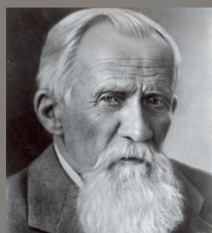


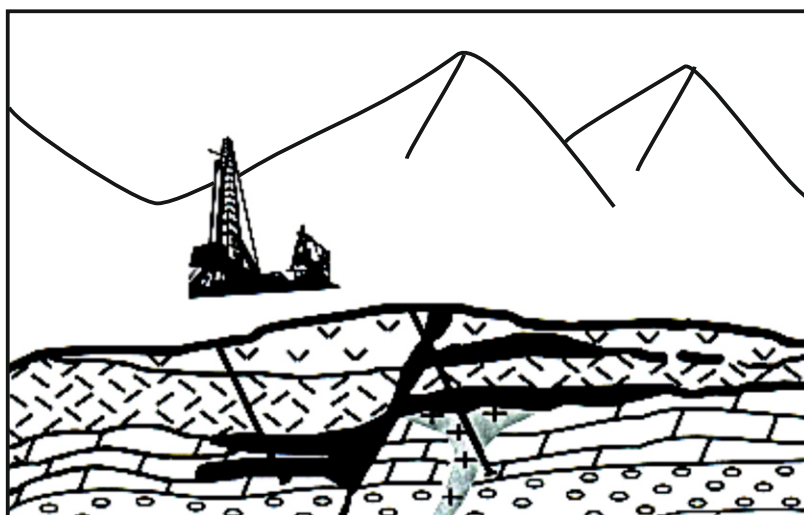
ISSN 2541-9455 (print)
ISSN 2541-9463 (online)

12+



ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

**ГЕОЛОГИЯ,
РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**



2019

Том 42 № 1

Министерство образования и науки РФ
ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ISSN 2541-9455 (print)
ISSN 2541-9463 (online)

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Том 42 № 1

Издательство
Иркутского национального исследовательского
технического университета

2019

Ministry of Education and Science of the Russian Federation

**IRKUTSK NATIONAL RESEARCH
TECHNICAL UNIVERSITY**

**ISSN 2541-9455 (print)
ISSN 2541-9463 (online)**

P R O C E E D I N G S
**OF THE SIBERIAN DEPARTMENT OF THE SECTION OF EARTH SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES**

**GEOLOGY, EXPLORATION
AND DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS**

Vol. 42 No. 1

**Irkutsk National Research
Technical University
Publishers**

2019

УДК 550:553. **Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.** – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. – Т. 42. – № 1. – 118 с.

Журнал «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых» **входит в действующий Перечень изданий ВАК для публикации основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук**, включен в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU) для создания Российского индекса научного цитирования, рассылается в Российскую книжную палату, ВНИИТИ РАН, имеет государственную регистрацию и распространяется по подписке в каталоге агентства «Почта России», подписной индекс – 38200. С 2013 г. журнал включен в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, а с 2015 г. – в базу данных EBSCO. Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Редакционный совет:

Кузьмин М.И., академик РАН, д-р г.-м. наук, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия), Гладкочуб Д.П., член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия), Гордиенко И.В., член-корр. РАН, Геологический институт СО РАН (г. Улан-Удэ, Россия), Душин В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Уральский государственный горный университет (г. Екатеринбург, Россия), Козлов А.В., д-р геол.-минерал. наук, проф., Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (г. Санкт-Петербург, Россия), Корольков А.Т., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский государственный университет (г. Иркутск, Россия), Макаров В.А., д-р геол.-минерал. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия), Миронов Ю.Б., д-р геол.-минерал. наук, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (г. Санкт-Петербург, Россия), Очир Гэрэл, д-р геол.-минерал. наук, проф., Монгольский университет науки и технологии (г. Улан-Батор, Монголия), Тальгамер Б.Л., д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия), Трубачев А.И., д-р геол.-минерал. наук, проф., Забайкальский государственный университет (г. Чита, Россия)

Председатель редакционного совета – Семинский Ж.В., д-р геол.-минерал. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Редакционная коллегия:

Главный редактор – Лобацкая Р.М., д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой геммологии, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Заместители главного редактора – Аузина Л.И., канд. геол.-минерал. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия), Красноштанов С.Ю., канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Ответственный секретарь – Храмовских В.А., канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)

Журнал создан в 2004 году на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 года
Периодичность выхода – 4 раза в год

Учредитель ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации журнала ПИ № ФС77-67479 от 18.10.2016 г.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
Иркутского национального исследовательского технического университета

Адрес редакции, учредителя и издателя: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский
технический университет», 2019

UDC 550:553. **Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.** – Irkutsk: INRTU Publishers, 2019. – Vol. 42. – No. 1. – 118 p.

The journal “Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits” **is included in the current list of editions of the State Commission for Academic Degrees and Titles for the publication of the main results of dissertations for Candidate’s and Doctoral degrees**, in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is sent to the Russian Book Chamber of All-Russia Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. It has a state registration and is distributed by subscription in the catalog of the “Russian Post” agency, the subscription index is 38200. From 2013, the journal is included in the international catalog of Ulrich’s Periodicals Directory and from 2015 it is included in EBSCO database. The articles published in the journal are abstracted and peer reviewed. The journal accepts articles in the scientific field of “Earth Sciences”.

Editorial Council:

Kuzmin M.I., Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Institute of Geochemistry SB RAS (Irkutsk, Russia), Gladkochub D.P., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Institute of the Earth's Crust SB RAS (Irkutsk, Russia), Gordienko I.V., Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Geological Institute of SB RAS (Ulan-Ude, Russia), Dushin V.A., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Ural State Mining University (Ekaterinburg, Russia), Kozlov A.V., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, National Mineral Resources University “Mining University” (St. Petersburg, Russia), Korol'kov A.T., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia), Makarov V.A., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia), Mironov Yu.B., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (St. Petersburg, Russia), Ochir Gerel, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Mongolian university of science and technology (Ulan Bator, Mongolia), Talgamer B.L., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), Trubachev A.I., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Trans-Baikal State University (Chita, Russia)

Chairman of the Editorial Council – Seminsky Zh.V., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Editorial Board:

Editor-in-Chief – Lobatskaya R.M., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Gemology Department, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Deputy Editors-in-Chief – Auzina L.I., Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia), Krasnoshtanov S.Yu., Cand. Sci. (Eng.), Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

Executive secretary – Khramovskikh V.A., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal was founded in 2004 on the basis of the interacademic Collection of research papers “Geology, prospecting and exploration of ore minerals”, which had been published since 1973
Periodicity – 4 times a year

Founder – Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”

The journal is registered by the Federal Service for Supervision of Communications,
Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

Journal Registration Certificate PI no. ФС77-67479 of October 18, 2016

Recommended for publication by the Editorial Committee of the Irkutsk National Research Technical University

Editorial Office Address: Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”,
83 Lermontov str., Irkutsk, 664074, Russia.

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education
“Irkutsk National Research Technical University”, 2019

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК
ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Том 42, № 1 2019

СОДЕРЖАНИЕ

**Геология, поиски и разведка
месторождений полезных ископаемых**

- Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Стрижаков Е.А.** Влияние траппового магматизма на нефтегазоносные горизонты (юг Сибирской платформы)..... 7
- Литвинова И.В., Ларионова Т.И.** Прогноз нефтегазоперспективных объектов в бассейне реки Виви (Сибирская платформа) по комплексу геолого-гидрогеохимических методов..... 15

**Гидрогеология и инженерная геология
месторождений полезных ископаемых**

- Бадминов П.С., Павлов С.Х., Дмитриев-Добровольский В.Е., Оргильянов А.И.** Подземный сток центральной части Восточного Саяна, основные особенности его формирования и распределения..... 27
- Кузнецов Н.Л., Верховзин И.И.** Сравнительный анализ методов определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов Непско-Ботубинской антеклизы..... 41

**Технологии разведки и разработки
месторождений полезных ископаемых**

- Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А.** Обоснование глубины вскрышных бульдозерных работ при разработке глубоких россыпей..... 55
- Заливин В.Г.** Режимные параметры при отработке технологии бурения скважин саморазрушающейся пеной на основе «Композита СП»..... 64
- Пушмин П.С.** Результаты исследования деформационных процессов при бурении изотропных горных пород алмазным буровым инструментом..... 78
- Зайцев В.И.** Определение давления разрыва обсадных колонн при бурении скважин на море..... 86
- Ламбин А.И., Аверкина Е.В.** Определение дисперсной фазы буровых растворов на полимерной основе..... 93

Гипотезы, сообщения, дискуссия

- Шевченко А.Н., Храмовских В.А.** О перспективах применения автоматизированных способов добычи полезных ископаемых..... 104
- К сведению авторов**..... 112

PROCEEDINGS
OF THE SIBERIAN DEPARTMENT OF THE SECTION OF EARTH SCIENCES
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF NATURAL SCIENCES

**GEOLOGY, EXPLORATION AND DEVELOPMENT
OF MINERAL DEPOSITS**

Vol. 42, No. 1 2019

C O N T E N T S

**Geology, Prospecting and Exploration
of Mineral Deposits**

Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Strizhakov E.A. Trap magmatism effect on oil and gas horizons (south of the Siberian platform).....	7
Litvinova I.V., Larionova T.I. Forecasting the oil and gas potential of the sites in the Vivi river basin (Siberian platform) using a complex of geological and hydro-geochemical methods.....	15

**Hydrogeology and Engineering Geology
of Mineral Deposits**

Badminov P.S., Pavlov S.Kh., Dmitriev-Dobrovolsky V.E., Orgilianov A.I. Underground runoff of the central part of the Eastern Sayan, its main formation and distribution features.....	27
Kuznetsova N.L., Verhozin I.I. Comparative analysis of determination methods of Nepa-Botuoba antecline coarse soil strength properties.....	41

**Technologies of Exploration and Development
of Mineral Deposits**

Talgamer B.L., Dorosh E.A. Justification of bulldozer stripping work depth when developing deep placers.....	55
Zalivin V.G. Mode parameters when using the technology of drilling wells with self-destructive foam "Composite SDF".....	64
Pushmin P.S. Research results of deformation processes when drilling isotropic rocks by diamond drilling tools.....	78
Zaitsev V.I. Determination of casing string burst pressure when offshore well drilling.....	86
Lambin A.I., Averkina E.V. Determination of the dispersed phase of polymer based drilling fluids.....	93

Hypotheses, Reports, Discussion

Shevchenko A.N., Khramovskiykh V.A. On application prospects of automated mining methods.....	104
Attention of authors	112

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.263

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-7-14>

Влияние траппового магматизма на нефтегазоносные горизонты (юг Сибирской платформы)

© Л.А. Рапацкая, М.Е. Тонких, Е.А. Стрижаков

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Оценка перспектив нефтегазоносности древних платформ значительно затрудняется без определения закономерностей распределения углеводородов на территориях с широким развитием базальтовых комплексов. Достаточно остро эта проблема стоит перед исследователями Сибирской платформы, которая в последние десятилетия стала новой нефтегазодобывающей базой России. Длительное время, предшествующее массовому внедрению трапповой магмы, платформа испытывала интенсивное прогибание, которое компенсировалось осадконакоплением с образованием большого количества залежей углеводородов в нижних горизонтах осадочного чехла. Степень влияния траппового магматизма, столь широко проявленного в пределах Сибирской платформы, на онтогенез месторождений нефти и газа стало целью настоящих исследований: выявление зависимости между мощностями осинского продуктивного горизонта и пластовых интрузий долеритов, зависимости фазового состояния залежей и температурного градиента на отдельных месторождениях юга Сибирской платформы. В ходе исследования были использованы методы корреляции литолого-стратиграфических разрезов крупнейших месторождений углеводородов: Верхнечонкого, Ярактинского, Ковыктинского, Среднеботуобинского и других, выполнено графическое изображение информации с помощью диаграмм. На основе анализа данных, полученных по результатам глубокого бурения на известных месторождениях юга Сибирской платформы, построены линейные графики зависимости между мощностями продуктивного осинского горизонта, соленосного флюидоупора усольской свиты и пластовых интрузий долеритов Усольского силла, а также зависимости фазового состояния залежей и температуры генерации флюида из расчета возможной глубины образования месторождения. Между мощностями флюидоупора и пластовыми интрузиями долеритов просматривается прямая зависимость, то есть горизонт сохраняется в том случае, если мощность флюидоупора увеличивается по мере возрастания мощности пласта долеритов. При более высоких температурах образуются газоконденсатные залежи.

Ключевые слова: трапповый магматизм, осинский горизонт, Сибирская платформа, силла, флюидоупор

Информация о статье: Дата поступления 14 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 11 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Стрижаков Е.А. Влияние траппового магматизма на нефтегазоносные горизонты (юг Сибирской платформы). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42, № 1. С. 7–14. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-7-14.

Trap magmatism effect on oil and gas horizons (south of the Siberian platform)

© Larisa A. Rapatskaya, Marina E. Tonkikh, Evgeniy A. Strizhakov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The lack of determination of the hydrocarbon distribution regularities in the areas with widely developed basalt complexes significantly complicates the estimation of the prospects for the oil and gas potential of the ancient platforms. This is a challenge for the researchers of the Siberian Platform, which has recently become a new Russian oil and gas extraction base. For a long time, preceding the mass introduction of trap magma, the platform was subjected to intense deflection compensated by sedimentation with the formation of a large number of hydrocarbon deposits in the lower horizons of the sedimentary cover. The influence degree of widely manifested within the Siberian platform trap magmatism on the ontogenesis of oil and gas deposits has become the goal of the studies, which involve identification of the dependence between the thickness of the Osa production horizon and reservoir intrusions of dolerites, dependence of the phase state of deposits and the temperature gradient in individual fields

in the south of the Siberian platform. The study uses the correlation methods for the lithologic and stratigraphic sections of the largest hydrocarbon deposits: Verkhnechonsky, Yarakinsky, Kovykta, Srednebotuobinsky and others. The information is represented graphically in the diagrams. Having analyzed the data obtained according to the results of deep drilling in the known fields in the south of the Siberian platform, the authors have built linear graphs of the relationship between the thicknesses of the Osa productive horizon, salt-bearing fluid seal of Usolskaya suite and reservoir intrusions of Usolsky sill dolerites. Also the graphs of deposit phase state dependence on the temperature of fluid generation are constructed on the basis of the calculation of the possible formation depth of the field. There is a direct relationship between the thicknesses of fluid seal and reservoir intrusions of dolerites. It means that the horizon is preserved in the case when the fluid seal thickness increases as dolerite reservoir thickness increases. Gas condensate deposits are formed at higher temperatures.

Keywords: trap magmatism, Osa horizon, Siberian platform, sill, fluid seal

Information about the article: Received February 14, 2019; accepted for publication March 11, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Rapatskaya L.A., Tonkikh M.E., Strizhakov E.A. Trap magmatism effect on oil and gas horizons (south of the Siberian platform). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 7–14. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-7-14.

Введение

В южной части Сибирской платформы, где ведутся нефтегазоносные работы, глубокими скважинами выявлено широкое развитие пластовых трапповых тел (силлов) внутри осадочного чехла. Трапповые тела располагаются по всему разрезу отложений венда – нижнего палеозоя, на разных стратиграфических уровнях, характеризуются значительным диапазоном как по мощности, так и по площади. Силлы установлены в мотской, усольской, бельской, булайской, ангарской свитах нижнего кембрия, а также в образованиях верхнего кембрия и ордовика [1–3]. Трапповый магматизм играет определенную роль в процессах перестроения, уничтожения, сохранения залежей углеводородов и имеет важное значение при оценке нефтегазоносности территорий.

Материалы и методы исследования

В работе использованы данные по разведочным и эксплуатационным скважинам на месторождениях нефти и газа юга Сибирской платформы. Выполнены методы корреляции литолого-стратиграфических разрезов некоторых месторождений. Зависимости мощностей продуктивного горизонта, флюидоупора и траппов,

а также фазового состояния залежи от температуры показаны в виде графического изображения при помощи диаграмм.

Результаты исследования и их анализ

Сибирская платформа является обширным полем развития траппового магматизма позднепалеозойского – раннемезозойского возраста, занимающего ее значительную часть. Максимальные оценки объемов траппового материала показывают, что на площади около 4 млн км² образовалось около 2 млн км³ магматитов трапповой формации [4]. Также на территории Сибирской платформы открыты многочисленные месторождения нефти и газа, приуроченные к рифей-венд-кембрийским отложениям: Верхнечонское, Среднеботуобинское, Ярактинское, Даниловское, Ковыктинское и целый ряд других [5]. Внедрение огромных объемов магмы с температурой до 1000–1200 °С в толщу разреза осадочных пород, проходившее в условиях воздымания – растяжения земной коры, не могло не оказать влияние на раннее сформированные залежи углеводородов [6]. Роль трапповых интрузий в процессах генерации, миграции, накопления и разрушения залежей углеводородов далеко неодно-

значна и на сегодняшний день не теряет свою актуальность при оценке нефтегазоносности данной территории.

В нефтегазовой литературе влияние траппового магматизма на нефтегазоносность обсуждалось неоднократно [7–9]. Авторами данной статьи на примере продуктивного осинского горизонта отдельных месторождений Сибирской платформы сделана попытка проследить зависимость между: 1) мощностями нефтегазоносного горизонта и соленосного флюидоупора; 2) мощностью покрышки (кратчайшим расстоянием от подошвы траппового силла до кровли флюидоупора) и фазового состояния залежи нефтегазоносного горизонта.

Осинский горизонт – единственный стратиграфический уровень карбонатного комплекса венда и нижнего кембрия, который характеризуется региональной нефтегазоносностью и чрезвычайно широким распространением на Сибирской платформе. Так, после проведенных испытаний с применением вторичных методов воздействия на пласт на Верхнечонском месторождении из горизонта были получены притоки пластовых флюидов с дебитом газа до 109,9 тыс. м³/сут. (скв. 46), нефти – 14,7 м³/сут. (скв. 113).

Известно, что одним из важнейших условий сохранения залежей продуктивного горизонта является литологический состав пород и мощность перекрывающего флюидоупора. В данном случае мощная соленосная толща нижнего кембрия, сложенная доломитами, гипсами, галитами (с преобладанием последних), является надежным региональным флюидоупором для залежей углеводородов.

В стратиграфических разрезах месторождений нефти и газа на юге Сибирской платформы повсеместно присутствуют пластовые интрузии долеритов. Это месторождения рифей-вендского возраста Байкитского свода, Катангской седловины, венд-кембрийского возраста Непско-Ботубинской антеклизы и

Ангаро-Ленской ступени [10]. Так, на площадях ряда месторождений (Аянская, Ярактинская, Большекетирская, Дулисьминская и др.) скважинами вскрыт трапповый силл среди галогенно-карбонатных отложений усольской и бельской свит нижнего кембрия. Мощность магматитов в скважинах колеблется от 22 (скв. 16 Ярактинская) до 189 м (скв. 5 Ярактинская), а в среднем составляет около 64 м.

Наиболее полно трапповая интрузия, получившая название «Усольский силл», представлена на Верхнечонском нефтегазоносном месторождении. Здесь в верхней части разреза, в толще ангарской свиты, на глубинах с альтитудами от -30 до +200 м по буровым данным открыто субпластовое тело долеритов мощностью от 30 до 190 м [11]. О мощности долеритового тела можно судить по стратиграфическому разрезу скважины (рис. 1).

На рис. 2 показана схема корреляции литологического состава, мощности и характера соотношения между осинским горизонтом, соленосным флюидоупором и пластовыми интрузиями долеритов на некоторых месторождениях юга Сибирской платформы.

В таблице приведены данные по скважинам глубокого бурения, отражающие мощности продуктивного осинского горизонта, соленосного флюидоупора и пластовых интрузий. Как следует из таблицы, при увеличении мощности долеритов незначительно увеличивается мощность осинского горизонта и мощность флюидоупора. Эта тенденция проявляется в 80 % исследуемых месторождений.

Более наглядно эта тенденция представлена на рис. 3 (кривая 1). Зависимости мощности осинского горизонта от мощности флюидоупора четко не прослеживается (рис. 3 (кривая 2)). Выделяются три различные группы месторождений с тенденциями уменьшения или увеличения мощности флюидоупора, которые требуют дальнейшего изучения.

