландшафтных условий формирования ореолов рассеяния и свойств рудных элементов. Так, в горных, активно денудлируемых районах любых ландшафтно-геохимических зон практически для всех рудных элементов значения k близки к 1. В районах

гумидной зоны со сглаженным рельефом и замедленной денудацией для элементов активных водных мигрантов (F, Sr, B, U, Mo, Zn и др.) следует ожидать значения $k < 1$. В аридных районах для тех же условий и тех же элементов при наличии испарительного барьера $k > 1$. В районах со сглаженным рельефом и замедленной денудацией для рудных элементов, представленных тяжелыми и устойчивыми в зоне выветривания минералами (Au, Pt, Sn, W, Nb, Ta, Zr и др.), можно ожидать значения $k > 1$. В профиле современных элювиально-делювиальных образований и древних корях выветривания значения k вертикали могут быть больше и меньше единицы и с глубиной приближаются к 1.

Величина доли забалансовых руд α для каждого участка определяется по данным горно-буровых работ, а в случае их отсутствия на изучаемой площади используются данные по объектам-эталонам.

Глубину подсчета прогнозных ресурсов H выбирают по геологическим соображениям. В случае недостатка данных она принимается для месторождений Au, Ag, W, Bi, Co, Be равной 100 м, для месторождений Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Mo – не более 200 м.

Для оценки прогнозных ресурсов *по первичным ореолам* применяется формула, близкая к формуле для вторичных ореолов рассеяния, однако с введением поправочного коэффициента η , характеризующего конкретный уровень эрозионного среза (7.2):

$$Q_{пр.} = \alpha \times \eta \times \frac{1}{40} \times P \times H. \quad (7.2)$$

Оценка прогнозных ресурсов *по потокам рассеяния* обычно проводится исходя из математической модели литохимического потока рассеяния. Она основана на представлении о природной «средней пробе», когда аллювиальные отложения характеризуют все разнообразие горных пород, а также наличие в бассейне денудации данного водотока вторичных ореолов рассеяния. Оценка прогнозных ресурсов проводится по формуле 7.3:

$$Q_{пр.} = \frac{1}{k^l \times k} \times \frac{1}{40} \times P_{общ.} \times H, \quad (7.3)$$

где k^l , k – местные коэффициенты, определяемые из опыта работ; $P_{общ.}$ – общая продуктивность потоков рассеяния в пределах участка; H – целесообразная глубина подсчета (м), выбранная из геологических соображений; множитель $1/40$ отвечает переходу от квадратных метро-процентов к тоннам металла на 1 м.

Коэффициент k^1 отражает связь продуктивности потока с продуктивностью вторичного ореола рассеяния ($P_{во}$): $k^1 = P_d/P_0$. Его величина зависит от орогидрографических условий местности и индивидуальных свойств химических элементов, от реальных соотношений между их твердым и растворимым стоком и т.п.

Коэффициент k отражает соответствие между продуктивностью коренного оруденения и вторичного ореола рассеяния. В общем случае значения $k^1 \neq k$. Для рудных элементов, представленных тяжелыми устойчивыми минералами (например, SnO_2), они больше 1, а в гумидной зоне для элементов активных водных мигрантов (например, F) – заведомо меньше 1. В горных районах гумидной зоны для свинца значения k^1 и k близки к 1, а для меди – к 0,7.

Глубина подсчета прогнозных ресурсов H определяется с учетом геологических данных и может, по аналогии с вторичными ореолами рассеяния, приниматься равной 100 м для месторождений Au, Ag, W, Bi, Co, Be и не более 200 м – для месторождений Cu, Pb, Zn, Ni, Sn, Mo.

Пример задачи. Используя результаты решения предыдущих задач, оценить прогнозные ресурсы меди по параметрам вторичных ореолов рассеяния (тема 5) и кобальта – по параметрам потоков рассеяния (тема 6). Для меди коэффициенты $k = 1$; $\alpha = 0,7$; глубина подсчета ресурсов $H = 200$ м; для кобальта – $k^1 = 0,9$; $k = 0,5$; глубина подсчета ресурсов $H = 100$ м.