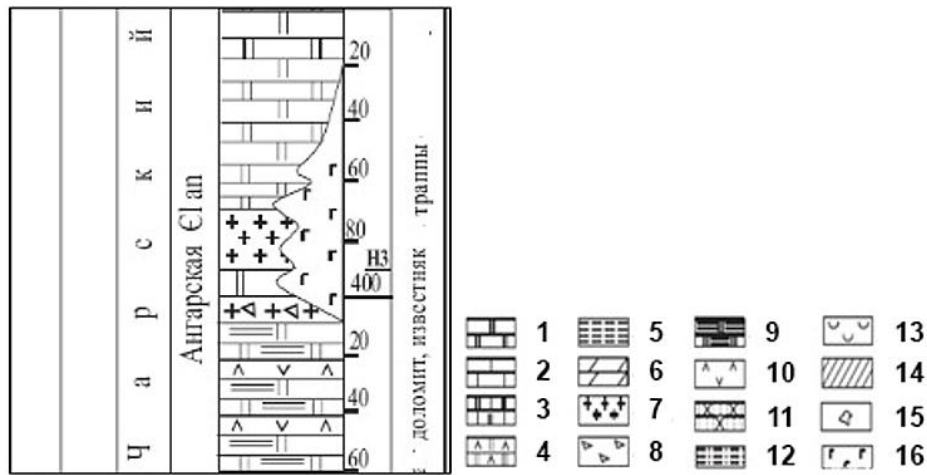


Рис. 1. Стратиграфический разрез скважины (выкопировка):

1 – доломиты; 2 – известняки; 3 – известняки доломитизированные; 4 – доломиты, ангидриты; 5 – аргиллиты; 6 – мергели; 7 – каменные соли; 8 – брекчии; 9 – доломиты глинистые; 10 – гипсы, ангидриты; 11 – песчаники, гравеллиты; 12 – алевролиты; 13 – кора выветривания; 14 – фундамент; 15 – каверны; 16 – траппы

Fig. 1. Stratigraphic section of a well (fragment):

1 – dolomites; 2 – limestones; 3 – dolomite limestones; 4 – dolomites, anhydrites; 5 – argillites; 6 – marls; 7 – rock salts; 8 – breccias; 9 – clay dolomites; 10 – gypsum, anhydrites; 11 – sandstones, gravel stones; 12 – siltstones; 13 – crust of weathering; 14 – foundation; 15 – caverns; 16 – traps

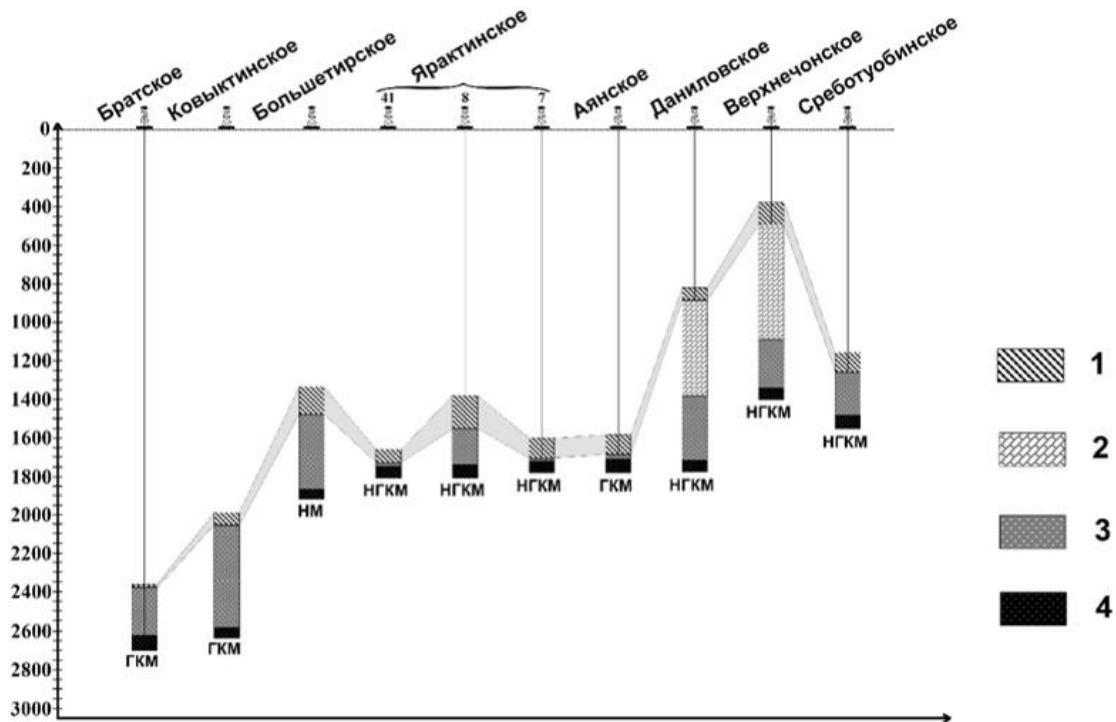


Рис. 2. Корреляция разрезов по месторождениям нефти и газа (юг Сибирской платформы):

1 – траппы; 2 – гипсы, доломиты, известняки; 3 – соли с прослоями доломитов; 4 – осинский горизонт
 ГМ – газовое месторождение; ГКМ – газоконденсатное месторождение;
 НГКМ – нефтегазоконденсатное месторождение; НГМ – нефтегазовое месторождение;
 НМ – нефтяное месторождение

Fig. 2. Correlation of sections by oil and gas fields (South of the Siberian platform):

1 – traps; 2 – gypsum, dolomites, limestones; 3 – salts with dolomite interlayers; 4 – Osa horizon
 ГМ – gas deposit; ГКМ – gas condensate deposit; НГКМ – oil and gas condensate deposit;
 НГМ – oil and gas deposit; НМ – oil deposit

Мощности осинского горизонта, флюидоупора и долеритов
Thicknesses of the Osa horizon, fluid seal and dolerites

Название месторождения	Осинский горизонт			Мощность долеритов, м	Мощность флюидоупора, м
	Отметка кровли, м	Отметка подошвы, м	Мощность, м		
Братское ГКМ	2632	2714	82	16	248
Ковыктинское ГКМ	2582	2640	58	64	529
Большетирское НМ	1875	1926	51	142	390
Ярактинское НГКМ (скв. 41)	1753	1818	65	71	12
Ярактинское НГКМ (скв. 8)	1748	1813	65	179	188
Ярактинское НГКМ (скв. 7)	1726	1791	65	110	10
Аянское ГКМ	1719	1788	69	110	26
Даниловское НГКМ	1717	1777	60	59	335
Верхнечонское НГКМ	1350	1410	60	120	250
Среднеботуобинское НГКМ	1495	1560	65	105	225

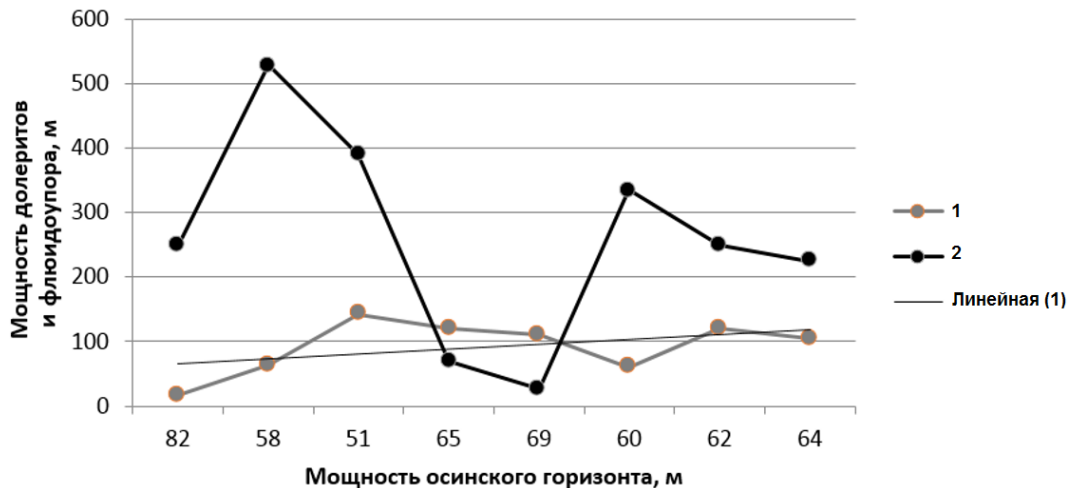


Рис. 3. График зависимости мощности осинского горизонта от мощности долеритов (1) и мощности флюидоупора (2)
Fig. 3. Diagram of the Osa horizon thickness dependence on dolerite thickness (1) and fluid seal thickness (2)

Зависимость фазового состояния залежи и температуры генерации нефти и газа из расчета возможной глубины образования залежи через температурный градиент показана на рис. 4.

Обсуждение результатов

На основе анализа графика зависимости между мощностями осинского горизонта, флюидоупора и пластовыми интрузиями долеритов можно сделать следующий вывод: между мощностями флюидоупора и пластовыми интрузиями долеритов просматривается прямая

зависимость, то есть горизонт сохраняется в том случае, если мощность флюидоупора увеличивается по мере возрастания мощности пласта долеритов (см. рис. 3).

Анализ графика зависимости фазового состояния залежи и температуры генерации нефти и газа из расчета возможной глубины образования залежи через температурный градиент показывает, что газоконденсатные залежи образуются при более высоких температурах, чем нефтяные.

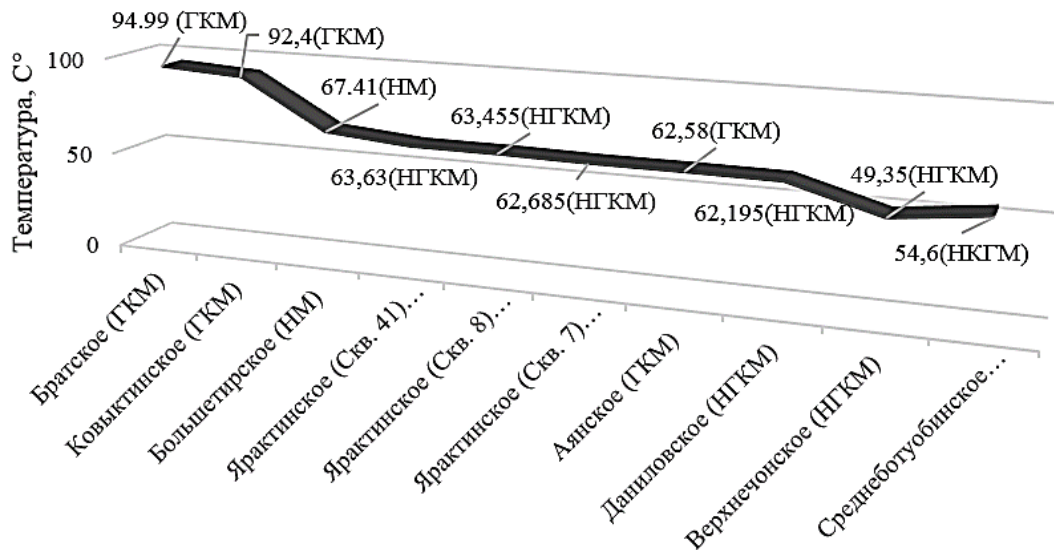


Рис. 4. График зависимости фазового состояния залежи от температуры
 Fig. 4. Diagram of reservoir phase state dependence on temperature

Этот факт подтверждает теорию Н.Б. Вассоевича [12] о главной фазе нефтегазообразования. Можно с определенной долей осторожности сделать и другой вывод: при снижении температуры после остывания траппового силла происходит дистилляция нефти и образование конденсата и газа.

Заклучение

Внедрение трапповых тел на юге Сибирской платформы, несомненно, оказывало влияние на нефтегазоносность этого региона. Повышение температуры, связанное с внедрением высокотемпературного флюида, приводило к усилению катагенетических преобразований осадочных отложений, к изменению структурного плана вмещающих пород, их коллекторских и экранирующих свойств. Выполненные исследования показали, что на месторождениях нефти и газа с

продуктивным горизонтом, расположенным в кембрийских отложениях наряду с трапповыми телами, просматривается зависимость между мощностью продуктивного горизонта, в данном случае осинского, и мощностью покрывки, включающей Уссольский силл. Не исключается и температурное трапповое воздействие на преобразование фазового состояния залежей. Уже сформированные нефтяные залежи могли как преобразовываться в нефтегазоконденсатные, так и образовывать отдельные газоконденсатные скопления.

Данные исследования можно продолжить с использованием более масштабного фактического материала, так как их результаты могут быть использованы при прогнозировании и поисках углеводородов в пределах Сибирской платформы.

Библиографический список

1. Феоктистов Г.Д. Петрология и условия формирования трапповых силлов. Новосибирск: Наука, 1978. 166 с.
2. Скрипин А.И., Алексеев Е.Б. Эволюция траппового магматизма южной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. 1981. Т. 22, № 11. С. 12–17.
3. Тонких М.Е., Барышев А.С., Егоров К.Н., Кашкарев Д.Л. Структурная позиция траппов юга Сибирской платформы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 12 (59). С. 65–73.
4. Васильев Ю.Р., Золотухин В.В., Феоктистов Г.Д., Прусская С.Н. Оценка объемов и

проблема генезиса пермотриасового траппового магматизма Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2000. Т. 41, № 12. С. 1696–1705.

5. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Воробьев В.Н. [и др.]. Непско-Ботуобинская антеклиза – новая перспективная область добычи нефти и газа на Востоке СССР. Новосибирск: Наука, 1986. 245 с.

6. Замараев С.А., Гелетий Н.К., Малых А.В. О температурном воздействии траппов на калийные соли Непского калиеносного бассейна Восточной Сибири // Геология и геофизика. 1985. Т. 26, № 4. С. 42–47.

7. Гажула С.В. Особенности траппового магматизма в связи с условиями нефтегазоносности Сибирской платформы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2008. Т. 3, № 1. С. 1–8 [Электронный ресурс]. URL: http://www.ngtp.ru/rub/4/10_2008.pdf (10.02.2019).

8. Одинцова Т.В., Дробот Д.И. Трапповый магматизм и нефтегазоносность вендского терригенного комплекса Приленского нефтегазонос-

ного района // Геология нефти и газа. 1983. № 7. С. 6–10.

9. Старосельцев В.С. Тектоника базальтовых плато и нефтегазоносность подстилающих отложений. М.: Недра, 1989. 259 с.

10. Абросимова О.О., Кулагин С.И. Особенности строения отложений кембрийского комплекса в пределах Мирнинского выступа (Непско-Ботуобинская антеклиза) // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 316, № 1. С. 48–52.

11. Лёвин Ф.Д. Объемная геолого-геофизическая модель Верхнечонского месторождения УВ // Современные аэрогеофизические методы и технологии: сб. статей / науч. ред. П.С. Бабаянц, В.А. Буш. Вып. 1. Т. 1. М.: ЗАО «ГНПП «Аэрогеофизика», 2009. С. 195–225.

12. Вассоевич Н.Б. Теория осадочно-миграционного происхождения нефти (исторический обзор и современное состояние) // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1967. № 11. С. 135–156.

References

1. Feoktistov G.D. *Petrologiya i usloviya formirovaniya trappovykh sillov* [Petrology and formation conditions of trap sills]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1978, 166 p. (In Russ.).

2. Skripin A.I., Alekseev E.B. Evolution of trap magmatism in the southern part of the Siberian platform. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1981, vol. 22, no. 11, pp. 12–17. (In Russ.).

3. Tonkikh M.E., Baryshev A.S., Egorov K.N., Kashkarev D.L. Structural position of traps in the south of Siberian platform. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 12 (59), pp. 65–73. (In Russ.).

4. Vasil'ev Yu.R., Zolotukhin V.V., Feoktistov G.D., Prusskaya S.N. Estimation of volumes and genesis of Permian-Triassic trap magmatism on the Siberian platform. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2000, vol. 41, no. 12, pp. 1696–1705. (In Russ.).

5. Antsiferov A.S., Bakin V.E., Vorob'ev V.N. *Nepsko-Botuobinskaya antekliza – novaya perspektivnaya oblast' dobychi nefiti i gaza na Vostoke SSSR* [Nepa-Botuoba anticline as a new promising field of oil and gas production in the East of the USSR]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 245 p. (In Russ.).

6. Zamaraev S.A., Geletii N.K., Malykh A.V. On the temperature effect of traps on potassium salts of the Nepa potassium-bearing basin in Eastern Siberia. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1985, vol. 26, no. 4, pp. 42–47. (In Russ.).

7. Gazhula S.V. Features of a trap magmatism in connection with the oil and gas potential of the Siberian platform. *Neftegazovaya geologiya. Teoriya i praktika* [Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies], 2008, vol. 3, no. 1, pp. 1–8. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/4/10_2008.pdf (10 February 2019).

8. Odintsova T.V., Drobot D.I. Trap magmatism and oil and gas potential of the Vendian terrigenous complex of the Lena oil and gas region. *Geologiya nefiti i gaza* [Oil and Gas Geology], 1983, no. 7, pp. 6–10. (In Russ.).

9. Starosel'tsev V.S. *Tektonika bazal'tovykh plato i neftegazonosnost' podstilayushchikh otlozhenii* [Basaltic plateau tectonics and oil and gas potential of underlying sediments]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 259 p. (In Russ.).

10. Abrosimova O.O., Kulagin S.I. Structural features of the deposits of the Cambrian complex within the Mirnyi protrusion (Nepa-Botuoba anticline). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2010, vol. 316, no. 1, pp. 48–52. (In Russ.).

11. Levin F.D. *Ob'emnaya geologo-geofizicheskaya model' Verkhnechonskogo mestorozhdeniya UV* [3-D geological and geophysical model of the Verkhnechonsk hydrocarbon field]. *Sovremennye aerogeofizicheskie metody i tekhnologii* [Modern aero geophysical methods and technologies]. Iss. 1, vol. 1. Moscow: CC "GRPE 'Aerogeofizika'" Publ., 2009, pp. 195–225. (In Russ.).

12. Vassoevich N.B. *Teoriya osadochno-migratsionnogo proiskhozhdeniya nefti (istoricheskii obzor i sovremennoe sostoyanie)* [Theory of the sedimentary-migration origin of oil (historical review and

current state)]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya* [Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological series], 1967, no. 11, pp. 135–156. (In Russ.).

Критерии авторства

Рапацкая Л.А., Тонких М.Е., Стрижаков Е.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Larisa A. Rapatskaya, Marina E. Tonkikh, Evgeniy A. Strizhakov have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Информация об авторах

Рапацкая Лариса Александровна, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: raplarisa@yandex.ru*

Тонких Марина Евгеньевна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: tonkikh_me@istu.edu*

Стрижаков Евгений Алексеевич, студент гр. НДДБ-17-1 Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: strizhakov.evgenii@mail.ru*

Information about the authors

Larisa A. Rapatskaya, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: raplarisa@yandex.ru*

Marina E. Tonkikh, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy) Associate Professor of the Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation Systems of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: tonkikh_me@istu.edu*

Evgeniy A. Strizhakov, Student of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: strizhakov.evgenii@mail.ru*

Оригинальная статья / Original article

УДК (551.243.4:551.248.1)553:98.(571.5-12)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-15-26>

Прогноз нефтегазоперспективных объектов в бассейне реки Виви (Сибирская платформа) по комплексу геолого-гидрогеохимических методов

© И.В. Литвинова, Т.И. Ларионова

Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья,
г. Новосибирск, Российская Федерация

Резюме: В западной части Сибирской платформы (Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции) сосредоточены крупные по величине начальные прогнозные ресурсы и запасы углеводородного сырья, но основная разведанная доля приходится на Байкитскую и Катангскую антеклизы. Севернее этих территорий расположена слабоизученная геолого-геофизическими методами территория Курейской синеклизы. Прогноз и поиски нефти и газа на обширных малоизученных территориях опережающими геохимическими методами в комплексе с традиционными геолого-геофизическими остается актуальной задачей геологоразведочных работ. Оценка перспектив нефтегазоносности проведена путем комплексирования геолого-геофизических и геохимических методов. Это методы тектонического прогноза погребенных поднятий и оценка их нефтегазоносности опережающими гидрогазогеохимическими методами (геохимические методы разведки, предназначенные для обнаружения присутствия углеводородов в приповерхностных водах и придонных слоях). На территории центральной части Курейской синеклизы погребенные поднятия рассматриваются как потенциальные ловушки для углеводородов, которые аккумулируют нефть и газ, поступающий из отложений рифея и палеозоя. Анализ гидрогазогеохимических проб, отобранных над погребенными поднятиями, свидетельствует, что в бассейне р. Виви осуществляется скрытая разгрузка преимущественно хлоридно-кальциевых (натриево-кальциевых) подземных рассолов. Очаги и зоны разгрузки флюидов приурочены к разрывным нарушениям. В составе проб природных вод и газов обнаружены следующие нефтегазоперспективные показатели: водорастворенные ароматические углеводороды, тяжелые углеводороды, которые могут указывать на возможное углеводородное насыщение. Полученные результаты согласуются с известными представлениями о широком развитии в центральной части Тунгусского артезианского бассейна восходящей разгрузки высокометаморфизованных хлоридно-кальциевых рассолов. Разгрузка на дне рек является кратчайшим и наиболее легким путем выхода глубинных вод, поэтому русла крупных рек считаются дренами для поступающих снизу глубинных вод. Особенно интенсивный подток наблюдается вдоль крупных р. Нижняя и Подкаменная Тунгуска, Таймура, Тутончана, Кочечум, Ейка и т. д. Практически всегда поверхностные аномалии контролируются зонами разломов и могут нести информацию о наличии нефтегазовых углеводородных скоплений в осадочном чехле.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Курейская синеклиза, Логанчинская структура, гидрогазогеохимическое опробование, погребенное поднятие, нефтегазоносность

Информация о статье: Дата поступления 23 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 5 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Литвинова И.В., Ларионова Т.И. Прогноз нефтегазоперспективных объектов в бассейне реки Виви (Сибирская платформа) по комплексу геолого-гидрогеохимических методов. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 15–26. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-15-26.

Forecasting the oil and gas potential of the sites in the Vivi river basin (Siberian platform) using a complex of geological and hydrogeochemical methods

© Irina V. Litvinova, Tatiana I. Larionova

Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources,
Novosibirsk, Russian Federation

Abstract: Large forecast resources and hydrocarbon reserves are concentrated in the Western part of the Siberian platform (Lena-Tunguska oil and gas province). But most of the explored resources of oil and gas are located in the Baikitskaya and Katanga anticlines. The understudied by geological and geophysical methods Kureya syncline is located to the north of the territories of the Baikitskaya and Katanga oil and gas areas. The forecast and search for oil and gas in the vast poorly investigated areas by the advanced geochemical methods in combination with traditional geological and geophysical ones remain a relevant task of exploration. The oil and gas potential is estimated using a complex of geological and hydrogeochemical methods. These are the methods of tectonic forecast of buried uplifts and estimation of their oil and gas potential by the advanced hydrogasgeochemical methods (geochemical exploration methods designed for detecting the presence of hydrocarbons in surface waters and bottom layers). The buried uplifts located on the territory of the Central part of the Kureya syncline are considered as potential hydrocarbon traps that accumulate oil and gas coming from the Riphean and Paleozoic sediments. The analysis of the hydrogasgeochemical samples taken above the buried uplifts shows that there is a latent discharge of mainly calcium chloride (sodium-calcium) underground brines in the basin of the Vivi river. The centers and discharge zones of fluids are associated with faults. The following oil and gas exploration indicators have been found in the composition of natural water and gas samples: water-soluble aromatic hydrocarbons, heavy hydrocarbons, which may indicate possible hydrocarbon saturation. The results obtained are consistent with the known ideas about the wide development of the ascending discharge of highly metamorphosed calcium chloride brines in the central part of the Tunguska artesian basin. Discharge at the bottom of rivers is the shortest and easiest way out of deep waters, therefore the beds of large rivers are considered drains for the deep waters coming from below. Especially intense flow is observed along the large rivers Lower and Podkamennaya Tunguska, Taimur, Tutonchan, Kochechum, Eika, etc. Fault zones almost always control surface anomalies, which can indicate the presence of oil and gas hydrocarbon accumulations in the sedimentary cover.

Keywords: Siberian platform, Kureya syncline, Loganchinskaya structure, hydrogasgeochemical sampling, buried uplift, oil and gas potential

Information about the article: Received December 23, 2018; accepted for publication March 5, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Litvinova I.V., Larionova T.I. Forecasting the oil and gas potential of the sites in the Vivi river basin (Siberian platform) using a complex of geological and hydrogeochemical methods. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 15–26. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-15-26.

Введение

В тектоническом отношении Курейская синеклиза как единая депрессия четко выражена лишь по нижне- и среднепалеозойским горизонтам. Доминируют на большей ее части венд-ордовикские отложения [1], суммарная мощность которых изменяется от 3 км на юге до 5 км на северо-западе [2]. Верхнепалеозойские и мезозойские образования входят уже в состав наложенной Тунгусской синеклизы и распространены на юге

широко за контурами Курейской синеклизы (рис. 1).

Тунгусская синеклиза является одним из крупнейших осадочных бассейнов на Сибирской платформе. Мощность осадочного чехла варьирует в разных ее частях от 1 до 3 км и более. Это самая крупная отрицательная структура Сибирской платформы с площадью более 1,2 млн км², центральная часть которой до сих пор имеет крайне низкую степень изученности [1].

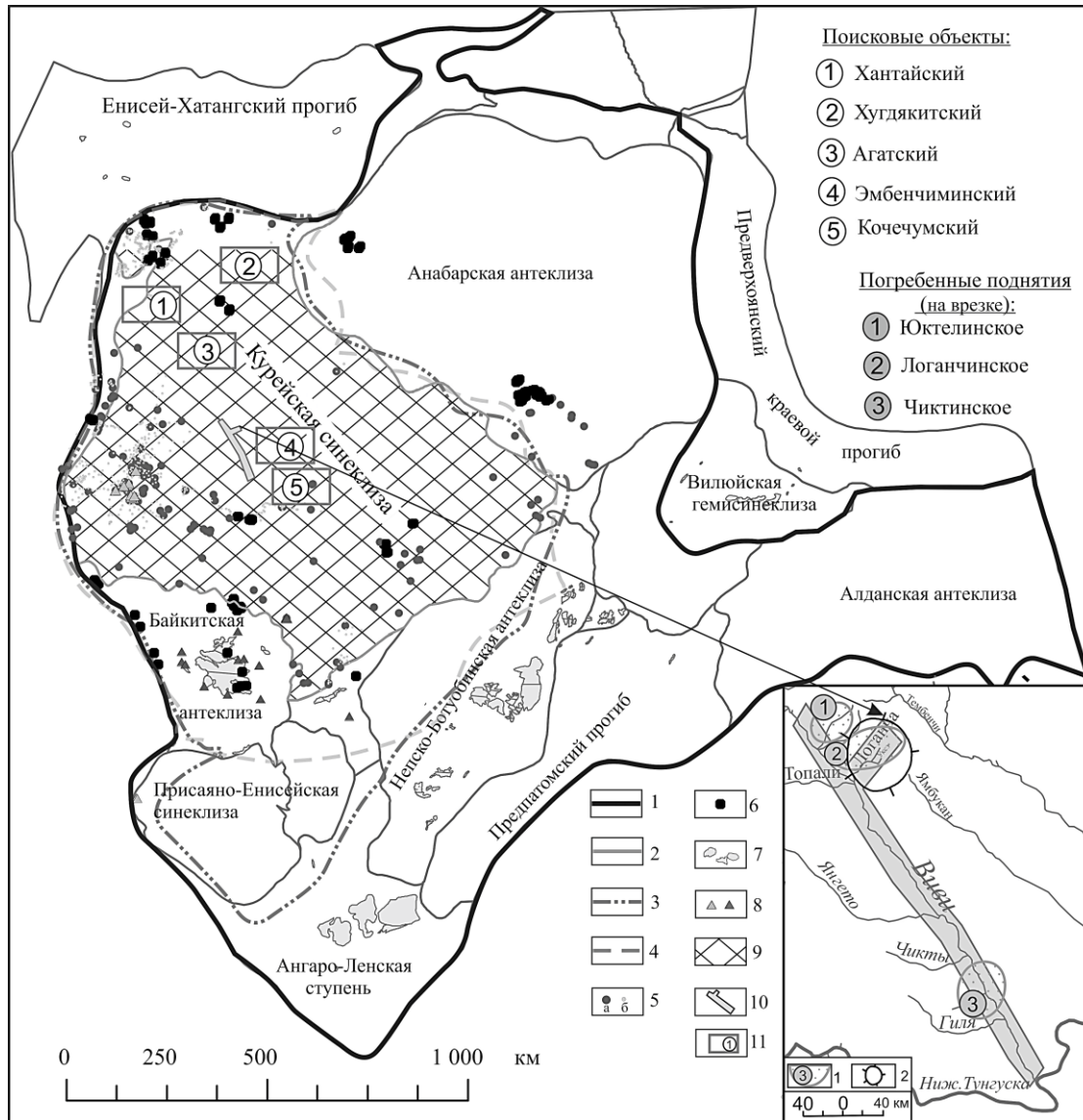


Рис. 1. Обзорная карта района исследований:

- 1 – границы Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции; 2 – границы надпорядковых структур;
 3 – тектонические границы наложенной Тунгусской синеклизы по В.С. Старосельцеву [1];
 4 – границы Тунгусского артезианского бассейна¹; 5 – скважины: а – глубокие, б – колонковые;
 6 – битумопроявления в верхней части разреза; 7 – месторождения нефти и газа;
 8 – нефте- и газопроявления в глубоких скважинах; 9 – район исследования,
 10 – участок отбора проб, 11 – поисковые объекты

На врезке: 1 – погребенные поднятия, выделенные по результатам обработки линеamentной сети, 2016 г.; 2 – Логанчинское поднятие

Fig. 1. Areal map of the area under investigation:

- 1 – boundaries of the Lena-Tunguska oil and gas province; 2 – boundaries of superorder structures;
 3 – tectonic boundaries of the imposed Tunguska syncline according to V.S. Staroseltsev [1];
 4 – boundaries of the Tunguska artesian basin¹; 5 – wells: a – deep wells, b – core wells;
 6 – bitumen occurrences in the upper part of the section; 7 – oil and gas fields;
 8 – oil and gas ingress in deep wells; 9 – area under investigation; 10 – sampling site;
 11 – prospects Inset map displays: 1 – buried uplifts identified according to the results of lineament network processing, 2016; 2 – Loganchinskoe uplift

¹Атлас гидрогеологических и инженерно-геологических карт СССР. М., 1983. / Atlas of hydro-

geological and engineering-geological maps of the USSR. Moscow, 1983.

Геологическое описание района. Река Виви протекает в центральной части Тунгусской синеклизы в поле сплошного распространения триасовых туфогенно-эффузивных образований. На размытой поверхности терригенных угленосных отложений верхней перми залегают следующие свиты (снизу вверх): тутончанская (100–120 м), корвунчанская (400–550 м), нидымская (500–620 м), кочечумская (200–300 м), ямбуканская (150–200 м). Район работ покрыт мощной толщей базальтовых покровов, в которых выделяются маркирующие горизонты, обладающие определенными структурно-текстурными характеристиками. На исследуемой территории выделяются следующие маркирующие покровы (снизу вверх): делочинский, калтаминский, ямбуканский [1]. В верхнем течении левого притока р. Виви – р. Логанча – в рельефе выделяется округлая Логанчинская котловина диаметром 20 км и глубиной до 500 м (см. рис. 1). С Логанчинской котловиной отождествляется одноименная положительная структура, заложенная в пермо-триасовых породах трапповой формации. Предыдущими исследователями эта структура рассматривалась в разных формах: как брахиантиклиналь, горст, астроблема [3], как соляной диапир, перспективный в отношении нефтегазоносности [4].

Гидрогеологические особенности района. Район работ находится в пределах Тунгусского артезианского бассейна. Представления о его гидрогеологическом строении сформировались по работам В.И. Вождова и других исследователей [5–10]. Согласно схеме гидрогеологического районирования, территория Курейской синеклизы и перекрывающая ее Тунгусская синеклиза размещаются в пределах одной артезианской структуры первого порядка – в Тунгусском артезианском

бассейне (см. рис. 1)². Тунгусский артезианский бассейн – сложно построенная гидрогеологическая структура, не имеющая аналогов [11]. Особенности его строения обусловлены:

- наличием соленосных толщ нижнего кембрия и среднего девона;
- преобладанием пластовых интрузий и базальтовых покровов;
- интенсивной разрывной тектоникой;
- неоднородностью неотектонических движений;
- высокими пластовыми давлениями на глубинах до 3 км, что вызывает фонтанирование и самоизливы при вскрытии скважинами водоносных горизонтов на разных глубинах;
- практически повсеместным распространением толщи многолетнемерзлых пород с узкими таликовыми окнами.

В комплексе толща многолетнемерзлых пород и триасовых туфогенно-эффузивных образований на междуречных пространствах представляет собой верхний региональный флюидоупор на пути восходящих флюидов. Все эти особенности находят отражение в химическом составе подземных и поверхностных вод.

Цель данного исследования – прогноз нефтегазоносности палеозойских отложений центральной части Курейской синеклизы. Поисковые работы на территории исследования по комплексу геохимических, тектонических методов с традиционными геолого-геофизическими позволят прирастить ресурсы углеводородов и подготовить новые участки для недропользования.

Материалы и методы исследования

При проведении поисков нефти и газа на малоизученных территориях Сибирской платформы положительно

²Атлас гидрогеологических и инженерно-геологических карт СССР. М., 1983. / Atlas of hydro-

geological and engineering-geological maps of the USSR. Moscow, 1983.

зарекомендовал себя разработанный В.С. Старосельцевым (Сибирский научно-исследовательский институт геологии, геофизики и минерального сырья) метод прогноза погребенных палеозойских поднятий, перекрытых туфогенно-эффузивной толщей триаса. Сопоставление результатов статистического анализа протяженности и ориентировки разрывных нарушений осадочного чехла в комплексе с поверхностными гидрогеохимическими исследованиями позволяет прогнозировать нефтегазоносность погребенных структур [12, 13].

Методика выделения погребенных поднятий базируется на анализе совокупности независимых статистических показателей линеаментной сети, построенной путем дешифрирования аэрофотоснимков. Один из этих показателей отражает механизм формирования разрывов в результате объединения первичных трещин, чему способствует наличие на глубине более древних разрывных нарушений, к которым в платформенных условиях часто приурочены границы блоков. Дифференцированные вертикальные перемещения по этим разрывам обуславливают появление положительных и отрицательных структур. В результате над границами погребенных структур в поверхностных горизонтах образуются более протяженные разрывы. Другой статистический показатель линеаментной сети отражает аномалии геологической слоистой среды, влияющие на реализацию в поверхностных условиях полей тектонических напряжений. Погребенные поднятия вызывают отклонение линеаментов от направлений, типичных для каждого конкретного района.

Пространственное совмещение минимальных значений первого из этих показателей в окружении относительных

его максимумов с максимальными значениями второго из них в окружении относительных минимумов свидетельствует о наличии на этом участке поднятия. Отсутствие последнего в поверхностных горизонтах позволяет с высокой вероятностью ожидать существование положительной структуры на глубине [1].

Теоретической основой газогидрогеохимической оценки нефтегазоносности служит явление диффузии и миграции углеводородных флюидов из залежей углеводородов к поверхности [14]. На территории западной части Сибирской платформы установлена восходящая разгрузка подземных вод, зоны и очаги которой совмещаются с разрывными нарушениями и таликами [8]. Выявлена пространственно-генетическая связь зон современной и палеоразгрузки подземных вод [6]. По таким зонам многократно реализовалась миграция подземных вод и нефтидов, совместное размещение которых – вблизи разрывных нарушений, и это послужило основанием для прогноза нефтегазоносности на Непском, Камовском и Сурингдаконском сводах, где в пределах температурных и гидрогеохимических аномалий впоследствии были открыты месторождения нефти и газа [7].

Геохимические поиски нефти и газа, согласно Методическим рекомендациям Всесоюзного научно-исследовательского института ядерной геофизики и геохимии³, выполняются на двух последовательных стадиях поискового этапа геологоразведочных работ: прогнозно-рекогносцировочной (региональной) и поисково-оценочной (детальной).

Геохимические методы подразделяют на газогеохимические, гидрогеохимические, литогеохимические, микробиологические и фитогеохимические.

³Методические рекомендации по геохимическим методам поисков месторождений нефти и газа / сост. Л.М. Зорькин, Н.В. Лопатин, О.В. Барташевич [и др.]. М., 1975. 285 с. / Methodical

recommendations on geochemical methods of oil and gas field prospecting / L.M. Zorkin, N.V. Lopatin, O.V. Bartashevich [et al.]. Moscow, 1975. 285 p.

Применяемый комплекс ландшафтных геохимических методов для территории Курейской синеклизы:

– гидрогеохимический метод (отбор проб вод из источников и поверхностных водоемов);

– газогеохимический метод (отбор проб газа, сорбированного донными отложениями водоемов («газы ворошения»), и спонтанно выделяющихся субаквальных газов).

В пунктах опробования поверхностных водоемов осуществлялся отбор придонных проб воды, отбор проб субаквальных газов методом ворошения донных осадков. Пробы «газов ворошения» отбирались на слабо промытых (застойных) участках речного русла, в протоках и озерах.

В пробах газа изучено содержание азота, кислорода, диоксида углерода, водорода, гелия и углеводородов (в объемных процентах). В линии углеводородов определены метан и его гомологи до C₆ и выше: изомеры и нормальные разности предельного и непредельного ряда. Для оценки доли метана глубинной генерации и отделения сингенетичного вмещающим донным осадкам «болотного» газа выполнен изотопный анализ углерода ($\delta^{13}\text{C}$) метана и углекислого газа.

В пробах воды изучено: содержание катионов K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ и анионов Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, а также минерализации и сухого остатка; водорастворенные органические вещества (бензол, толуол), водорастворенный гелий. Общее количество проб на различные виды анализов составило 160 шт., дополнительно были привлечены данные по химическому составу вод рек и источников Нижней и Подкаменной Тунгуски, Таймуры, Тутончаны, Кочечума, Ейки.

Для выделения гидрохимических аномалий выполнена процедура стандартизации массива спектральных данных с расчетом коэффициентов аномальности металлов в единицах

стандартного отклонения. Расчет выполнен по формуле:

$$K_a = \frac{x_i - x_{\text{ср.}}}{\delta},$$

где x_i – индивидуальное содержание компонента; $x_{\text{ср.}}$ – среднее содержание в выборке (фон); δ – стандартное отклонение.

Комплекс геолого-гидрогеохимических методов был апробирован ранее на территории развития туфолавовых покровов на поисковых участках, расположенных рядом с районом исследования: Верхнехудякитском, Хантайском, Эмбенчиминском, Кочечумском, Агатском (см. рис. 1) [12]. Эти поднятия считаются ловушками для углеводородов, поступающих из нефтегазогенерирующих толщ рифей-палеозойских отложений [15]. Глубоким бурением данные поднятия еще не проверены. После 2020 г. планируется бурение параметрической скважины на Хантайской площади за счет федерального бюджета.

Результаты

В результате поиска новых нефтегазоперспективных объектов методом прогноза погребенных поднятий сотрудниками института в 2016 г. были выделены локальные структуры в центральной части Курейской синеклизы: Юктелинское, Логанчинское, Чиктинское (см. рис. 1). Для оценки нефтегазоносности выделенных структур проведено маршрутное гидрогеохимическое опробование.

Результаты гидрогазогеохимического опробования по р. Логанча и ее правому притоку р. Уксэ показали, что аномальные изменения значимых газогидрогеохимических компонентов приурочены к центральной части Логанчинского поднятия, наиболее затронутой разрывными нарушениями.

В среднем течении р. Уксэ отмечена гидрогеохимическая аномалия: по водорастворенным ароматическим соединениям нефтяного ряда (бензолу и толуолу) (рис. 2, В) и по водорастворен-

ному гелию; по газовым показателям по сумме тяжелых гомологов метана (тяжелых углеводородов), этану, углекислому газу превышение над фоном составляет до 2,5 единиц стандартного отклонения (рис. 2, А). За фон принято среднее арифметическое значение показателя по пробам, отобранным в долине р. Логанча. Гидрохимическая аномалия интерпрети-

руется авторами как проявление восходящей разгрузки подземных вод, но изотопные методы не подтвердили глубинность ее генезиса. Скорее всего, это объясняется промытостью поверхностных отложений сезонными паводковыми водами, которые вымывают диффузионные газы, сорбированные в верхних слоях за зимний период.

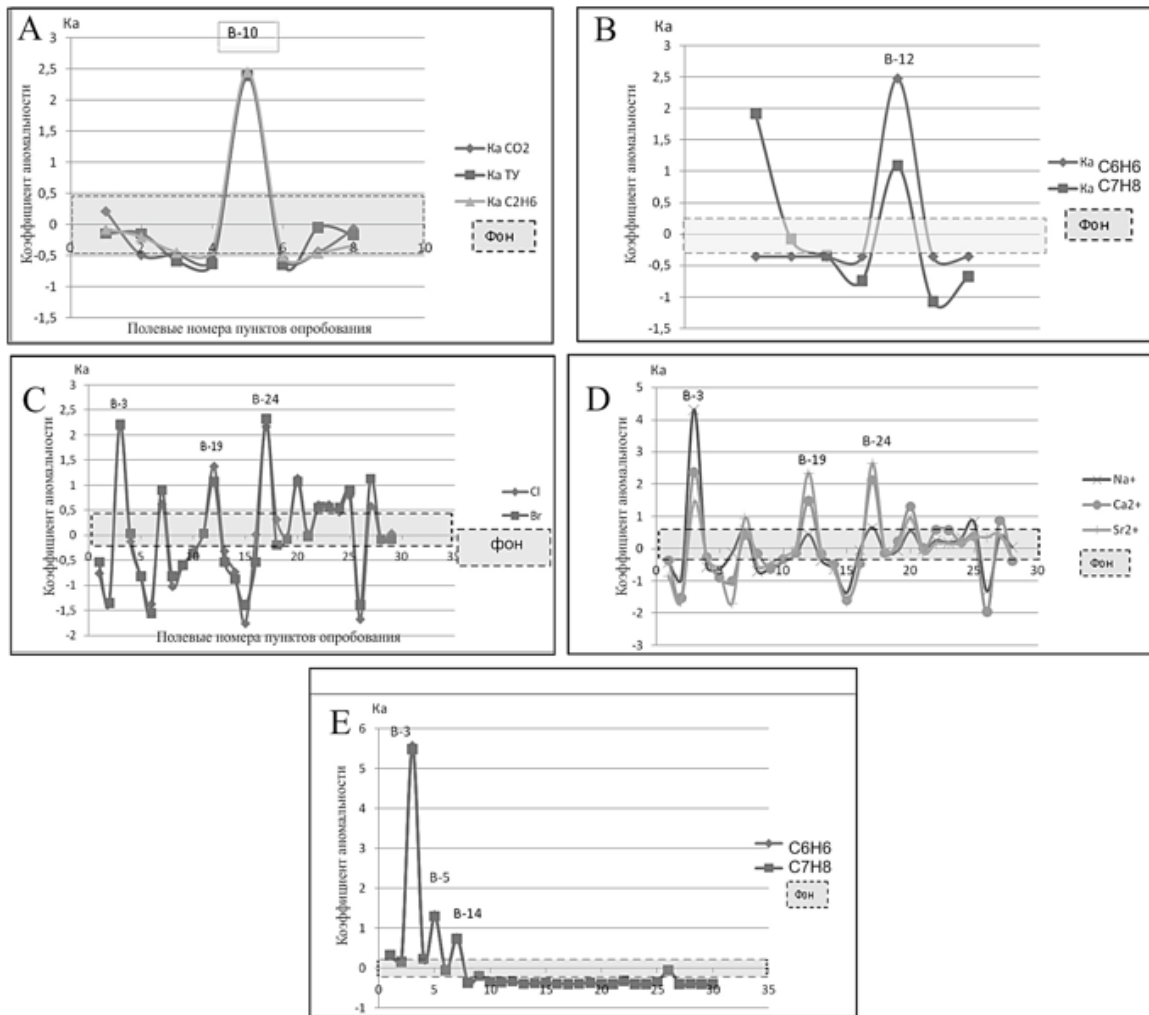


Рис. 2. Графики результатов гидрогеохимического опробования:

А – изменение компонентов газового состава по р. Логанча и Уксэ; В – аномальные проявления водорастворенных органических веществ (бензола и толуола) по р. Логанча и Уксэ; С – аномальные содержания хлора и брома в водах р. Виви; D – аномальные содержания катионов в водах р. Виви; E – аномальные проявления водорастворенных ароматических углеводородов (бензола и толуола)

Fig. 2. Diagrams of the results of hydrogeochemical sampling:

A – variation of gas composition components in the Logancha and Ukse rivers; B – abnormal manifestation of water-soluble organic substances (benzene and toluene) in the rivers Logancha and Ukse; C – abnormal content of chlorine and bromine in the waters of the river Vivi; D – abnormal content of cations in the waters of the river Vivi; E – abnormal occurrences of water-soluble aromatic hydrocarbons (benzene and toluene)

Гидрогеохимическое опробование, проведенное в долине р. Виви, показало, что состав вод преимущественно гидрокарбонатно-хлоридный натриево-кальциевый ($Ca > Na$) с минерализацией до 285 мг/л. Реже встречаются воды хлоридно-гидрокарбонатного натриево-кальциевого состава с минерализацией до 127 мг/л. Доля хлора в анионном составе вод колеблется в пределах 30–40 %-экв. На левобережье р. Виви выше устья р. Долгонах обнаружен источник соленых подземных вод гидрокарбонатно-хлоридного натриево-кальциевого состава с минерализацией 4,5 г/л.

При статистической обработке аналитических данных поверхностных вод воды соленого источника были удалены из массива для получения объективной оценки гидрогеохимического фона и выявления других аномалий. В 10 км выше устья р. Янгето и в 10 км выше устья р. Чикта отобрана проба с наибольшим процентным содержанием хлора – свыше 70 %-экв. (рис. 2, С). По своему генезису это воды смешанного состава: разубоженных нижнепалеозойских хлоридных кальциевых рассолов и поверхностных гидрокарбонатных вод. Показателями глубинности в данном случае выступает повышенное по сравнению с фоновым содержание катиона Ca^{2+} , Sr^{2+} , $Bг$ (рис. 2, D). Хлоридный состав поверхностных вод р. Виви указывает на современный процесс восходящей разгрузки подземных вод хлоридного кальциевого состава в Тунгусском бассейне. Разгрузка осуществляется в днищах речных долин через таликовые зоны. С таликовыми зонами, выделенными по данным электроразведки, ассоциируются гидрохимические аномалии в долине р. Виви в устье р. Верхняя Камда, в 2 км ниже устья р. Моокчен, в 10 км выше устья р. Янгето.

Отмечаются аномальные проявления водорастворенных ароматических компонентов (бензола и толуола). Превышение над фоном составляет до 5

единиц стандартного отклонения. За фон принято среднее арифметическое значение показателя по пробам в долине р. Виви. Сопоставление пространственных проявлений водорастворенного бензола и паров бензола в субаквальных газах показало их хорошую сходимость (рис. 2, E). Поверхностные проявления бензола / толуола размещаются закономерно над проекциями разломов.