Ход решения. Прогнозные ресурсы меди определяем по параметрам вторичного ореола рассеяния по формуле 7.1:

$$Q_{пр.} = 0,7 \times 1/1 \times 0,025 \times 13\,625 \times 200 = 47\,688 \text{ т.}$$

Прогнозные ресурсы кобальта оцениваем по параметрам потоков рассеяния, используя формулу 7.3:

$$Q_{пр.} = (1/0,9 \times 0,5) \times 0,025 \times 0,046 \times 100 = 0,3 \text{ т.}$$

Основные термины и понятия

Геохимическое поле – часть земного пространства, которое характеризуется количественными содержаниями химических элементов или их соединений как функциями пространственных координат и времени: $C_x = f(x, y, z, T) > 0$, т.е. в любой точке геохимического поля содержания всех элементов больше нуля, они зависят от пространственных координат и непостоянны во времени.

Геохимическое поле нормальное – часть геохимического поля, которая характеризуется содержаниями элементов, близкими к усредненному значению для геологического объекта (геохимическому фону).

Геохимическая аномалия – часть геохимического поля, которая характеризуется локальными отклонениями содержаний элементов от геохимического фона.

Геохимический ореол первичный – геохимическая аномалия в окколорудных коренных породах, которая образовалась одновременно с рудным телом в результате процессов эндогенного, экзогенного (первично-осадочного) или метаморфогенного рудообразования.

Геохимический ореол вторичный – геохимическая аномалия в продуктах выветривания коренного оруденения и в перекрывающих оруденение отложениях и почвах, которая образовалась в результате гипергенной миграции химических элементов.

Геохимический поток рассеяния – геохимическая аномалия на путях твердого, растворимого (водного) или газообразного поверхностного или подземного стока с суши.

Геохимическая карта – карта, отражающая распределение и тип миграции химических элементов в геологических телах: горных породах, водах, почвах. Геохимические карты могут содержать сведения о распределении отдельных элементов (моноэлементные карты) или широкого круга элементов (полиэлементные карты).

Геохимическое картирование – составление (построение) геохимических карт.

Статистические методы – научные методы описания и анализа результатов наблюдений массовых явлений на основе теории вероятностей.

Статистическая выборка – множество зарегистрированных в эксперименте значений переменной.

Стандартное отклонение – степень отклонения данных наблюдений от среднего значения.

Дисперсия – в теории вероятностей степень разброса значений переменной относительно центрального пункта или типичного значения (такого, как среднее число).

Число степеней свободы – количество значений, которые могут свободно изменяться после того, как по выборке было вычислено значение статистики.

Погрешность измерения – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины

Случайная погрешность – погрешность измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Систематическая погрешность – погрешность измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины.

Уровень значимости – такое значение вероятности события, при котором событие уже можно считать случайным.

Библиографический список

Основная

1. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М. : Недра, 1983. – 192 с.
2. Квятковский Е.М. Геохимические методы поисков. Руководство к лабораторным работам / Е.М. Квятковский. – Л., 1973. – 186 с.
3. Соловов А.П. Геохимические методы поисков рудных месторождений : сборник задач / А. П. Соловов, А. А. Матвеев. – М. : Изд-во М, 1985. – 232 с.
4. Соловов А.П. Геохимические методы поисков рудных месторождений : сборник задач / А. П. Соловов, А. А. Матвеев, В.М. Ряховский. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1978. – 184 с.
5. Соловов А.П. Геохимические методы поисков рудных месторождений / А.П. Соловов, А.А. Матвеев. – М. : КДУ, 2011. – 564 с.