Глубинность генезиса гидрохимической аномалии в 4,5 км выше устья р. Виви дополнительно может быть подтверждена изотопным составом газов, отобранных в зоне аномалии. Здесь на дневной поверхности среди туфогенно-осадочных пород выходят как интрузивные, так и эффузивные породы. Глубина дна реки возле места отбора пробы достигает 90 м. Для оценки доли метана глубинной генерации и отделения сингенетичного вмещающим донным осадкам «болотного» газа выполнен изотопный анализ углерода ($\delta^{13}C$) метана и углекислого газа. Важно, что в приустьевой части р. Виви получена проба газа с изотопным составом углерода метана $\delta^{13}C = -39,8$ ‰, что указывает на глубинный – миграционный – генезис полученного газа и дает нам свидетельства возможного присутствия залежей углеводородов в глубоких частях разреза выбранной территории. Аналогичный изотопный состав получен в газовых пробах на месторождениях Катангской седловины.

Общий состав газов в долине р. Виви, сорбированных донными отложениями, азотный, с небольшими содержаниями метана (до 23 %) и углекислого газа (до 3 %). Составленный по результатам опробования газовый профиль показывает, что пробы газов с высокими перспективными на углеводородное насыщение показателями (тяжелые углеводороды, метан, бензол, предельные углеводороды и парообразные углеводороды) сгруппировались на трех участках над таликовыми зонами (рис. 3, A). Проведенное

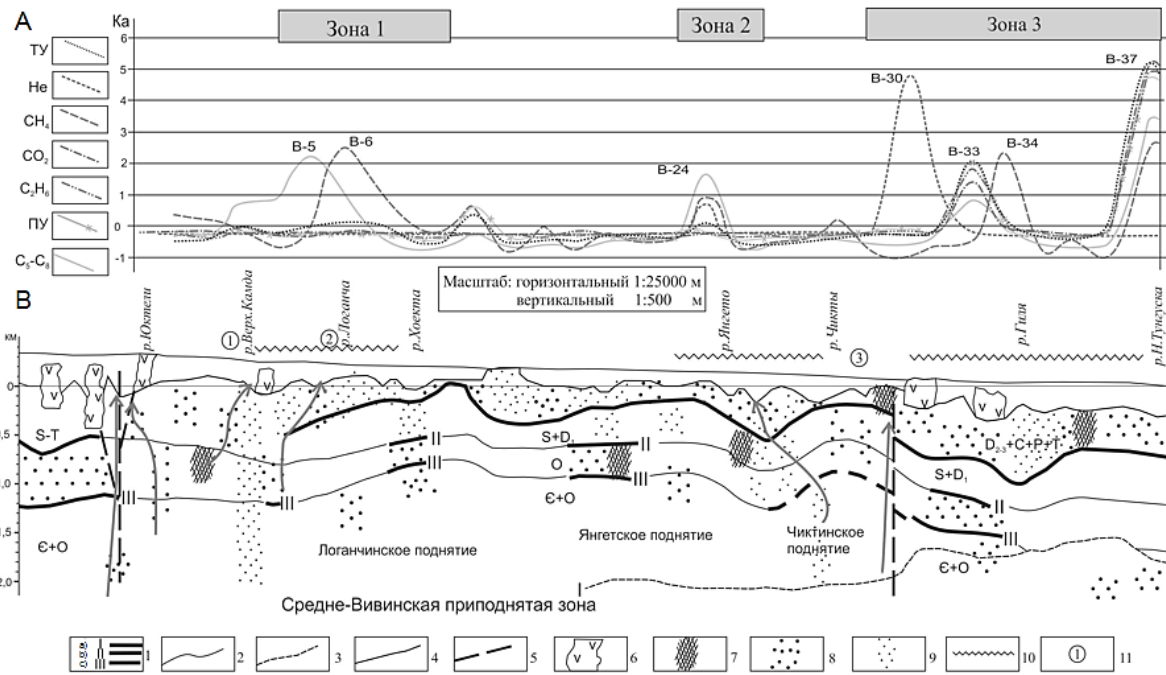


Рис. 3. Совмещение геолого-геофизических данных (В) с результатами газогидрогеохимических исследований (А):

А – линии коэффициентов аномальности: ТУ – тяжелых углеводородов; Не – гелия; CO₂ – углекислого газа; CH₄ – метана; C₂H₆ – бензола; ПУ – предельных углеводородов; C₅-C₈ – паробразных углеводородов

В – геолого-геофизический профиль вдоль р. Виви (составил В.М. Бубнов, 1982 [10]):

1 – границы зондирования становлением поля в ближней зоне, связываемые: а – с кровлей карбонатных пород нижнего девона силура, б – с кровлей горизонта коллекторов в ордовике, с – с подошвой горизонта коллекторов в ордовике); 2 – подошва поверхностного высокоомного слоя (криолитозона, опресненные воды, интрузии); 3 – отражающие границы; 4 – предполагаемые геологические границы; 5 – разрывы, предполагаемые по данным зондирования становлением поля в ближней зоне; 6 – интрузии; 7–9 – породы, насыщенные минерализованными водами: 7 – высокопористые или дробленные ($\rho \leq 1$ Ом), 8 – с хорошими коллекторскими свойствами ($1 \leq \rho \leq 5$ Ом), 9 – с удовлетворительными коллекторскими свойствами ($5 \leq \rho \leq 10$ Ом); 10 – таликовые зоны (предполагаемые по результатам работ 2016 г.); 11 – погребенные поднятия, выделенные по результатам обработки линеamentной сети, 2016 г.

Fig. 3. Combining of geological-geophysical data (B) and the results of gas-hydrogeochemical studies (A):

А – lines of the anomaly ratio: ТУ – heavy hydrocarbons; Не – helium; CO₂ – carbon dioxide; CH₄ – methane; C₂H₆ – benzene; ПУ – saturated hydrocarbons; C₅-C₈ – vaporous hydrocarbons

В – geological and geophysical profile along the river Vivi (compiled by V.M. Bubnov, 1982 [10]):

1 – boundaries of near field transient EM sounding associated with: a – the roof of carbonate rocks of the Lower Devonian Silurian, b – the roof of the reservoir horizon in the Ordovician c – the bottom of the reservoir horizon in the Ordovician; 2 – the bottom of the surface high-resistance layer (cryolithozone, desalinated water, intrusions); 3 – reflecting boundaries; 4 – estimated geological boundaries; 5 – fractures predicted by the data of the near field transient EM sounding; 6 – intrusions; 7–9 – rocks saturated with mineralized waters: 7 – highly porous or crushed ($\rho \leq 1$ Ohm), 8 – with good reservoir properties ($1 \leq \rho \leq 5$ Ohm), 9 – with satisfactory reservoir properties ($5 \leq \rho \leq 10$ Ohm); 10 – takil zones (estimated based on the results of work in 2016); 11 – buried uplifts, distinguished by the results of lineament network processing, 2016

газогидрогеохимическое опробование подтвердило три перспективных объекта: два – в верхнем течении р. Виви, включая Логанчинскую структуру, и один – в нижнем течении (см. рис. 1, 3).

Совмещение газового профиля, построенного по результатам опробования по р. Виви, с геолого-геофизическим, построенным по данным зондирования становлением поля в ближней зоне,

позволяет связать газовые аномалии на поверхности с краевыми частями погребенных поднятий, а наличие таликовых зон – с выходами минерализованных вод (см. рис. 3).

Выводы

На основе интерпретации комплекса материалов бурения колонковых скважин, испытания параметрической скважины, данных электроразведочного профилирования (зондирование становлением поля в ближней зоне / магнитотеллурическое зондирование), сейсмических работ по речному профилю «Нижняя Тунгуска», статистической обработки линейной сети и поверхностного гидрогеохимического опробования выделяется перспективная территория. Данная территория ограничена контрастными речными долинами, которые приурочены к ослабленным проницаемым тектоническим зонам, контролирующим восходя-

щую разгрузку глубинных флюидов в виде рассольных источников, газовых эманаций и битумного насыщения пород. Как уже неоднократно указывалось в опубликованных источниках [5, 6], очаги и зоны разгрузки флюидов всегда приурочены к разрывным нарушениям.

Изученные проявления свидетельствуют о возможном присутствии залежей углеводородов в глубоких частях разреза выбранной территории. Междуречные пространства, ограниченные проводящими разломами, представляют собой стабильные тектонические блоки с благоприятными условиями накопления и сохранности предполагаемых залежей углеводородов в резервуарах верхнего палеозоя. Дополнительным фактором сохранности является сплошное бронирование данной территории с поверхности траппами мощностью до 500 м и туфовым экраном.

Библиографический список

1. Старосельцев В.С. Тектоника базальтовых плато и нефтегазоносность подстилающих отложений. М.: Недра, 1989. 259 с.
2. Филиппов Ю.А., Старосельцев В.С. Рифейские прогибы – основные источники нефти и газа в западной части Сибирской платформы // Геология нефти и газа. 2009. № 6. С. 40–56.
3. Вишневецкий С.А. Логанчинский импактный кратер // Геология и геофизика. 1985. № 5. С. 43–51.
4. Лебедев В.М., Мигурский А.В., Старосельцев В.С. Новые данные о строении Логанчинского поднятия // Тектоника нефтегазоносных областей Сибири. Вып. 217. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1975. С. 88–94.
5. Вожов В.И. Подземные воды Тунгусского бассейна. М.: Недра, 1977. 80 с.
6. Вожов В.И. Возможности применения газогидрогеохимических поисков нефтегазовых залежей на Сибирской платформе // Литология и геохимия нефтегазоносных областей Сибири. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1974. С. 79–82.
7. Вожов В.И. Гидрогеологические условия месторождений нефти и газа Сибирской платформы. М.: Недра, 1987. 204 с.
8. Вожов В.И., Кашенко С.А. Зоны разгрузки флюидов в Тунгусском бассейне // Геология нефтегазоносных регионов Сибири. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1971. С. 137–141.
9. Толстихин О.Н., Шепелев В.В., Никитина Н.М. [и др.]. Мерзлотно-гидрогеологические условия Восточной Сибири / отв. ред. П.И. Мельников. Новосибирск: Наука, 1984. 191 с.
10. Бубнов В.М. Распределение подземных рассолов в Тунгусской синеклизе по данным электрометрии // Гидрогеология нефтегазоносных областей Сибирской платформы. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 1982. С. 44–54.
11. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 550 с.
12. Старосельцев В.С., Вожов В.И., Дивина Т.А. Прогноз нефтегазоперспективных объектов на севере Эвенкийского автономного округа по комплексу геолого-гидрогеохимических методов // Проблемы недропользования на территории Эвенкийского автономного округа: докл. II регион. конф. Красноярск, 1999. С. 17–24.
13. Старосельцев В.С. О выделении погребенных поднятий Тунгусской синеклизы на основе анализа разрывов базальтовых покровов // Проблемные вопросы тектоники нефтегазоносных областей Сибири: избр. тр. Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2006. С. 25–28.
14. Соколов В.А. Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971. 336 с.

15. Старосельцев В.С., Дивина Т.А. Сравнительный анализ перспектив формирования крупных скоплений углеводородов на севере

Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 11-12. С. 1918–1926.

References

1. Starosel'tsev V.S. *Tektonika bazal'tovykh plato i neftegazonosnost' podstila-yushchikh otlozhenii* [Tectonics of basaltic plateau and oil and gas content of underlying sediments]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 259 p. (In Russ.).

2. Filiptsov Yu.A., Starosel'tsev V.S. Riphean depressions as main sources of oil and gas in the western part of the Siberian platform. *Geologiya nefti i gaza* [Oil and Gas Geology], 2009, no. 6, pp. 40–56. (In Russ.).

3. Vishnevskii S.A. Logachinsky impact crater. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1985, no. 5, pp. 43–51. (In Russ.).

4. Lebedev V.M., Migurskii A.V., Starosel'tsev V.S. *Novye dannye o stroenii Loganchinskogo podnyatiya* [New data on the structure Loganchinsky uplift]. *Tektonika neftegazonosnykh oblastei Sibiri* [Tectonics of oil and gas fields of Siberia]. Iss. 217. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1975, pp. 88–94. (In Russ.).

5. Vozhov V.I. *Podzemnye vody Tunguskogo basseina* [Groundwater of the Tunguska basin]. Moscow: Nedra Publ., 1977, 80 p. (In Russ.).

6. Vozhov V.I. *Vozmozhnosti primeneniya gazogidrogeokhimicheskikh poiskov neftegazovykh zalezhei na Sibirskoi platforme* [Application possibilities of gas hydrogeochemical prospecting of oil and gas deposits on the Siberian platform]. *Litologiya i geokhimiya neftegazonosnykh oblastei Sibiri* [Lithology and geochemistry of oil and gas fields of Siberia]. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1974, pp. 79–82. (In Russ.).

7. Vozhov V.I. *Gidrogeologicheskie usloviya mestorozhdenii nefti i gaza Sibirskoi platformy* [Hydrogeological conditions of oil and gas fields on the Siberian platform]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 204 p. (In Russ.).

8. Vozhov V.I., Kashchenko S.A. *Zony razgruzki flyuidov v Tungusskom basseine* [Zone of fluid discharge in the Tunguska basin]. *Geologiya neftegazonosnykh regionov Sibiri* [Geology of oil and gas regions of Siberia]. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1971, pp. 137–141. (In Russ.).

9. Tolstikhin O.N., Shepelev V.V., Nikitina N.M. *Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya*

Vostochnoi Sibiri [Permafrost hydrogeological conditions of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984, 191 p. (In Russ.).

10. Bubnov V.M. *Raspredelenie podzemnykh rassolov v Tungusskoi sineklize po dannym elektrometrii* [Distribution of underground brines in the Tunguska syncline according to electrometry data]. *Gidrogeologiya neftegazonosnykh oblastei Sibirskoi platformy* [Hydrogeology of oil and gas regions of the Siberian platform]. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1982, pp. 44–54. (In Russ.).

11. Kontorovich A.E., Surkov B.C., Trofimuk A.A. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoi platformy* [Geology of oil and gas of the Siberian platform]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 550 p. (In Russ.).

12. Starosel'tsev V.S., Vozhov V.I., Divina T.A. *Prognoz neftegazoperspektivnykh ob'ektov na severe Evenkiiskogo avtonomnogo okruga po kompleksu geologo-gidrogeokhimicheskikh metodov* [Prediction of oil and gas promising areas in the North of the Evenky Autonomous District by the complex of geological and hydrogeochemical methods]. *Dokl. II region. konf. "Problemy nedropol'zovaniya na territorii Evenkiiskogo avtonomnogo okruga"* [Reports of the second regional conference "Problems of Subsoil Resource Management in the Evenky Autonomous District"]. Krasnoyarsk, 1999, pp. 17–24. (In Russ.).

13. Starosel'tsev V.S. *O vydelenii pogrebennykh podnyatii Tungusskoi sineklizy na osnove analiza razryvov bazal'tovykh pokrovov* [On distinguishing of Tunguska syncline buried uplifts based on the basalt cover fracture analysis]. *Problemy voprosy tektoniki neftegazonosnykh oblastei Sibiri* [Problematic issues of oil and gas region tectonics in Siberia]. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 2006, pp. 25–28. (In Russ.).

14. Sokolov V.A. *Geokhimiya prirodnykh gazov* [Geochemistry of natural gases]. Moscow: Nedra Publ., 1971, 336 p. (In Russ.).

15. Starosel'tsev V.S., Divina T.A. Comparative analysis of the formation prospects of large hydrocarbon accumulations in the North of the Tunguska syncline. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2001, vol. 42, no. 11-12, pp. 1918–1926. (In Russ.).

Критерии авторства

Литвинова И.В., Ларионова Т.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Литвинова Ирина Валерьевна, заведующая группой Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья, г. Новосибирск, Российская Федерация; *e-mail: litvinova@sniiggims.ru*

Ларионова Татьяна Ивановна, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья, г. Новосибирск, Российская Федерация; *e-mail: larionova@sniiggims.ru*

Authorship criteria

Irina V. Litvinova, Tatiana I. Larionova have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Irina V. Litvinova, Head of the Group of the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russian Federation; *e-mail: litvinova@sniiggims.ru*

Tatiana I. Larionova, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources, Novosibirsk, Russian Federation; *e-mail: larionova@sniiggims.ru*

Оригинальная статья / Original article

УДК 556.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-27-40>

Подземный сток центральной части Восточного Саяна, основные особенности его формирования и распределения

© П.С. Бадминов^a, С.Х. Павлов^b,
В.Е. Дмитриев-Добровольский^c, А.И. Оргильянов^d

^{a,b,d}Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

^cИркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данной статьи заключается в определении подземного стока и выявлении основных особенностей его формирования и распределения по территории центральной части Восточного Саяна. Определение подземного стока рек исследуемой территории, имеющих временные ряды наблюдений за речным стоком, проводилось методом генетического расчленения гидрографов рек с учетом изъятия части стока на наледообразование. Для неизученных рек подземный сток определялся методом переходных коэффициентов по единичным расходам воды, полученным при проведении гидрометрической съемки зимней межени. Основные особенности формирования и распределения подземного стока выявлены в ходе корреляционного анализа величин подземного стока с основными стокоформирующими признаками. В результате впервые для большой труднодоступной территории был оценен подземный сток, рассмотрены особенности его формирования и пространственного распределения. На исследуемой территории модуль подземного стока изменяется в широких пределах от 0,5 до 25 л/(с·км²) и имеет свои особенности. На одних участках – в бассейнах р. Кирей и Ярма – происходит увеличение модуля стока с высотой местности, на других – в смежном бассейне р. Ока – модуль стока уменьшается, на третьих – в бассейне р. Большая Белая – эта связь выражена не столь ярко. Также не проявляется связь величины подземного стока с площадью водосбора, так как высокая расчлененность рельефа центральной части Восточного Саяна приводит к тому, что размеры площади водосбора не всегда являются показателем глубины эрозийного вреза русла. Особенности формирования и распределения подземного стока исследуемой территории обусловлены ландшафтно-климатическими условиями, в первую очередь распределением атмосферных осадков, и гидрогеологическими условиями конкретных водосборов, определяющихся геолого-структурными особенностями и характером развития многолетнемерзлых пород на разных участках исследуемой территории.

Ключевые слова: подземный сток, площадь водосбора, атмосферные осадки, модуль подземного стока, распределение подземного стока

Информация о статье: Дата поступления 18 января 2019 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Бадминов П.С., Павлов С.Х., Дмитриев-Добровольский В.Е., Оргильянов А.И. Подземный сток центральной части Восточного Саяна, основные особенности его формирования и распределения. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 27–40. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-27-40.

Underground runoff of the central part of the Eastern Sayan, its main formation and distribution features

© Prokopii S. Badminov^a, Sergey Kh. Pavlov^b,
Vladislav E. Dmitriev-Dobrovolsky^c, Aleksey I. Orgilianov^d

^{a,b,d}Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

^cIrkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this paper is determination of underground runoff and identification of its main formation and distribution features in the central part of the Eastern Sayan. The groundwater runoff of rivers in the area under investigation having time series of river runoff observations was carried out by the method of genetic separation of runoff hydrographs considering the withdrawal of a part of the runoff to icing. The underground runoff of the

unexplored rivers was determined by the method of transition coefficients for unit water flows obtained at a hydro-metric survey of winter low flow. The main formation and distribution features of the underground runoff were identified in the course of the correlation analysis of underground runoff values with the main flow-forming characteristics. As a result, it is the first time when the underground runoff is estimated for a large, hard-to-reach territory. Consideration is given to its formation and spatial distribution features. The rate of the underground runoff in the studied area varies widely from 0.5 l/(s·km²) to 25 l/(s·km²) and has its own features. In some areas (the Kirei and Yarma river basins) the runoff rate increases with the height of the terrain. In the others, (the adjacent basin of the river Oka) the runoff rate decreases, and in some areas (the basin of the river Bolshaya Belaya) this relationship is not so distinctive. Also, the relationship between the amount of the underground runoff and the drainage area does not manifest itself, since the great roughness of the relief in the central part of the Eastern Sayan leads to the fact that the size of the drainage area is not always indicative of the depth of the erosion cutting of the channel. The formation and distribution features of the underground runoff in the studied area are specified by the landscape-climatic conditions, primarily by the distribution of precipitation and hydrogeological conditions of specific drainages determined by geological and structural features and the nature of permafrost development in different areas of the studied area.

Keywords: underground runoff, drainage area, precipitation, rate of underground runoff, underground runoff distribution

Information about the article: Received January 18, 2019; accepted for publication February 19, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Badminov P.S., Pavlov S.Kh., Dmitriev-Dobrovolsky V.E., Orgilianov A.I. Underground runoff of the central part of the Eastern Sayan, its main formation and distribution features. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 27–40. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-27-40.

Введение

Подземные воды являются одним из важнейших природных ресурсов. Формирование основной части подземного стока территории Присяянья происходит в горноскладчатой области (Восточный Саян), поэтому количественное определение величины подземного стока центральной части Восточного Саяна позволяет оценить обеспеченность региона подземными водами, а также выявить особенности и характер его пространственного распределения.

Центральная часть Восточного Саяна охватывает Окинское плоскогорье с окружающими хребтами Большой Саян, Окинский хребет и склоны Передового горного хребта, представляющего собой горноскладчатое обрамление Сибирской платформы. Исследованием особенностей распределения и формирования подземного стока этой труднодоступной территории практически не занимались. В связи с необходимостью изучения гидрогеологических и инженерно-геологических условий Боксонского месторожде-

ния бокситов подземный сток был исследован на ограниченном участке в верховьях р. Ока [1]. Оценка величины подземного стока на региональном уровне путем его выделения на гидрографах рек проведена в работах [2–4]. На карте подземного стока территории СССР [2] на основе свойственной горным странам высотной поясности атмосферных осадков показано увеличение модуля подземного стока с высотой местности. В работах [3, 4] дается обратная зависимость модуля подземного стока от высоты, а решающая роль отводится многолетнемерзлым породам, способствующим развитию наледных явлений. Наиболее общие закономерности формирования подземного стока в горноскладчатых областях Байкальского региона рассматривались Б.И. Писарским [5] с выделением поясности подземного стока.

Целью данных исследований является количественное определение подземного стока центральной части Восточного Саяна с использованием методик, применимых к горноскладчатым обла-

стям [3, 5–9], и выявление основных особенностей его пространственного распределения и формирования.

Исследуемый район целиком находится на территории Алтае-Саянского нагорья в центральной части Восточного Саяна и включает среднее и верхнее течение р. Ока, Большая Белая, Урик, Ерма, Тагна, Зима и Кирей (бассейн р. Ангара), сток которых формируется главным образом за счет атмосферных осадков (рис. 1).

Реки отличаются невысоким половодьем, устойчивой летне-осенней и очень низкой зимней меженью. На наиболее крупных реках в течение года наблюдаются два паводка – весенний и летний, последний более значительный и приходится на июль-август. Ледовый покров

устанавливается с начала ноября по конец апреля. Все мелкие реки перемерзают с образованием русловых наледей.

Основу геологического разреза исследуемой территории составляют сильно дислоцированные метаморфические породы архей-протерозоя. Они представлены мраморами, гнейсами и кристаллическими сланцами в нижней части разреза и метаморфическими сланцами, слагающими его верхнюю часть. Эти толщи прорваны гранитоидными интрузиями преимущественно палеозойского возраста. Большую перестройку территория претерпела в мезокайнозой, когда древнее основание было вовлечено в горообразовательные процессы, сопровождавшиеся базальтовым вулканизмом и накоплением осадков.



Рис. 1. Обзорная карта региона (штриховка с контуром – район исследований)
Fig. 1. Overview map of the region (research area is marked by hatching)

Широкое развитие на исследуемой территории получили многолетнемерзлые породы. Для низкогогорья и среднегогорья характерно островное распространение многолетнемерзлых пород (мощность 10–30 м). Выше гипсометрической отметки 1800–1900 м развит сплошной слой многолетнемерзлых пород мощностью до 200 м и более [10], который препятствует инфильтрации атмосферных осадков и определяет большую роль наледного регулирования в этой зоне [11]. Образование наледей определяется не только суровыми климатическими условиями, наличием многолетней мерзлоты, но и достаточно высокими запасами подземных вод.

Основными областями формирования подземных вод являются горные массивы, а общее количество и площадное распределение атмосферных осадков, выпадающих в горах (800–1000 мм), более чем достаточно для формирования их ресурсов. Несмотря на значительную мощность многолетнемерзлых пород, по тектонически ослабленным зонам развиты талики, по которым происходит питание, движение и разгрузка подземных вод, особенно если это связано с наличием карбонатных отложений, благоприятствующих накоплению в них подземных вод.

Методы исследований

В настоящее время методы оценки подземного стока достаточно хорошо освещены в работах [6, 7, 12–15], однако для оценки подземного стока исследуемой территории имеющийся фактический материал позволяет применить только методы генетического расчленения гидрографа и гидрометрической съемки зимней межени. Использование меженных гидрометрических съемок актуально для количественной оценки подземного стока при отсутствии или ограниченных данных наблюдений за стоком рек [8]. Единичные замеры расходов воды в зимний меженный период произведены на 90 разовых

гидрометрических створах. В пределах Окинского плоскогорья (верховье р. Ока) зимняя гидрометрическая съемка была проведена в 2015–2016 гг. Меженные расходы притоков р. Ока в ее среднем течении (склоновая часть Восточного Саяна), Урик, Большая Белая, Тагна, Ерма определены в ходе авиадесантных работ в декабре 1990 г. Меженные расходы р. Кирей, Зима и их притоков определялись неоднократно в течение 1988–1990 гг. Бассейны рек из-за сложности геологического строения являются гетерогенными, поэтому створы размещались в устьях почти всех малых притоков и по возможности на главной реке для взаимного контроля каждого измеренного расхода совокупностью предшествующих измерений и выяснения мест притока подземных или поглощения речных вод.

При обработке результатов гидрометрических съемок основная задача заключается в трансформировании единичных расходов воды в среднее значение для данного месяца, года и многолетнее для получения расчетных характеристик [9]. В качестве рек-аналогов приняты основные дрены территории с достаточно длительными рядами наблюдений за речным стоком в замыкающих створах. В основу оценки подземного стока рек-аналогов положен метод генетического расчленения речного гидрографа [6], рассматривающий различные схемы дренирования реками водовмещающих пород. Процедуре расчленения и реконструкции подверглись более 200 фактических гидрографов, принадлежащих расчетным водосборам р. Ока – п. Сарам, р. Орлик – п. Орлик, р. Тисса – п. Балакта, р. Кирей – п. Уйгат, р. Зима – п. Зулумай, р. Тагна – п. Хор-Тагна, р. Большая Белая – п. Инга, р. Урик – п. Шанхар. Для учета изъятия части стока на наледообразование проведена реконструкция гидрографов рек в зимний период по экспоненциальному уравнению регрессии, предложенному Ж.В. Буссинеском для описания

интенсивности уменьшения дебита родников в периоды отсутствия питания подземных вод [8]:

$$Q = Q_0 e^{-at},$$

где $t = t_2 - t_1$ – период сработки запасов, с; Q – расход воды в период времени t , м³/с; a – коэффициент истощения, характеризующий скорость сработки запасов, с⁻¹. В начале кривой спада t равно нулю, Q будет равно Q_0 . Разница между теоретической кривой и реальным гидрографом за зимний период составляет потери речного стока на наледообразование. Анализ гидрографов рек в зимний период показывает, что на нисходящей ветви выделяется до трех самостоятельных участков. Подобный характер строения нисходящей ветви гидрографа выявлен при детальном исследовании стока сезонно-талого слоя малых горных рек бассейна р. Колыма [16, 17]. В результате этих исследований установлено, что формирование таких самостоятельных участков связано с различиями в условиях водоотдачи пород, слагающих верхнюю часть разреза бассейна. Направленный процесс уменьшения мощности сезонно-талого слоя в ноябре-декабре завершается его перемерзанием, и в дальнейшем реки питаются подмерзлотными и надмерзлотными водами таликовых зон. Например, в долине р. Боксон в аллювиальных отложениях есть участки, где сезонная и многолетняя мерзлота полностью не смыкается и надмерзлотные воды существуют в жидком виде круглый год [1, 11]. В устьевых частях крупных притоков и на самом магистральном водотоке авторами прослежено значительное развитие полыней в течение всего зимнего периода, что свидетельствует о существовании постоянных подрусловых таликов.

Для бассейнов рек, у которых отсутствуют наблюдения за стоком, потери на наледообразование определялись по эмпирической формуле В.В. Кравченко [18], предложенной для центральной части

Восточного Саяна в зависимости от площади и высоты водосбора:

$$h_{\Pi/F_{\Pi}} = h_{\Pi/F=5000} 0,6 \left(\frac{F_{\Pi}}{F_1} \right)^{0,06};$$

$$h_{\Pi/F=5000} = aH + b,$$

где $h_{\Pi/F_{\Pi}}$ – слой наледного стока при фактической площади водосбора, мм; $h_{\Pi/F=5000}$ – величина потерь стока, приведенная к площади водосбора 5000 км², мм; F_{Π} – фактическая площадь водосбора, км²; F_1 – единичная площадь, км²; H – средняя высота водосбора, м; a и b – районные параметры, равные для центральной части Восточного Саяна соответственно 0,005 и 2,3. Метод расчета потерь стока на образование речного льда и наледей основан на тесной связи между этой величиной и зимним речным стоком, выраженным в модульных коэффициентах. Проверочными расчетами установлено, что отличие в расчетах потерь речного стока на наледообразование, определенное по реконструкции гидрографа и по эмпирической формуле, составляет от 11 до 22 % и не превышает величины ошибки при гидрологических расчетах для горных рек.

Для приведения данных зимней гидрометрической съемки к годовым и многолетним значениям использованы переходные коэффициенты, установленные по соотношениям подземного стока периода выполнения съемок с общей величиной годового стока. Правомерность использования для расчетов многолетних значений подземного стока данных единичных измерений расходов воды и точность получаемых результатов обеспечиваются производством работ в периоды, когда речной сток сформирован практически целиком за счет подземных вод, то есть является генетически однородным. В качестве контрольного метода проверки результатов съемок служит последовательный расчет величин подземного стока в замыкающем створе, бассейн которого разбит гидрометрическими створами на отдельные участки. Сходи-

мость результатов расчета по замыкающему створу с расчетом средневзвешенных величин подземного стока, полученных по отдельным створам, служит критерием точности выполненных работ. Например, среднемноголетний подземный сток, определенный по разовому расходу зимнего речного стока для замыкающего створа р. Ока – п. Сарам, составил 45,5 м³/с, а суммарный подземный сток притоков р. Ока, полученный при помощи приводки эпизодических измерений к многолетним, равнялся 45,9 м³/с.

Высокая сходимость результатов, полученных по методу переходных коэффициентов, свидетельствует о приемлемой точности произведенных работ и применимости данного метода для исследуемой территории. Данные по подземному стоку, полученные для замыкающих горноскладчатую область створов, приведены в табл. 1.

Для выявления основных особенностей формирования и распределения подземного стока использован метод корреляционного анализа, с помощью

Таблица 1

**Величины модулей подземного стока
в пределах центральной части Восточного Саяна**

Table 1

**Values of underground runoff rates
within the central part of the Eastern Sayan**

Река – створ	Дата замера	Измеренный меженный расход Q, м ³ /с	Средне-много-летний меженный расход Q _{ср.мне.} , м ³ /с	Q _{ср.мне.} , налед-ный по эмпирической формуле, м ³ /с	Q _{ср.мне.} , налед-ный гидрограф, м ³ /с	Q _{ср.мне.} под-земный с поте-рями, м ³ /с	Сред-няя высота водо-сбора H, м	Пло-щадь водо-сбора, F, км ²	Мо-дуль под-зем-ного стока M, л/(с·км ²)
р. Ока – п. Сарам*	–	–	45,5	–	8,74	54,3	1970	18534	2,93
р. Зима – граница с платформой	17.12.1988	2,35	2,38	0,05	–	2,43	1004	484	5,03
р. Одай – граница с платформой	16.12.1990	0,78	0,76	0,02	–	0,78	993	138	5,62
р. Хор-Тагна – граница с платформой	14.12.1990	4,12	3,02	0,17	–	3,19	1282	753	4,24
р. Кирей – выше устья р. Ярма	17.12.1990	9,06	9,34	0,15	–	9,49	1232	978	9,70
р. Ярма – устье	17.12.1990	1,63	1,68	0,05	–	1,73	1078	394	4,39
р. Большая Белая – граница с платформой	15.12.1990	6,50	5,33	0,45	–	5,78	1440	2600	2,22
р. Ерма – устье	18.12.1990	3,83	3,18	0,08	–	3,26	1281	548	5,95
р. Урик – п. Шанхар	18.12.1990	8,77	6,46	0,71	–	7,17	1870	3230	2,22
Суммарный сток	–	–	77,6	10,5	–	88,1	–	–	–

Примечание. * – среднемноголетние данные по гидрографу речного стока.

Note. * – long-term average annual data by the river flow hydrograph.

которого определена степень взаимосвязи подземного стока и морфометрических, геолого-тектонических, климатических характеристик для 90 водосборов рек исследуемой территории. В качестве морфометрических признаков, характеризующих особенности строения речных бассейнов, русел рек и влияющих на подземный сток, согласно источнику [5] приняты: площадь речного водосбора (F , км²); средняя высота речного бассейна (H_6 , м); средняя отметка продольного профиля русла (H_p , м); средний уклон бассейна (I_6 , ‰); средний уклон реки (I_p , ‰); расстояние до наиболее удаленной точки бассейна (l , км); длина реки (L_p , км). Площади речных водосборов и длины реки сняты с топографических карт различного масштаба с помощью программного обеспечения QGIS. Средняя отметка продольного профиля речного русла снималась с графика продольного профиля, построенного на основе данных с топографических карт. Средняя высота и уклон речного бассейна рассчитывались методом средневзвешенного в пределах высотных поясов. Данные о высотах получены с цифровой модели рельефа SRTM [19]. Средний уклон русла реки представляет собой отношение падения реки, то есть разности высот наиболее удаленных точек, соответствующих истоку и устью, к соответствующей гидрографической длине реки. Оценка порядка водотоков произведена по общеизвестной классификации Р.Е. Хортон [20], согласно которой самые малые неразветвленные водотоки относятся к первому порядку, следующие, принимающие на себя потоки первого порядка, – ко второму и т. д. Главная река относится к высшему порядку, характеризующему одновременно порядок всей речной системы. Также в качестве морфологических признаков использовались следующие показатели горизонтального и вертикального расчленения рельефа: частота потоков (S , км⁻²), густота речной сети (D , км/км²);

мощность эрозионного вреза рек ($H_{вр}$, м); комплексный показатель расчленения рельефа (K). Мощность эрозионного вреза рек определяется как разность между средней высотой водосбора и средней отметкой продольного профиля речного русла. Комплексный показатель расчленения рельефа K представляет собой произведение удвоенной густоты речной сети на мощность эрозионного вреза рек и отражает в совокупности как горизонтальное, так и вертикальное расчленение рельефа речного бассейна [21]. Величины атмосферных осадков (X) сняты с соответствующих карт распределения среднегодовых осадков в бассейне р. Ангара. При оценке подземного стока в горно-складчатых и особенно тектонически активных областях, где преимущественно распространены плотные кристаллические породы, важное значение приобретает изучение трещиноватости водовмещающих пород. Главный параметр трещиноватости – степень раскрытости породы, под которой понимается выраженное в процентах отношение суммы произведений длин трещин на их зияние (среднее расстояние между стенками трещин) к исследуемой площади. В тех случаях, когда надежные данные о зиянии отсутствуют, рекомендуется определять коэффициент трещиноватости ($K_{тр}$, км/км²) как отношение суммарной длины трещин в пределах исследуемого участка к его площади [22]. Приближенно коэффициент трещиноватости можно вычислить как частное от деления суммарной длины разломов к площади водосбора. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2.

Результаты исследований и их обсуждение

В целом подземный сток центральной части Восточного Саяна в пределах горноскладчатой области, оцененный методом генетического расчленения гидрографа с учетом наледообразования, составляет 88,1 м³/с при среднем значении

Таблица 2
Корреляционная матрица признаков формирования подземного стока
Table 2
Correlation matrix of underground runoff formation features

	F	H _б	H _р	I _б	I _р	l	L _р	N	S	D	H _{вр}	K	K _{тр}	X	M _{п.с.}
F	1	0,42	0,24	-0,02	-0,35	0,85	0,89	0,59	-0,23	-0,09	0,6	0,48	-0,1	-0,41	-0,14
H _б	0,42	1	0,94	0,15	-0,47	0,63	0,58	0,71	-0,42	-0,08	0,74	0,63	-0,32	-0,57	-0,12
H _р	0,24	0,94	1	0,02	-0,33	0,4	0,36	0,54	-0,41	-0,11	0,46	0,4	-0,36	-0,44	-0,06
I _б	-0,02	0,15	0,02	1	-0,07	0,09	0,06	0,17	0,17	0,56	0,33	0,51	0,12	-0,06	-0,1
I _р	-0,35	-0,47	-0,33	-0,07	1	-0,56	-0,53	-0,75	0,47	-0,11	-0,56	-0,5	-0,13	0,47	0,23
l	0,85	0,63	0,4	0,09	-0,56	1	0,95	0,78	-0,34	-0,1	0,83	0,62	-0,14	-0,53	-0,17
L _р	0,89	0,58	0,36	0,06	-0,53	0,95	1	0,75	-0,33	-0,11	0,78	0,58	-0,13	-0,49	-0,18
N	0,59	0,71	0,54	0,17	-0,75	0,78	0,75	1	-0,32	0,14	0,77	0,71	-0,12	-0,46	-0,14
S	-0,23	-0,42	-0,41	0,17	0,47	-0,34	-0,33	-0,32	1	0,37	-0,3	-0,1	0,05	0,26	0,03
D	-0,09	-0,08	-0,11	0,56	-0,11	-0,1	-0,11	0,14	0,37	1	0,03	0,49	0,2	0,05	-0,08
H _{вр}	0,6	0,74	0,46	0,33	-0,56	0,83	0,78	0,77	-0,3	0,03	1	0,83	-0,13	-0,58	-0,19
K	0,48	0,63	0,4	0,51	-0,5	0,62	0,58	0,71	-0,1	0,49	0,83	1	-0,07	-0,47	-0,15
K _{тр}	-0,1	-0,32	-0,36	0,12	-0,13	-0,14	-0,13	-0,12	0,05	0,2	-0,13	-0,07	1	-0,04	-0,18
X	-0,41	-0,57	-0,44	-0,06	0,47	-0,53	-0,49	-0,46	0,26	0,05	-0,58	-0,47	-0,04	1	0,54
M _{п.с.}	-0,14	-0,12	-0,06	-0,1	0,23	-0,17	-0,18	-0,14	0,03	-0,08	-0,19	-0,15	-0,18	0,54	1

модуля 3,19 л/(с·км²), потери подземного стока на наледообразование – 10,5 м³/с (см. табл. 1). Подземный сток выражен величиной модуля стока, который имеет дискретный характер пространственного распределения и изменяется в широких пределах (0,5–25 л/(с·км²)), в связи с этим он отображен на карте по площадному принципу (рис. 2).

Анализ корреляционной матрицы признаков показал отсутствие какого-либо одного ведущего фактора в формировании подземного стока на всей территории, но корреляционные зависимости, построенные для отдельных бассейнов, и карта распределения модуля подземного стока позволили выявить зависимость модуля подземного стока от высоты местности. Эта закономерность не является единой для всей территории и для различных бассейнов рек носит разнонаправленный характер. В бассейнах р. Кирей и Зима наблюдается увеличение модуля подземного стока с высотой водосбора от 1–2 л/(с·км²) в предгорьях до 14–25 л/(с·км²) в водораздельных частях Шитского хребта (рис. 3).

Эта особенность хорошо согласуется с ведущими факторами формирования подземного стока. Здесь в пределах массива с высотой местности отмечается увеличение количества атмосферных осадков, возрастает интенсивность экзогенных процессов – увеличивается глубина и скорость процессов выветривания, а следовательно, возрастает мощность трещиноватой зоны и улучшаются ее коллекторские свойства. Вполне вероятно, что высокие модули подземного стока связаны с наличием большого количества озер в истоках р. Кирей и Ярма. Сами реки в верховьях пересекают до двух-трех проточных озер, накапливая речной сток в период паводков, и обеспечивают формирование очень высоких значений модульных характеристик в зимнюю межень. В смежном бассейне р. Зима, где на тех же высотных отметках отсутствуют верховые озера, модуль подземного стока в полтора-два раза ниже. В бассейнах р. Ока, Большая Белая наблюдается обратная зависимость модуля подземного стока с высотой, связанная в первую очередь с ландшафтно-

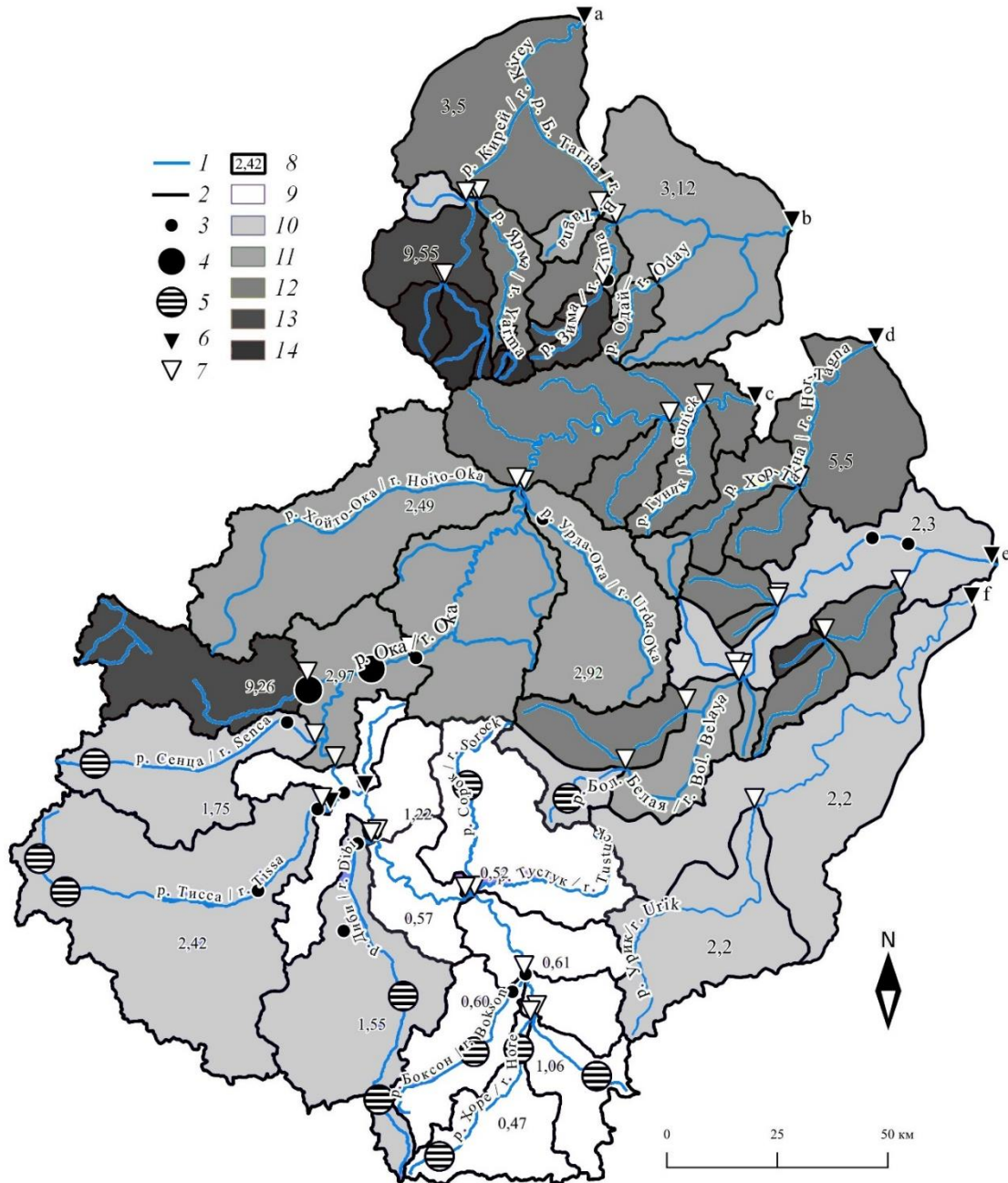


Рис. 2. Карта распределения модуля подземного стока центральной части Восточного Саяна:

1 – реки; 2 – границы речных водосборов; 3, 4 – участки наибольшего развития полыней (по источнику [11] с дополнениями авторов): 3 – длиной от 1 до 2 км, 4 – длиной более 5 км; 5 – участки развития крупных наледей; 6 – разовый гидрометрический створ; 7 – стационарный гидрологический пост: а – Уйгат, б – Зулумай, с – Сарам, d – Хор – Тагна, e – Инга, f – Шанхар; 8 – величина модуля подземного стока, л/(с·км²): 9 – от 0,5 до 1,5 – низкий, 10 – от 1,5 до 2,5 – средний, 11 – от 2,5 до 3,5 – высокий, 12 – от 3,5 до 6,5 – весьма высокий, 13 – от 6,5 до 10 – исключительно высокий, 14 – более 10 – высочайший

Fig. 2. Distribution map of the rate of the underground runoff of the central part of the Eastern Sayan:

1 – rivers; 2 – boundaries of river drainage; 3, 4 – sites of the greatest development of polynya holes (according to [11] with the additions of the authors): 3 – from 1 to 2 km long, 4 – more than 5 km long; 5 – areas of large icing development; 6 – disposable channel control; 7 – permanent hydrological station: a – Uigat, b – Zulumai, c – Saram, d – Khor – Tagna, e – Inga, f – Shankhar; 8 – underground runoff rate, l/(s·km²): 9 – from 0.5 to 1.5 – low, 10 – from 1.5 to 2.5 – medium, 11 – from 2.5 to 3.5 – high, 12 – from 3.5 to 6.5 – very high, 13 – from 6.5 to 10 – exceptionally high, 14 – more than 10 – the highest

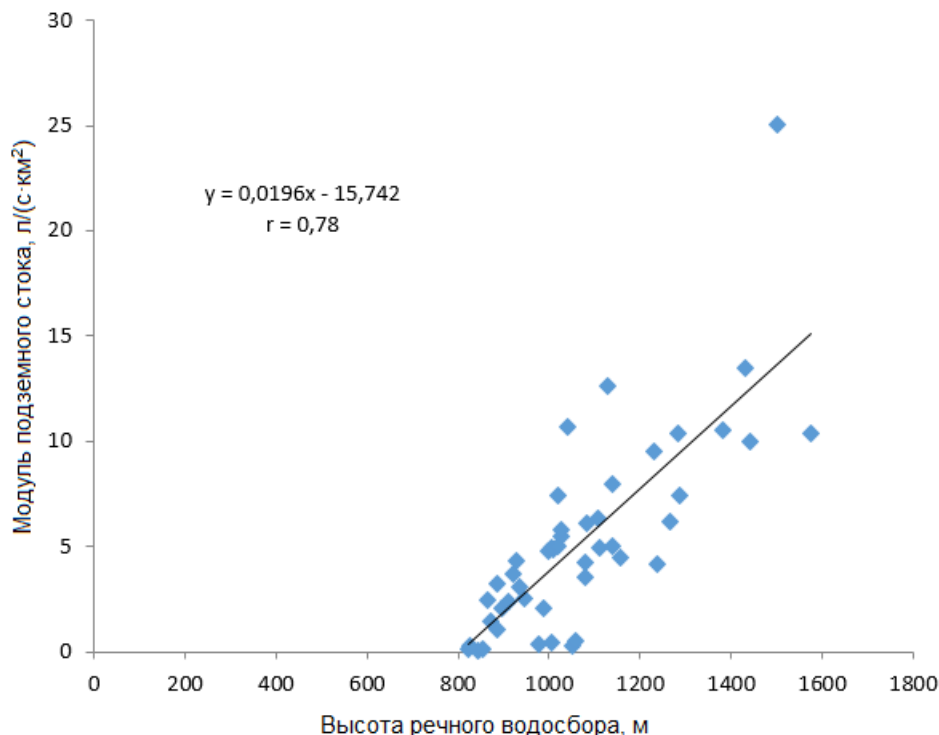


Рис. 3. График связи модуля подземного стока с высотой водосбора для р. Кирей и Белая Зима
Fig. 3. Graph of the underground runoff rate relationship with the drainage height of the Kirei and Belaya Zima rivers

климатическими условиями. Расположенное в верховьях этих рек Окинское плато является для них естественным водосбором. Со всех сторон оно окружено горными цепями, препятствующими проникновению влагонесущих масс, поэтому на этой территории атмосферных осадков выпадает в полтора раза меньше, чем на остальной. Низкие фильтрационные характеристики пород благоприятствуют более активному развитию многолетнемерзлых пород, служащих водупорным экраном. Уменьшение объема подземного стока происходит и в результате его аккумуляции в процессе наледообразования. В пределах гидрогеологического массива подземный сток в реки формируется за счет трещинно-грунтовых подземных вод зоны экзогенной трещиноватости и трещинно-жильных вод обводненных разломов. Особенности развития гидрогеологических условий приводят к тому, что при высокой расчле-

ненности рельефа размеры площади водосбора не всегда являются ведущим показателем глубины дренирования. Поэтому здесь не проявляется связь модуля подземного стока с площадью водосбора и не выделяются критические площади, при которых происходит стабилизация подземного стока. Эта зависимость указывает на следующую особенность распределения подземного стока. С одной стороны, в склоновой части подземный сток приурочен к малым водосборам. Хорошее развитие речной сети (среднее значение густоты речной сети $D = 0,6$, частоты потоков $S = 0,27$) и глубокие эрозионные врезы русла рек ($H_{вр} > 150$ м) на малых водосборах до 200–300 км² обеспечивают благоприятные условия разгрузки подземных вод и высокий темп водообмена. Подземный сток реализуется в русловую сеть в основной массе на площади до 300 км² в 60 % изученных бассейнов, редко до 500–600 км².

С другой стороны, она наглядно демонстрирует роль гидрогеологических условий водосборов в формировании подземного стока различных бассейнов, близких по площади. Таким образом, следующей особенностью формирования подземного стока является зависимость от литологических особенностей и геологоструктурных условий. Отмечается увеличение модуля подземного стока с появлением в составе пород карбонатных разностей, как правило, в различной степени закарстованных и обладающих более высокими фильтрационными свойствами. Так, появление в разрезе осадочно-метаморфических образований нижнего протерозоя карбонатных пород вызывает увеличение модуля подземного стока с 1,5–2 до 5 л/(с·км²) и выше при одинаковом увлажнении и схожих морфометрических характеристиках бассейнов. Повышенные величины модуля подземного стока до 10 л/(с·км²) и более в бассейне р. Кирей и Ярма приурочены к гранитоидам Саянского интрузивного комплекса. Возможно, экзогенная трещиноватость гранитоидов, слагающих горный массив, выше в сравнении с гнейсами и кристаллосланцами метаморфогенных комплексов Урикско-Ийского прогиба. Тектоническая раздробленность метаморфических пород, наоборот, превосходит таковую в гранитоидах в верховьях р. Кирей и Ярма, где закартированы единичные зоны нарушений ($K_{тр} = 0,01–0,17$), однако здесь на фоне интенсивного неотектонического воздымания основным фактором рельефообразования явилась ледниковая деятельность. С большой долей вероятности высокий подземный сток обеспечен наличием многочисленных озер (более 150) в истоках р. Кирей и Ярма и крупноглыбовых морен в долинах этих рек, служащих хорошим коллектором для подземных вод. Однако и это не является достаточным условием для накопления

подземных вод в гранитоидах Саянского интрузивного комплекса. Вполне возможно, что высокая относительная величина подземного питания обусловлена несовпадением поверхностного и подземного водосборов, но, к сожалению, на данном этапе исследований невозможно указать действительные границы и размеры подземного водосбора. Поэтому весь учтенный подземный сток относился только к тому малому водосбору или его части на замыкающем створе, для которого он был определен.

Заключение

Использованные для исследований методики позволили определить средне-многолетние величины подземного стока, морфометрические характеристики для 90 бассейнов рек и выявить основные особенности его формирования и распределения, связанные с геологоструктурными и гидрогеологическими условиями исследуемой территории. Подземный сток в среднемноголетнем разрезе составил 88,1 м³/с при среднем модуле 3,19 л/(с·км²). Распределение подземного стока центральной части Восточного Саяна носит дискретный характер, на фоне которого достаточно отчетливо проявляются определенные закономерности: изменение модуля подземного стока с высотой бассейна, влияние количества атмосферных осадков на величину подземного стока, независимость относительной величины подземного стока от площади водосбора. Эти зависимости подземного стока отражают общую направленность процесса на региональном уровне. Подземный сток частных водосборов определяется главным образом их гидрогеологическими условиями, связанными с особенностями геологоструктурного строения, литологического состава пород, морфологии и климата, то есть с основными факторами формирования подземных вод региона.

Библиографический список

1. Скворцов Г.Г. Мерзлотно-гидрогеологические условия южной части Восточных Саян в связи с проблемой рудничного строительства // *Материалы по подземным водам Восточной Сибири*. Иркутск: Вост.-Сиб. филиал АН СССР, 1957. С. 164–171.
2. Подземный сток на территории СССР / под ред. Б.И. Куделина. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1966. 301 с.
3. Естественные ресурсы подземных вод юга Восточной Сибири / отв ред. И.С. Зекцер. Новосибирск: Наука, 1976. 128 с.
4. Евстигнеев В.М., Шайбонов Б.Б. Географические закономерности низкого зимнего стока рек Бурятии // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 1994. № 5. С. 74–79.
5. Писарский Б.И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал. Новосибирск: Наука, 1987. 157 с.
6. Куделин Б.И. Принципы региональной оценки естественных ресурсов подземных вод. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1960. 343 с.
7. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 523. P. 636–649.
8. Соколов Б.Л., Саркисян В.О. Подземное питание горных рек. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 240 с.
9. Ратнер Н.С. К расчету подземного притока в реки по данным единичных расходов воды // *Труды Государственного гидрологического института*. 1977. Вып. 240. С. 55–71.
10. Орешкин И.И. Вечная мерзлота на Ботогольском гольце в Восточных Саянах // *Землеведение*. 1935. Т. 37. Вып. 1. С. 83–97.
11. Зонов Б.В., Шульгин М.Ф. Гидрология рек бассейна Братского водохранилища. М.: Наука, 1966. 169 с.
12. Попов О.В. Подземное питание рек. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 291 с.
13. Боровский Б.В., Марков М.Л. Является ли меженный расход рек мерой питания подземных вод или общего подземного стока? // *Разведка и охрана недр*. 2014. № 5. С. 10–16.
14. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. 331 p.
15. M.P. Miller, H.M. Johnson, D.D. Susong, D.M. Wolock. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches // *Journal of Hydrology*. 2015. Vol. 522. P. 203–210.
16. Глотова Л.П., Глотов В.Е. Роль подземных вод в общем стоке малых горных рек бассейна реки Колыма // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. С. 2321–2324.
17. Ushakov M.V. Laws Depletion Streamflow in Basin Kolyma in Winter Lowest Water Level // *Emerging Patterns, Breakthroughs and Challenges: 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology*. Rennes, 2013. P. 15.
18. Кравченко В.В. Роль наледей в формировании зимнего речного стока и ледяного покрова рек западной части зоны БАМа // *Труды Государственного гидрологического института*. 1986. Вып. 312. С. 34–84.
19. SRTM Data. CGIAR – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) // SRTM 90m DEM Digital Elevation Database [Электронный ресурс]. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (01.09.2018).
20. Хортон Р. Е. Эрозионное строение рек и водосборных бассейнов. М.: Издательство иностранной литературы, 1948. 159 с.
21. Многомерный анализ гидрогеологических систем горноскладчатых областей / отв. ред. И.С. Ломоносов. Новосибирск: Наука, 1986. 109 с.
22. Писарский Б.И., Шерман С.И. Параметры трещиноватости и их значение при гидрогеологических исследованиях // *Формирование и геохимия подземных вод Сибири и Дальнего Востока*. М.: Наука, 1967. С. 25–29.

References

1. Skvortsov G.G. *Merzlotno-gidrogeologicheskie usloviya yuzhnoi chasti Vostochnykh Sayan v svyazi s problemoi rudnichogo stroitel'stva* [Permafrost-hydrogeological conditions of the southern part of The Eastern Sayan in terms of mine construction]. *Materialy po podzemnym vodam Vostochnoi Sibiri* [Materials on the groundwater of Eastern Siberia]. Irkutsk: The East-Siberian branch of the USSR Academy of Sciences Publ., 1957, pp. 164–171. (In Russ.).
2. Kudelin B.I. *Podzemnyi stok na territorii SSSR* [Groundwater runoff in the USSR]. Moscow: Moscow University Publ., 1966, 301 p. (In Russian).
3. Zektser I.S. *Estestvennye resursy podzemnykh vod yuga Vostochnoi Sibiri* [Natural resources of groundwater in the south of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1976, 128 p. (In Russ.).
4. Evstigneev V.M., Shaibonov B.B. Geographic patterns of low winter flow of rivers in Buryatia.

Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya [Moscow University Bulletin. Series 5: Geography], 1994, no. 5, pp. 74–79. (In Russ.).

5. Pisarskii B.I. *Zakonomernosti formirovaniya podzemnogo stoka basseina ozera Baikal* [Formation patterns of the underground runoff of the lake Baikal basin]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987, 157 p. (In Russ.).

6. Kudelin B.I. *Printsipy regional'noi otsenki estestvennykh resursov podzemnykh vod* [Principles of regional groundwater resource assessment]. Moscow: Moscow University Publ., 1960, 343 p. (In Russ.).

7. Mei Y., Anagnostou E.N. A hydrograph separation method based on information from rainfall and runoff records. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 523, pp. 636–649.

8. Sokolov B.L., Sarkisyan V.O. *Podzemnoe pitanie gornyykh rek* [Underground intake of mountain rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1981, 240 p. (In Russ.).

9. Ratner N.S. To calculation of river underground inflow according to the unit cost of water. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1977, iss. 240, pp. 55–71. (In Russ.).

10. Oreshkin I.I. Permafrost on Botogolsky bald mountain in the Eastern Sayan. *Zemlevedenie* [Earth Sciences], 1935, vol. 37, iss. 1, pp. 83–97. (In Russ.).

11. Zonov B.V., Shul'gin M.F. *Gidrologiya rek basseina Bratskogo vodokhranilishcha* [Hydrology of Bratsk reservoir basin rivers]. Moscow: Nauka Publ., 1966, 169 p. (In Russ.).

12. Popov O.V. *Podzemnoe pitanie rek* [Underground intake of rivers], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1968, 291 p. (In Russ.).

13. Borevskii B.V., Markov M.L. Is river low-water flow a measure contributing to underground water or common underground water inflow? *Razvedka i okhrana nedr* [Prospect and Protection of Mineral Resources], 2014, no. 5, pp. 10–16. (In Russ.).

14. Hendriks M.R. *Introduction to Physical Hydrology*. Oxford; New York: Oxford University Press, 2010, 331 p.

15. M.P. Miller, H.M. Johnson, D.D. Susong, D.M. Wolock. A new approach for continuous estimation of baseflow using discrete water quality data: Method description and comparison with baseflow estimates from two existing approaches. *Journal of Hydrology*, 2015, vol. 522, pp. 203–210.

16. Glotova L.P., Glotov V.E. Role of underground waters in the common drain of small mountain rivers at Kolyma river basin. *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, vol. 14, pp. 2321–2324. (In Russ.).

17. Ushakov M.V. Laws Depletion Streamflow in Basin Kolyma in Winter Lowest Water Level. *Emerging Patterns, Breakthroughs and Challenges: 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology*. Rennes, 2013, p. 15.

18. Kravchenko V.V. The role of icing in the formation of winter river runoff and ice cover of rivers in the Western part of the Baikal-Amur mainline zone. *Trudy Gosudarstvennogo gidrologicheskogo instituta* [Proceedings of the State Hydrological Institute], 1986, iss. 312, pp. 34–84. (In Russ.).

19. SRTM Data. CGIAR – Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI). SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. Available at: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/> (accessed 1 September 2018).

20. Horton R. E. *Eroziionnoe stroenie rek i vodosbornyykh basseinov* [Erosional structure of rivers and drainage basins]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury Publ., 1948, 159 p. (In Russ.).

21. Lomonosov I.S. *Mnogomernyi analiz gidrogeologicheskikh sistem gomoskladchatykh oblastei* [Multivariate analysis of hydrogeological systems of folded areas]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 109 p. (In Russ.).

22. Pisarskii B. I., Sherman S. I. *Parametry treshchinovatosti i ikh znachenie pri gidrogeologicheskikh issledovaniyakh* [Fracture parameters and their importance in hydrogeological studies]. *Formirovanie i geokhimiya podzemnykh vod Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Groundwater Formation and Geochemistry in Siberia and the Far East]. Moscow: Nauka Publ., 1967, pp. 25–29. (In Russ.).

Критерии авторства

Бадминов П.С., Павлов С.Х., Дмитриев-Добровольский В.Е., Оргильянов А.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Prokopii S. Badminov, Sergey Kh. Pavlov, Vladislav E. Dmitriev-Dobrovolsky, Aleksey I. Orgilianov have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Информация об авторах

Бадминов Прокопий Сократович, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: prokop_sbad@mail.ru*

Павлов Сергей Харитонович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: spavlov@crust.irk.ru*

Дмитриев-Добровольский Владислав Евгеньевич, магистрант Иркутского государственного университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: vladis.box@yandex.ru*

Оргильянов Алексей Июльевич, ведущий инженер лаборатории гидрогеологии Института земной коры СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: irig@crust.irk.ru*

Information about the authors

Prokopii S. Badminov, Leading Engineer of the Hydrology Laboratory of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: prokop_sbad@mail.ru*

Sergey Kh. Pavlov, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Senior Researcher of the Hydrology Laboratory of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: spavlov@crust.irk.ru*

Vladislav E. Dmitriev-Dobrovolsky, Master's Degree Student of Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: vladis.box@yandex.ru*

Aleksey I. Orgilianov, Leading Engineer of the Hydrology Laboratory of the Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: irig@crust.irk.ru*

Оригинальная статья / Original article

УДК 624.131.439

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-41-54>

Сравнительный анализ методов определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов Непско-Ботубинской антеклизы

© Н.Л. Кузнецов, И.И. Верхозин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: В статье предлагается рассмотреть сравнение прямого и расчетного методов определения прочности на примере крупнообломочных грунтов, характерных для южных и центральных районов Непско-Ботубинской антеклизы, с территорией которой связана активная разработка нефтегазоконденсатных месторождений. В данной работе приведены основные методы определения прочности крупнообломочных грунтов и факторы, определяющие характеристики прочности. Для оценки прочности крупнообломочного грунта использовались прямой – метод прямого сдвига (одноплоскостной срез) по ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости» – и расчетный метод – «Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватым и глинистым грунтам с крупнообломочными включениями», разработанная Дальневосточным научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом по строительству (ДальНИИС). Испытания проводились для двух разновидностей элювиально-делювиального грунта: проба А – щебенистый грунт, проба В – щебенистый суглинок. В результате для типовых элювиально-делювиальных грунтов, распространенных в рассматриваемом регионе, прямым и расчетным методами получены показатели сцепления и угла внутреннего трения. Проведено сравнение полученных результатов. Для щебенистых грунтов расхождение значений сцепления и угла внутреннего трения, полученных прямым и расчетным методами, существенно, чем для щебенистых суглинков. Приведены данные исследований характеристик прецизионности метода плоского (прямого) среза. Значение сцепления и угла внутреннего трения, вычисленные по результатам прямого метода, соответствуют теоретическим представлениям о природе прочности грунта. Расхождения результатов прямого и расчетного методов определения прочности сопоставимы с характеристиками воспроизводимости прямого метода. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем, разработанная ДальНИИС, на данный момент является основной в нашей стране для получения параметров прочности, которые используются для окончательных расчетов прочности массивов крупнообломочных грунтов оснований зданий и сооружений II и III классов.

Ключевые слова: Непско-Ботубинская антеклиза, крупнообломочные грунты, характеристики прочности грунта

Информация о статье: Дата поступления 10 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Кузнецов Н.Л., Верхозин И.И. Сравнительный анализ методов определения прочностных свойств крупнообломочных грунтов Непско-Ботубинской антеклизы. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 41–54. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-41-54.

Comparative analysis of determination methods of Nepa-Botuoba antecline coarse soil strength properties

© Nikita L. Kuznetsov, Ivan I. Verkhosin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT: The article compares direct and computational methods of strength determination on example of coarse soil characteristic of the southern and central areas of the Nepa-Botuoba antecline, the territory of which is

associated with the active development of oil and gas condensate fields. The paper presents the main methods for coarse soil strength estimation as well as the factors that determine strength characteristics. The method of shear strength (in-plane shear) according to GOST 20276-2012 "Soils. Field methods for determining strength and compressibility characteristics" and the computational method "Methods for assessing the strength and compressibility of coarse clastic soils with silt and clay aggregate and silty and loamy soils with coarse grain inclusions" developed at the Far Eastern Research, Design and Technological Construction Institute (FERDTCI) is used to assess the strength of coarse soil. Two types of eluvial-deluvial soil were tested: sample A – silty coarse soil, sample B – coarse silty loam. Using direct and computational methods the indicators of cohesion and internal friction angle are obtained for typical eluvial-deluvial soils distributed in the region under consideration. Comparison is given to the results received. Silty coarse soils are characterized by greater divergence in the values of cohesion and internal friction angle obtained by direct and computational methods than coarse silty loams. The article provides the data on the study of the precision characteristics of the direct shear test method. The value of cohesion and internal friction angle calculated by the direct shear test correspond to the theoretical concepts of the nature of soil strength. The differences between the results of the direct and computational methods of strength determination are comparable with the reproducibility characteristics of the direct method. The methods of assessing the strength and compressibility of coarse clastic soils with silt and clay aggregate developed at FERDTCI are today the main ones in our country for obtaining the strength parameters used for final calculations of strength of coarse clastic soil massifs in the foundation of buildings and structures of II and III classes.

Keywords: Nepa-Botuoba anteklise, coarse soil, strength characteristics of soil

Information about the article: Received December 10, 2018; accepted for publication February 20, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Kuznetsova N.L., Verhozin I.I. Comparative analysis of determination methods of Nepa-Botuoba anteklise coarse soil strength properties. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 41–54. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-41-54.