Дополнительная

6. Алексеенко В.А. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых / В.А. Алексеенко. – М. : Логос, 2000. – 320 с.
7. Дубов Р.И. Количественные исследования геохимических полей для поисков рудных месторождений / Р.И. Дубов. – Н. : Наука, 1974. – 278 с.
8. Матвеев А.А. Интерпретация геохимических аномалий. Оценка прогнозных ресурсов рудных объектов по геохимическим данным : учеб. пособие / А.А. Матвеев, Ю.В. Шваров, А.В. Аплеталин. – М. : ИМГРЭ, 2012. – 188 с.
9. Питулько В.М. Основы интерпретации данных поисковой геохимии / В.М. Питулько, И.Н. Крицук – М. : Недра, 1990. – 336 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Значения *F*-критерия Фишера для уровня значимости $P = 0,05$

$f_1 \backslash f_2$	1	2	3	4	5	6	8	12	24	∞
1	161,5	199,5	215,7	224,6	230,2	233,9	238,9	243,9	249,0	254,3
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,37	19,41	19,45	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,84	8,74	8,64	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,91	5,77	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,68	4,53	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,00	3,84	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,57	3,41	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,28	3,12	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,07	2,90	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,91	2,74	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,79	2,61	2,40
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,69	2,50	2,30
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,77	2,60	2,42	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,53	2,35	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,48	2,29	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,42	2,24	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,38	2,19	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,34	2,15	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,31	2,11	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,28	2,08	1,84
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,42	2,25	2,05	1,81
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,23	2,03	1,78
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,38	2,20	2,00	1,76
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,18	1,98	1,73
25	4,24	3,38	2,99	2,76	2,60	2,49	2,34	2,16	1,96	1,71
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,15	1,95	1,69
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,30	2,13	1,93	1,67
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,29	2,12	1,91	1,65
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,54	2,43	2,28	2,10	1,90	1,64
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,09	1,89	1,62
35	4,12	3,26	2,87	2,64	2,48	2,37	2,22	2,04	1,83	1,57
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,00	1,79	1,51
45	4,06	3,21	2,81	2,58	2,42	2,31	2,15	1,97	1,76	1,48
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,13	1,95	1,74	1,44
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25	2,10	1,92	1,70	1,39
70	3,98	3,13	2,74	2,50	2,35	2,23	2,07	1,89	1,67	1,35
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,06	1,88	1,65	1,31
90	3,95	3,10	2,71	2,47	2,32	2,20	2,04	1,86	1,64	1,28
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19	2,03	1,85	1,63	1,26
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	1,94	1,75	1,52	1

Примечание: f_1 – число степеней свободы большей дисперсии, f_2 – число степеней свободы меньшей дисперсии.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Значения *t*-критерия Стьюдента при уровне значимости
 $P = 0,05$ (двухсторонний)

Число степеней свободы <i>d.f.</i>	$P = 0,05$	Число степеней свободы <i>d.f.</i>	$P = 0,05$
1	12,706	18	2,1009
2	4,3027	19	2,0930
3	3,1825	20	2,0860
4	2,7764	21	2,0796
5	2,5706	22	2,0739
6	2,4469	23	2,0687
7	2,3646	24	2,0639
8	2,3060	25	2,0595
9	2,2622	26	2,0555
10	2,2281	27	2,0518
11	2,2010	28	2,0484
12	2,1788	29	2,0452
13	2,1604	30	2,0423
14	2,1448	40	2,0211
15	2,1315	60	2,0003
16	2,1199	120	1,9799
17	2,1098	∞	1,9600

Учебное издание

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ПОИСКОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**
*Методические рекомендации
для выполнения лабораторных работ*

**Составитель
Полякова Татьяна Николаевна**

Редактор *Г.И. Старухина*
Компьютерная верстка *Е.Н. Комарчук*

Подписано в печать 06.02.2015. Формат 60×84/16.
Усл. п. л. 2,44. Уч.-изд. л. 3,0. Тираж 30 экз. Заказ 28

Издательский дом ВГУ
394000 Воронеж, пл. Ленина, 10

Отпечатано в типографии Издательского дома ВГУ
394000 Воронеж, ул. Пушкинская, 3