Введение

Развитие и освоение нефтегазоконденсатных месторождений Восточной Сибири предопределяет активное строительство комплекса сооружений производственной инфраструктуры. Для добычи, подготовки, транспортировки и переработки нефти и газа строятся инженерные сооружения с различными конструктивными и эксплуатационными особенностями. К ним относятся дожимные насосные и компрессорные станции, установки подготовки нефти и газа, энергоустановки, резервуары хранения сырья, трубопроводы, линии электропередач и другие объекты, без которых не сможет эффективно функционировать современный промысел углеводородного сырья. Надежность, долговечность, а также безаварийная работа любых сооружений во многом зависят не только от условий их эксплуатации, но и от качества строительных работ и проекти-

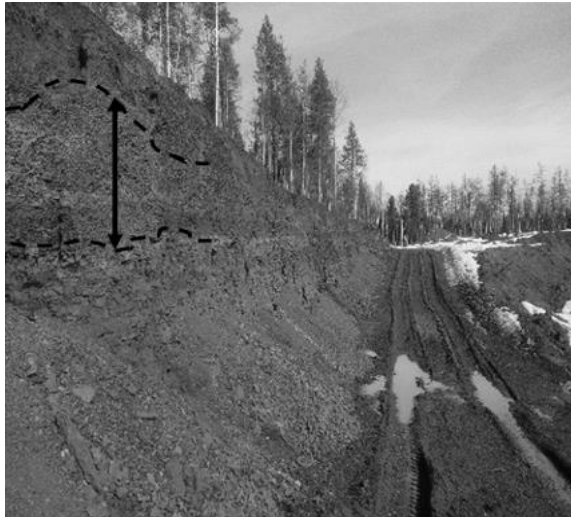
рования, которые базируются на инженерно-геологической информации. Материалы инженерных изысканий (инженерно-геологические разрезы, показатели физико-механических свойств грунтов площадок строительства, уровень залегания грунтовых вод) позволяют подобрать для проектируемых сооружений оптимальные виды и материалы фундаментов, глубину их заложения и конструктивные особенности. Качество инженерно-геологических изысканий определяется рационально подобранными видами и объемами инженерно-геологических работ, опробованием, оптимальным сочетанием методов полевых и лабораторных исследований и методиками их выполнения. В данной работе предлагается рассмотреть сравнение прямого и расчетного методов определения прочности крупнообломочных грунтов, характерных для южных и центральных районов Непско-Ботубинской антеклизы,

на которой расположено более двух десятков нефтегазоконденсатных месторождений [1]. Административно Непско-Ботуобинская антеклиза расположена на севере Иркутской области и в южной части республики Саха (Якутия), ее геологическое строение и строение прилегающих геологических структур описано в ряде опубликованных работ [2–4 и др.].

Крупнообломочные грунты являются одними из наиболее часто встречающихся дисперсных образований на территории Непско-Ботуобинской антеклизы. К самому распространенному генетическому типу крупнообломочных грунтов относятся элювиально-делювиальные и элювиальные щебенистые, реже дресвяные грунты и щебенистые суглинки, которые в виде маломощных покровов развиты практически на всей рассматриваемой территории. Их образование связано главным образом с процессами физического выветривания коренных пород. В пределах кор выветривания

зона перехода сильнотрещиноватых материнских пород в элювиально-делювиальные крупнообломочные грунты, как правило, плохо идентифицируется (рис. 1, а). В пределах пологих водоразделов мощность данных образований составляет первые метры, на бортах долин рек и ручьев достигает 3–8 м.

Состав и свойства элювиально-делювиальных грунтов и щебенистых суглинков главным образом определяются характеристиками подстилающих коренных пород, а также крутизной склона, где формируются рассматриваемые отложения. Слаболитифицированные алевролиты и аргиллиты Чайкинской свиты Юрского возраста в результате процессов выветривания переходят в щебенистые суглинки (рис. 1, b), прочные песчаники Усть-Кутской свиты нижнего Ордовика на первых этапах выветривания разрушаются до глыбового грунта с глинистым заполнителем.



a



b

Рис. 1. Зона элювиально-делювиального грунта:
a – в разрезе пород Мангазейского яруса среднего и верхнего ордовика Макаровской свиты;
b – в разрезе пород юрского возраста Чайкинской свиты

Fig. 1. Zone of the eluvial-deluvial soil:
a – in the section of Mangaseian age rocks of the middle and upper Ordovician of the Makarovskaya suite;
b – in the section of Jurassic age rocks of Chaikinskaya suite

Методы исследования

Прочность является одной из важнейших механических характеристик грунтов и горных пород, участвующих в расчете устойчивости грунтовых массивов. Прочность – это свойство материала сопротивляться разрушению под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил. Она определяется как максимальное усилие, при котором происходит разрушение материала. Общеизвестно, что для дисперсных грунтов эта характеристика зависит от сил сцепления, обусловленных водно-коллоидными и цементационными связями между частицами грунта и внутреннего трения, представляющего силы механического взаимодействия между частицами, которые возникают при приложении к объему грунта нормальных напряжений. Нормальными называются напряжения, перпендикулярные по своей направленности к разрушающей (касательной) нагрузке и вызванные напряжением грунтового массива от вышележащих толщ, сооружений и т. д. Прочность дисперсных грунтов описывается уравнением Кулона-Мора, которое имеет вид:

$$\tau = tg(\varphi)\sigma + c, \quad (1)$$

где τ – величина касательных напряжений; φ – угол внутреннего трения ($tg\varphi$ – коэффициент внутреннего трения); σ – величина нормальных напряжений; c – сцепление [2].

Прочность крупнообломочного грунта зависит от:

- гранулометрического (зернового) состава грунта;
- прочности обломков;
- степени окатанности обломков;
- степени глинистости;
- консистенции (показатель текучести) пылевато-глинистого заполнителя;
- плотности грунта [5, 6].

В отличие от других подвидов дисперсных грунтов, характеристики прочности которых определяются по результатам лабораторных исследований образцов малых размеров на стандартном испытательном оборудовании, определение прочности крупнообломочных грунтов производится на крупногабаритных образцах, размер которых должен в пять раз превышать максимальный размер обломков¹. Кроме того, отбор представительных образцов ненарушенного сложения крупнообломочных грунтов и грунтов с крупнообломочными включениями из горных выработок современными техническими средствами представляет весьма сложную задачу. Поэтому основными методами для определения прочности крупнообломочных грунтов являются [7, 8]:

– исследование сопротивления грунтов сдвигу в скважинах по методу вращательного среза [9];

– исследование сопротивления грунтов сдвигу методом выдавливания и раздавливания целиков грунта в горных выработках;

– метод плоского (прямого) сдвига для крупногабаритных образцов;

– испытание на прочность крупнообломочного грунта в условиях трехосного сжатия;

– испытания на сдвиг в скважине (Borehole Shear Tester), включающие внедрение в грунт двух противоположно расположенных штампов в стенке буровой скважины и их последующее выдергивание при помощи буровых штанг с использованием опорного устройства на поверхности грунта [10].

Кроме того, имеются научно обоснованные рекомендации по определению показателей прочности и деформируемости крупнообломочных грунтов по

¹ГОСТ 20276-2012. Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости. М.: Стандартинформ, 2013. 46 с. /

GOST 20276-2012. Soils. Field methods for determining strength and compressibility characteristics. Moscow: Standardinform Publ., 2013. 46 p.

их физическим характеристикам (гранулометрический состав, характеристика обломочного материала и заполнителя, плотность). Эти рекомендации основаны на исследованиях, проведенных в Дальневосточном научно-исследовательском, проектно-конструкторском и технологическом институте по строительству (ДальНИИС). Исследования были выполнены на модельных грунтах с использованием принципа стабилизации переменных на экспериментальных уровнях, и по их результатам установлено наличие весьма тесных связей физического эквивалента грунтов с их прочностными и деформационными параметрами. Также на сегодняшний день существуют более детальные исследования, характеризующие данные зависимости, например исследования влияния формы и размера крупнообломочного материала горных пород на характеристики их прочности, проведенные в Технологическом университете Тайюаня [11].

Ниже представлены результаты испытаний элювиально-делювиальных грунтов методом плоского (прямого) среза [12], а также сравнение этих результатов с параметрами прочности, полученными расчетным путем – с использованием «Методики оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанной ДальНИИС. Нормативные характеристики грунтов, определяемые в соответствии с данной методикой, допускается использовать для предварительных и окончательных расчетов оснований зданий и сооружений II и III классов. На данный момент в практике инженерных изысканий в Российской Федерации данная методика является основной для получения характеристик прочности крупнообломочных грунтов.

Характеристики прочности определялись для валовых проб щебенистого

грунта с суглинистым заполнителем (проба А) и щебенистого суглинка (проба В). Описание исследуемого грунта представлено ниже.

1. Проба А. В естественном залегании исследуемый материал представляет собой элювиально-делювиальный щебенистый грунт красно-бурой окраски, бутовой текстуры с суглинистым заполнителем твердой консистенции до 30–35 %. Обломочный материал представлен аргиллитом и алевролитом низкой, реже пониженной прочности. Щебень имеет лещадную форму, преимущественный размер обломков составляет 40–60 мм. Физические характеристики валовой пробы грунта, использованной для испытаний, представлены в табл. 1. Кумулятивная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 2. Коэффициент истираемости щебня составляет 0,33.

2. Проба В. В естественном залегании исследуемый материал представляет собой элювиально-делювиальный щебенистый суглинок твердой консистенции, фиолетово-серой окраски, бутовой, реже массивной текстуры. Обломочный материал представлен щебнем алевролита низкой прочности различных размеров, остроугольной, реже лещадной формы. Физические характеристики валовой пробы грунта, использованной для испытаний, представлены в табл. 1. Кумулятивная кривая гранулометрического состава представлена на рис. 2. Коэффициент истираемости щебня составляет 0,24.

Схожие по составу и свойствам элювиально-делювиальные крупнообломочные грунты имеют широкое распространение в пределах центральных и южных районов Непско-Ботуобинской антеклизы, слагая коры выветривания осадочных пород различного возраста.

Характеристики прочности для проб А и В опытным путем определялись по результатам среза подготовленного

Таблица 1

Физические характеристики исследуемого грунта

Table 1

Physical characteristics of the soil under investigation

Проба	W_L , %	W_p , %	I_p , %	$W_{общ}$, %	Плотность грунта, г/см ³			n , %	e , д.е.	S_r , д.е.
					P	P_d	P_s			
Проба А	18,2	11	7,2	7,4	2,1	1,96	2,7	27,58	0,381	0,525
Проба В	38,4	23,1	15,3	11,9	2,17	1,94	2,7	28,18	0,392	0,819

Примечание. W_L – влажность на границе текучести; W_p – влажность на границе раскатывания; I_p – число пластичности; $W_{общ}$ – природная влажность; P – природная плотность; P_d – плотность сухого грунта; P_s – плотность минеральной части грунта; n – пористость; e – коэффициент пористости; S_r – коэффициент водонасыщения.

Note. W_L – liquid limit; W_p – plasticity limit; I_p – plasticity index; $W_{общ}$ – natural moisture; P – natural soil density; P_d – dry soil density; P_s – soil solid part density; n – porosity; e – porosity ratio; S_r – water saturation ratio.

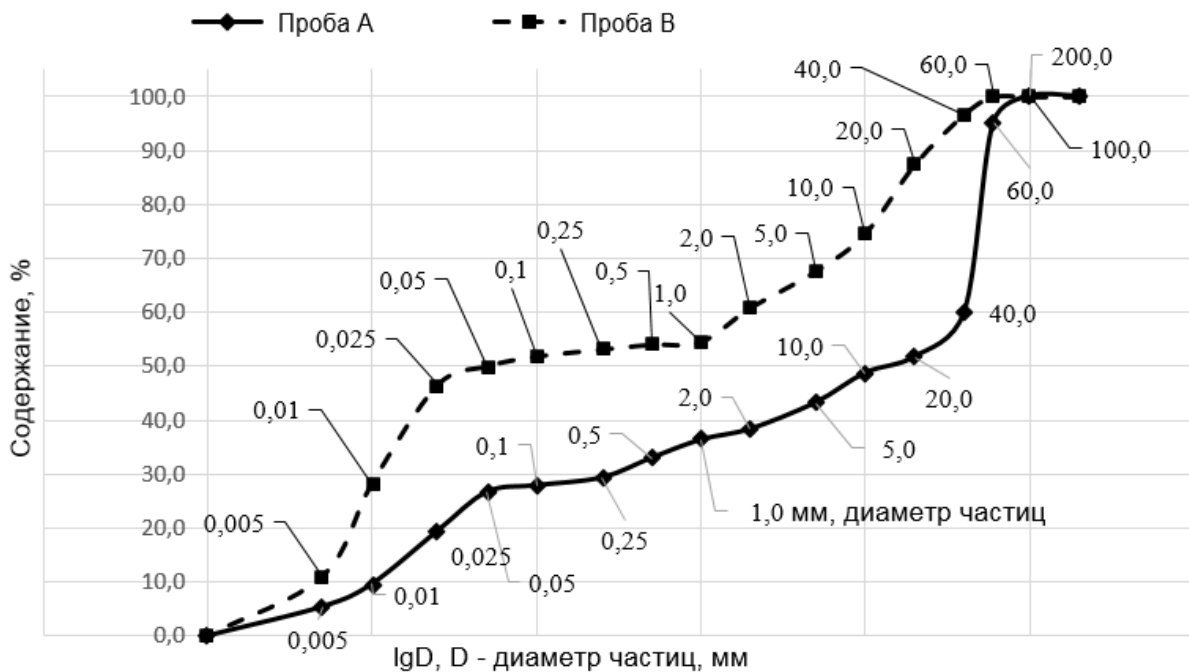


Рис. 2. Кумулятивные кривые гранулометрического состава
Fig. 2. Cumulative curves of granulometric composition

грунта по фиксированной плоскости касательной нагрузкой, при одновременном нагружении грунта нормальной уплотняющей нагрузкой. Испытания проводились в крупногабаритной срезной установке, обеспечивающей возможность передачи касательной и нормальной нагрузки на грунт с измерением деформаций уплотнения и среза.

Сопrotивление грунта срезу (сдвигу) определялось как предельное

среднее касательное напряжение, при котором целик грунта срезается по фиксированной плоскости при заданном нормальном давлении. Для определения значений сцепления и угла внутреннего трения для проб А и В проводилась серия из восемнадцати испытаний подготовленных целиков грунта с заданными плотностью и природной влажностью при шести различных значениях нормального уплотняющего давления.

Опытные испытания проводились по схеме консолидировано-дренированного среза со статическим режимом нагружения в соответствии с методикой, приведенной в ГОСТ 20276-2012 «Грунты. Методы полевого определения характеристик прочности и деформируемости».

В состав установки для испытания грунта на срез входит:

– срезная коробка диаметром 300 мм и высотой 220 мм;

– жесткий штамп диаметром 280 мм и высотой 15 мм;

– гидравлическая система создания и измерения срезной и нормальной нагрузки;

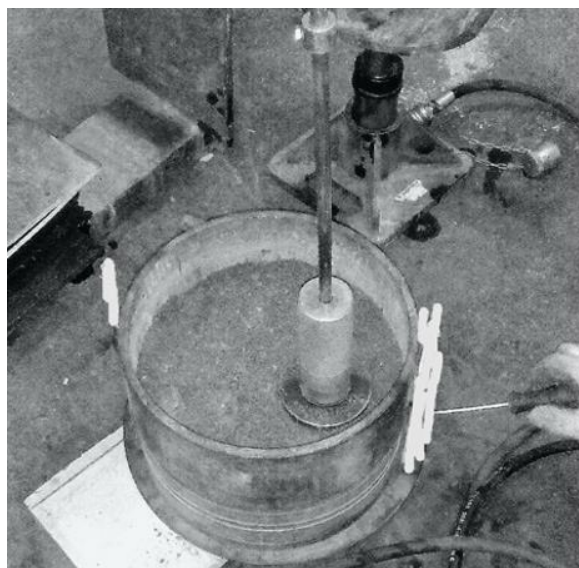
– система измерения деформаций уплотнения и деформаций среза (сдвига).

Формирование образцов для испытаний проводилось методом послойного

уплотнения грунта естественной влажности в срезной коробке прибора (рис 3, а), при этом щебень ориентировался в соответствии с природным сложением в массиве (рис. 3, b) и достигалась плотность, соответствующая природной.

Нормальное давление передавалось на подготовленный целик грунта последовательно ступенями Δp по 0,1 Мпа. Каждая ступень давления при предварительном уплотнении выдерживалась в течение 5 мин, конечная ступень выдерживалась до условной стабилизации деформации сжатия грунта.

После предварительного уплотнения в сдвиговой коробке срезного прибора устанавливался зазор в 3 см, по которому проходила плоскость среза, на подвижное кольцо обоймы устанавливались устройства для измерения деформаций среза.



a



b

Рис. 3. Элювиально-делювиальный грунт:
a – формирование целика из валовой пробы в срезной коробке;
b – обнажение щебенистого элювиально-делювиального грунта
Усть-Кутский район, правый берег р. Лены

Fig. 3. Eluvial-deluvial soil:
a – solid formation from the bulk sample in a shear box;
b – exposure of the silty coarse eluvial-deluvial soil
Ust-Kut region, right bank of the Lena river

Результаты

1. Прямой метод – метод одноплоскостного среза. Лабораторные испытания проводились при следующих значениях нормального уплотняющего давления: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 МПа. Предельные средние касательные напряжения для каждого значения нормальной уплотняющей нагрузки представлены в табл. 2, графическое отображение результатов испытаний представлено на рис. 4.

По результатам испытания получены следующие параметры прочности

элювиально-делювиальных грунтов:

– проба А: сцепление c – $0,0140 \pm 0,0099$ МПа; угол внутреннего трения φ – $36,0 \pm 2,1^\circ$;

– проба В: сцепление c – $0,0489 \pm 0,0104$ Мпа; угол внутреннего трения φ – $24,2 \pm 1,9^\circ$.

2. Расчетный метод – в соответствии с «Методикой оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями». Метод ДальНИИС.

Таблица 2
Результаты серии испытаний элювиально-делювиального грунта на плоский (прямой) сдвиг

Table 2

Results of series of direct shear stress tests for eluvial-deluvial soil

Нормальное уплотняющее давление, при котором прикладывалась касательная нагрузка, МПа	Предельное среднее касательное напряжение, при котором произошел срез (сдвиг), МПа		
	Проба А	Проба В	
0,1	0,07	0,09	
	0,09	0,09	
	0,095	0,095	
	0,09	0,1	
	0,08	0,105	
0,2	0,15	0,136	
		0,13	
		0,14	
		0,134	
		0,148	
		0,138	
0,3	0,22	0,18	
	0,235	0,19	
	0,25	0,18	
	0,235	0,196	
0,4	0,32	0,185	
		0,226	
0,5	0,31	0,222	
		0,34	–
		0,405	–
		0,37	–
		0,4	–
0,6	0,36	–	
		0,44	–

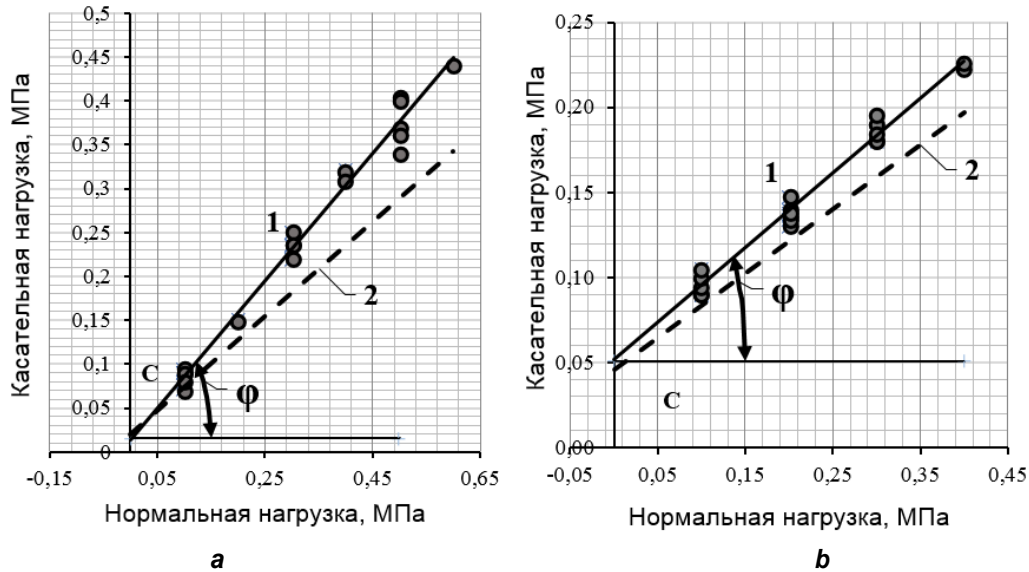


Рис. 4. Характеристики прочности элювиально-делювиального грунта

а – проба А; б – проба В

с – удельное сцепление; φ – угол внутреннего трения;
1 – прямой метод (сдвиг); 2 – расчетный метод

Fig. 4. Strength characteristics of eluvial-deluvial soil:

а – sample А; б – sample В

с – specific cohesion; φ – internal friction angle;
1 – direct method (shear); 2 – calculation method

Нормативные значения углов внутреннего трения крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем применительно к схеме консолидированного среза определяются по формуле (2):

$$\varphi = k_1 k_\varphi 46(0,3)^{M\tau}, \quad (2)$$

где k_1 – коэффициент на окатанность крупных обломков для угла внутреннего трения; k_φ – коэффициент, учитывающий прочность крупных обломков, зависящий от коэффициента истираемости; $M\tau$ – физический эквивалент грунта, определяемый по формуле (3):

$$M\tau = \frac{p_1}{p_2} I_p (1 + I_L), \quad (3)$$

где p_1 – содержание заполнителя в гранулометрическом составе грунта (частиц менее 2 мм), %; p_2 – содержание заполнителя в гранулометрическом составе грунта (крупных обломков – частиц крупнее 2 мм), %; I_p – число пластичности заполнителя, д.е.; I_L – показатель текучести заполнителя.

Нормативное значение удельного сцепления крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем применительно к схеме консолидированного среза определяется по формуле (4):

$$c = k_2 k_\rho 79 M\tau^{0.32} / (1 + I_L)^{3.62}, \quad (4)$$

где k_2 – коэффициент на окатанность крупных обломков для определения удельного сцепления; k_ρ – коэффициент, учитывающий плотность грунта, а также отличие фактического значения плотности грунта от его нормированного значения.

По результатам расчетов, проведенных по методике оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем, разработанной ДальНИИС, получены следующие параметры прочности элювиально-делювиального грунта:

- проба А: сцепление c – 0,0198 МПа; угол внутреннего трения φ – 28,3°;
- проба В: сцепление c – 0,046 МПа; угол внутреннего трения φ – 20,7°.

Таким образом, параметры прочности элювиально-делювиального грунта, полученные в результате испытаний на плоский срез (прямой метод), и параметры, рассчитанные с использованием зависимости механических и физических характеристик (метод ДальНИИС), имеют ряд отличий (табл. 3).

Для пробы А значения удельного сцепления и угла внутреннего трения, определенные различными методами, имеют схожие относительные отличия – 29,2 и 27,2 % соответственно. Однако, если рассматривать показатели сцепления, то полученные различными методами значения можно считать сопоставимыми, так как они входят в границы погрешности ее определения. Расхождение между показателями, полученными прямым и расчетным методами, составляет 0,0058 МПа, и оно входит в границы погрешности результатов испытаний, полученных прямым методом ($\pm 0,0099$ МПа). Различие в значениях угла внутреннего трения на 27,2 % является весьма существенным: так, значения прочности грунта при нормальной уплотняющей нагрузке 0,2 МПа, рассчитанные с использованием параметров прочности, определенных различными методами,

будут составлять 0,159 МПа для прямого метода и 0,127 МПа – для расчетного. Это, в свою очередь, может оказать весомое влияние при расчете устойчивости массива грунтов.

Для пробы В расхождения значений характеристик прочности, полученных прямым и расчетным методами, менее существенно и составляет: для удельного сцепления – 6,3 %, для угла внутреннего трения – 16,9 %. Здесь, как и для пробы А, значение удельного сцепления, полученное расчетным методом, входит в границы погрешности значения, полученного прямым методом: 0,046 и $0,0489 \pm 0,0104$ МПа соответственно. Различие в значениях угла внутреннего трения на 16,9 % не является весьма существенным для данного грунта: так, значения прочности при нормальной уплотняющей нагрузке 0,2 МПа, полученные прямым и расчетным методами, составляют 0,139 и 0,122 МПа соответственно.

Кроме того, стоит отметить, что, сравнивая результаты, полученные разными методами, необходимо также упомянуть о характеристиках прецизионности этих методов. В соответствии с «Методикой оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым

Таблица 3

Сравнение параметров прочности, полученных прямым и расчетным методами

Table 3

Comparison of strength parameters obtained by direct and computational methods

Проба	Характеристика прочности	Прямой метод	Расчетный метод	Отличие	
				Абсолютное	Относительное, %
Проба А	Удельное сцепление c , МПа	0,014	0,0198	0,0058	29,2
	Угол внутреннего трения ϕ , град.	36	28,3	7,7	27,2
Проба В	Удельное сцепление c , МПа	0,0489	0,046	0,0029	6,3
	Угол внутреннего трения ϕ , град.	24,2	20,7	3,5	16,9

и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанной ДальНИИС, характеристики прочности рассчитываются по значениям физических характеристик грунта. Следовательно, прецизионность данной методики зависит от характеристик прецизионности методов определения физических характеристик. На данном этапе многие грунтовые лаборатории занимаются оценкой характеристик прецизионности отдельных методов определения физических характеристик в условиях повторяемости и воспроизводимости, однако данные по характеристикам прецизионности параметров прочности, полученные с использованием методики ДальНИИС, пока отсутствуют.

В нормативных документах, регламентирующих проведения одноплоскостного (прямого) среза, также не приведены характеристики прецизионности метода, однако есть ряд исследований, посвященных данному вопросу. Например, для оценки повторяемости и воспроизводимости метода прямого сдвига (в соответствии с ASTM D 3080 и AASHTO T 236) группой исследователей из Висконсинского университета в Мадисоне был запланирован эксперимент, включающий серию испытаний проб плохо отсортированного песка для определения угла внутреннего трения методом прямого среза [13]. Для оценки прецизионности в условиях повторяемости в одной лаборатории одним оператором на одном и том же испытательном оборудовании была проведена серия из пяти испытаний. Внутрилабораторные испытания показали, что метод одноплоскостного среза имеет достаточно высокую повторяемость, разница между максимальным ($41,8^\circ$) и минимальным ($41,5^\circ$) значениями угла внутреннего трения составила всего $0,3^\circ$.

В эксперименте по оценке воспроизводимости метода прямого среза

принимали участие десять лабораторий. Разными операторами на испытательном оборудовании различной конструкции для плохо отсортированного песка были определены значения угла внутреннего трения. Данные межлабораторных испытаний показали, что значения угла внутреннего трения могут колебаться на $18,2^\circ$: от $24,5^\circ$ до $42,7^\circ$, что говорит о низкой воспроизводимости данного метода. Стандартное отклонение для межлабораторного эксперимента составило $8,8^\circ$ (27 %). Авторы данного эксперимента полагают, что высокое значение вариативности связано с рядом факторов, влияющих на результаты испытаний. Например, есть исследования, посвященные влиянию размера и конструкции срезной коробки испытательного оборудования на характеристики прочности [14].

Заключение

Испытания на прочность были проведены для двух валовых проб элювиально-делювиальных грунтов: щебенистого грунта (проба А) и щебенистого суглинка (проба В). В ходе испытаний на плоский (прямой) срез получены следующие параметры прочности: для пробы А удельное сцепление составило $0,0140 \pm 0,0099$ МПа, угол внутреннего трения – $36,0 \pm 2,1^\circ$, для пробы В удельное сцепление – $0,0489 \pm 0,0104$ МПа, угол внутреннего трения – $24,2 \pm 1,9^\circ$. Данные результаты соответствуют теоретическим представлениям о природе прочности грунта. Удельное сцепление, характеризующее главным образом водно-коллоидные связи, возникающие между частицами малых размеров (мелкая пыль, глинистые частицы), для пробы А имеет весьма небольшое значение – $0,0140$ МПа, что обусловлено небольшим содержанием в рассматриваемом грунте таких частиц – 10,0 %. Для пробы В показатель сцепления выше и составляет $0,0489$ МПа, выше и содержание обуславливающих этот показатель частиц – около 30 %. Угол внутреннего трения, характеризую-

щий силы механического взаимодействия между частицами, возникающего при приложении к материалу нормальной к плоскости сдвига нагрузки, для пробы А имеет достаточно высокое значение и составляет 36° . Это обусловлено высоким содержанием в грунте крупных частиц (размера песка, дресвы, щебня) – свыше 70 %, для пробы В этот показатель ниже и составляет $24,2^\circ$, содержание частиц размером крупнее 0,1 мм в данной пробе – менее 50 %.

Параметры прочности, рассчитанные с использованием «Методики оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями», разработанной ДальНИИС, отличаются от параметров прочности, полученных по результатам прямого среза (см. табл. 3). Это говорит о том, что к использованию в расчетных схемах

прочностных характеристик, рассчитанных по физическим свойствам грунта, следует относиться с осторожностью. Однако данные отдельных исследований характеристик воспроизводимости методики прямого среза свидетельствуют о том, что при определении угла внутреннего трения по данному методу в разных лабораториях на испытательном оборудовании с отличающейся конструкцией разброс полученных значений может составлять 27 %

Методика, разработанная ДальНИИС, на данный момент является основной в Российской Федерации для получения характеристик сцепления и угла внутреннего трения. По нашим рекомендациям при инженерных изысканиях для крупнообломочных грунтов даже там, где допустимо использование расчетных значений характеристик прочности, следует дополнять их характеристиками, полученными по методу прямого среза.

Библиографический список

1. Рапацкая Л.А., Буглов Н.А., Хао Дунхэн. Нефтегазоносные комплексы восточных регионов России и Китая: монография. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2013. 316 с.
2. Конторович А.Э., Сурков В.С., Трофимук А.А., Шемин Г.Г., Бакин В.Е., Воробьев В.Н., Ларищев А.И., Леонтович В.Б., Мандельбаум М.М., Матвеев В.Д., Микуленко К.И., Мигурский А.В., Моисеев С.А., Рыбьяков Б.Л., Ситников В.С., Соболев П.Н., Старосельцев В.С., Топешко В.А., Фрадкин Г.С., Чеканов В.И. Нефтегазоносные бассейны и регионы Сибири. Вып. 7. Непско-Ботубинский регион. Новосибирск: Изд-во СНИИГ-ГиМС, 1994. 76 с.
3. Конторович А.Э., Сурков В.С., Трофимук А.А. Геология нефти и газа Сибирской платформы. М.: Недра, 1981. 552 с.
4. Судаков В.В. Иванчик А.В., Куницина И.В. Геологическое строение Предпатомского прогиба // Нефтяное хозяйство. 2011. № 4. С. 46–47.
5. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями / ред. М.А. Жарикова. М.: Стройиздат, 1989. 24 с.
6. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 272 с.
7. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: Изд-во ПГУАС, 2008. 696 с.
8. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология. Л.: Недра, 1978. 496 с.
9. Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A., Zettler T.E. Geotechnical Engineering Circular. № 5. Evaluation of Soil and Rock Properties. 2002. 385 p.
10. Handy R L., Fox N.W. Soil Bore-Hole Direct-Shear Test Device // Highway Research News. 1967. № 27. P. 42–51.
11. Yanrong Li. Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2013. Vol. 72, № 3-4. P. 371–381.
12. ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions // Annual Book of Standards. Vol. 04.08. Soil and Rock. ASTM, 2004.

13. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials // Geotechnical Testing Journal. 2008. Vol. 31, № 1. P. 1–11.

14. Wen-Xi Fu, Feng Dai. Scale dependence of shear strength for a coarse granular soil using a superimposition-nest type of direct shear apparatus // Arabian Journal of Geosciences. 2015. Vol. 8. Iss. 12. P. 10301–10312.

References

1. Rapatskaya L.A., Buglov N.A., Khao Dunkhen. *Neftegazonosnye komplekсы vostochnykh regionov Rossii i Kitaya: monografiya* [Oil and gas complexes of Eastern regions of Russia and China]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2013, 316 p. (In Russ.).

2. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A., Shemin G.G., Bakin V.E., Vorobev V.N., Larichev A.I., Leontovich V.B., Mandelbaum M.M., Matveev V.D., Mikulenko K.I., Migurskij A.V., Moiseev S.A., Rybyakov B.L., Sitnikov V.S., Sobolev P.N., Staroselcev V.S., Topeshko V.A., Fradkin G.S., Chekanov V.I. *Neftegazonosnye bassejny i regiony Sibiri* [Oil and gas basins and regions of Siberia]. Iss. 7. *Nepko-Botuobinskii region* [Nepa-Botuoba region]. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1994, 76 p. (In Russ.).

3. Kontorovich A.E., Surkov V.S., Trofimuk A.A. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoi platformy* [Oil and gas geology of the Siberian platform]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 552 p. (In Russ.).

4. Sudakov V.V., Ivanchik A.V., Kunitsina I.V. Geologic structure of Predpatomsky trough according to seismic data. *Neftyanoe khozyaistvo* [Oil Industry], 2011, no. 4, pp. 46–47. (In Russ.).

5. Zharikova M.A. *Metodika otsenki prochnosti i szhimaemosti krupnooblomochnykh gruntov s pylevatym i glinistym zapolnitelem i pylevatykh i glinistykh gruntov s krupnooblomochnymi vkluchenyami* [Methods of assessing the strength and compressibility of large-block soils with silty and clay filler, and silty and clay soils with coarse-grained inclusions]. Moscow: Stroiizdat Publ., 1989, 24 p. (In Russ.).

6. Lysenko M.P. *Sostav i fiziko-mehaniicheskie svoystva gruntov* [Composition and physico-

mechanical properties of soils]. Moscow: Nedra Publ., 1980, 272 p. (In Russ.).

7. Boldyrev G.G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostojanie voprosa* [Methods for determining mechanical properties of soils. The state of the problem]. Penza: Penza State University of Architecture and Construction Publ., 2008, 696 p. (In Russ.).

8. Lomtadze V.D. *Inzhenernaja geologija. Special'naja inzhenernaja geologija* [Engineering geology. Special engineering geology]. Leningrad: Nedra Publ., 1978, 496 p. (In Russ.).

9. Sabatini P.J., Bachus R.C., Mayne P.W., Schneider J.A., Zettler T.E. Geotechnical Engineering Circular. No. 5. Evaluation of Soil and Rock Properties, 2002, 385 p.

10. Handy R L., Fox N.W. Soil Bore-Hole Direct-Shear Test Device. Highway Research News, 1967, no. 27, pp. 42–51.

11. Yanrong Li. Effects of particle shape and size distribution on the shear strength behavior of composite soils. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2013, vol. 72, no. 3-4, pp. 371–381.

12. ASTM D 3080. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soil Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of Standards. Vol. 04.08. Soil and Rock. ASTM, 2004.

13. Bareither C.A., Benson C.H., Edil T.B. Reproducibility of Direct Shear Tests Conducted on Granular Backfill Materials. Geotechnical Testing Journal, 2008, vol. 31, no. 1, pp. 1–11.

14. Wen-Xi Fu, Feng Dai. Scale dependence of shear strength for a coarse granular soil using a superimposition-nest type of direct shear apparatus. Arabian Journal of Geosciences, 2015, vol. 8, iss. 12, pp. 10301–10312.

Критерии авторства

Кузнецов Н.Л., Верхоzin И.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Nikita L. Kuznetsov, Ivan I. Verkhosin have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Информация об авторах

Кузнецов Никита Леонидович, аспирант Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: kuzn_nikita@mail.ru*

Верхозин Иван Иванович, кандидат геолого-минералогических наук, профессор кафедры прикладной геологии Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: iverhozin@istu.edu*

Information about the authors

Nikita L. Kuznetsov, Postgraduate Student of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: kuzn_nikita@mail.ru*

Ivan I. Verkhozin, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor of the Department of Applied Geology of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: iverhozin@istu.edu*

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.271.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-55-63>

Обоснование глубины вскрышных бульдозерных работ при разработке глубоких россыпей

© Б.Л. Тальгамер, Е.А. Дорош

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данного исследования заключалась в разработке методики определения экономически целесообразной границы применения бульдозерного способа вскрышных работ для различных горнотехнических условий. В настоящее время горнотехнические условия вовлекаемых в эксплуатацию россыпей постепенно ухудшаются, постоянно увеличивается глубина вскрышных работ. Все чаще при удалении торфов применяют комбинированный способ вскрышных работ с выемкой верхней части бульдозерами, а нижней – экскаваторами. При этом вертикальная граница между этими способами часто устанавливается без достаточного обоснования. Определение рационального соотношения объемов работ, выполняемых бульдозерами и экскаваторами, позволит решить задачу снижения затрат при производстве вскрышных работ на глубоких россыпных месторождениях. В настоящей статье представлена методика экономического обоснования глубины вскрышных работ, осуществляемых бульдозером, с учетом себестоимости выемочных работ, выполняемых разным оборудованием. Использован графоаналитический метод исследования. Разработаны номограммы для определения себестоимости вскрышных работ для бульдозера и экскаватора в зависимости от параметров россыпи и рельефа прилегающей поверхности, которые позволяют оперативно устанавливать экономически целесообразную границу применения бульдозерного способа вскрышных работ. Предложенная методика позволяет также обоснованно распределять объемы торфов, складированных на разных бортах выработки. Таким образом, применение данной методики позволяет снизить расходы на производство вскрышных работ при разработке глубоких россыпей, когда используется комбинированный способ вскрышных работ с выемкой верхней части бульдозерами, а нижней – экскаваторами.

Ключевые слова: россыпные месторождения, вскрышные работы, бульдозеры, экскаваторы, автотранспорт, себестоимость, распределение объемов торфов

Информация о статье: Дата поступления 12 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 14 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А. Обоснование глубины вскрышных бульдозерных работ при разработке глубоких россыпей. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 55–63. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-55-63.

Justification of bulldozer stripping work depth when developing deep placers

© Boris L. Talgamer, Egor A. Dorosh

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this study is development of a method for determining the economically feasible boundary of the use of a bulldozer stripping method for various mining conditions. Mining and technical conditions of the placers developed today are gradually deteriorating as the depth of stripping works is constantly increasing. More and more often after peat removal a combined method of stripping works is applied where the upper part is mined by bulldozers and the lower one by stripping shovels. In this case, the vertical boundary between these methods is often established without sufficient justification. Determination of the rational correlation ratio of the amount of works performed by bulldozers and stripping shovels will allow to solve the problem of reducing the costs of stripping works at deep alluvial deposits. This paper presents a methodology for the economic substantiation of the depth of bulldozer stripping works taking into account the cost of stripping works performed by different equipment. The study uses a grapho-analytical method. Nomograms have been developed for determining the cost of stripping

operations for a bulldozer and a stripping shovel depending on placer parameters and the relief of the adjacent surface, which enable prompt determination of an economically feasible boundary of stripping shovel mining application. The proposed methods also allow a reasonable distribution of peat volumes stored on different sides of the mine. Therefore, the use of this procedure will reduce the cost of stripping works in the development of deep alluvial deposits when the combined stripping method is used including the removal of the upper part by bulldozers, and the lower one by stripping shovels.

Keywords: placers, stripping works, bulldozers, stripping shovels, motor transport, cost price, distribution of peat volumes

Information about the article: Received February 12, 2019; accepted for publication March 14, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Talgamer B.L., Dorosh E.A. Justification of bulldozer stripping work depth when developing deep placers. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 55–63. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-55-63.

Введение

При постоянно увеличивающихся темпах добычи золота из коренных месторождений доля золотодобычи из россыпей в России остается еще достаточно высокой и составляет около 25 %¹ [1]. При этом количество еще не вовлеченных в эксплуатацию и находящихся в нераспределенном фонде россыпных месторождений в Российской Федерации превышает четыре тысячи [2]. Однако горнотехнические условия разработки россыпей неуклонно продолжают ухудшаться, в том числе увеличивается глубина залегания запасов, растут мощности торфов и коэффициент вскрыши [2–4]. Широко используемый бульдозерный способ ведения вскрышных работ не обеспечивает доступ к полезному ископаемому, и большая часть торфов на россыпях в настоящее время удаляется экскаваторами. Вместе с тем при небольшой мощности торфов бульдозерный способ ведения вскрышных работ остается наиболее эффективным и экономичным [5].

На глубоких россыпных месторождениях, которые разрабатываются открытым способом, используются различные технологические схемы ведения вскрышных работ, и чаще всего бульдозерно-экскаваторные. Практика показывает, что при применении комбинации различного вскрышного оборудования для бульдозера принимают традиционно установившуюся границу вскрышных работ до 5–6 м от поверхности² [6], а остальной объем нижележащих торфов разрабатывается экскаваторно-автотранспортным комплексом (рис. 1). При этом при использовании бульдозеров небольшой мощности предельную глубину вскрышных пород на достаточно широких россыпях рекомендуется принимать не более 1,5 м³. При ширине полигона 40–50 м рекомендуемая глубина вскрышных работ, выполняемых бульдозером, составляет 3–4 м [7].

Данный подход к определению границы перехода от бульдозерных вскрышных работ к экскаваторному способу не всегда обоснован, так как уклон

¹О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 году: гос. докл. М.: Министерство природных ресурсов и экологии РФ, 2018. / On the state and use of mineral resources of the Russian Federation in 2016: state report. Moscow: Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation Publ., 2018.

²Березин В.П., Лешков В.Г., Мацуев А.П., Потёмкин С.В. Справочник по разработке россыпей. М.: Недра, 1973. 592 с. / Berezin V.P., Leshkov V.G., Matsuev A.P., Potemkin S.V. Handbook on placer development. Moscow: Nedra Publ., 1973. 592 p.

³Там же. / Ibidem.

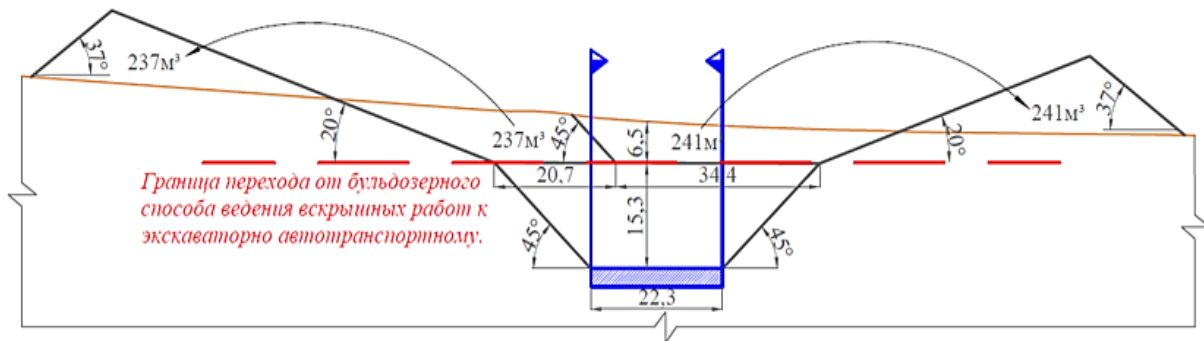


Рис. 1. Схема распределения вскрышных пород на бульдозерный и экскаваторный способы разработки по буровой линии 1
Fig. 1. Diagram of overburden rock distribution by bulldozer and stripping shovel development methods along the drilling line 1

прилегающей поверхности, ширина полигона и другие параметры россыпи существенно различаются, что требует более детального расчета рациональной глубины бульдозерной разработки торфов.

С увеличением глубины вскрышных работ, осуществляемых бульдозерами, растет длина транспортирования и высота подъема пород на отвалы и, соответственно, снижается производительность оборудования, увеличиваются объемы вскрыши за счет необходимости выколаживания бортов для создания условий выезда бульдозеров на отвалы, в результате чего растет себестоимость работ. Одновременно по мере увеличения мощности вскрышного уступа, разрабатываемого бульдозерным способом, будет уменьшаться высота нижерасположенного экскаваторного уступа с соответствующим изменением себестоимости вскрышных работ, выполняемых экскаваторно-автотранспортным комплексом. Поэтому обоснование рационального соотношения объемов работ, выполняемых бульдозерами и экскаваторами, позволит существенно улучшить экономические показатели вскрышных работ.

Целью настоящей статьи является определение экономически обоснованной глубины разработки торфов бульдозерным способом для различных горно-технических условий. Для достижения поставленной цели необходимо установить

зависимости производительности бульдозера от глубины ведения вскрышных работ, ширины разрабатываемого блока и уклона прилегающей поверхности, а также зависимость между производительностью экскаватора и высотой вскрышного уступа. На основании указанных зависимостей следует разработать методику расчета, которая позволяла бы оперативно и эффективно выбирать границу перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных работ к экскаваторно-автотранспортному.

Методика исследований

На основании выполненных расчетов по известным формулам [8–10] отстраивается номограмма, на которой приводятся зависимости дальности транспортирования пород и производительности бульдозера от глубины разработки при различных углах прилегающей (подотвальной) поверхности и разной ширине россыпи (рис. 2).

По установленным для конкретных условий зависимостям производительности бульдозера от горно-технических параметров с учетом средней стоимости машино-часа его работы определяется себестоимость вскрышных работ при разной мощности удаляемых торфов.

Аналогичные номограммы были построены для ширины выработки по дну В, равной 10, 50, 75 и 100 м.

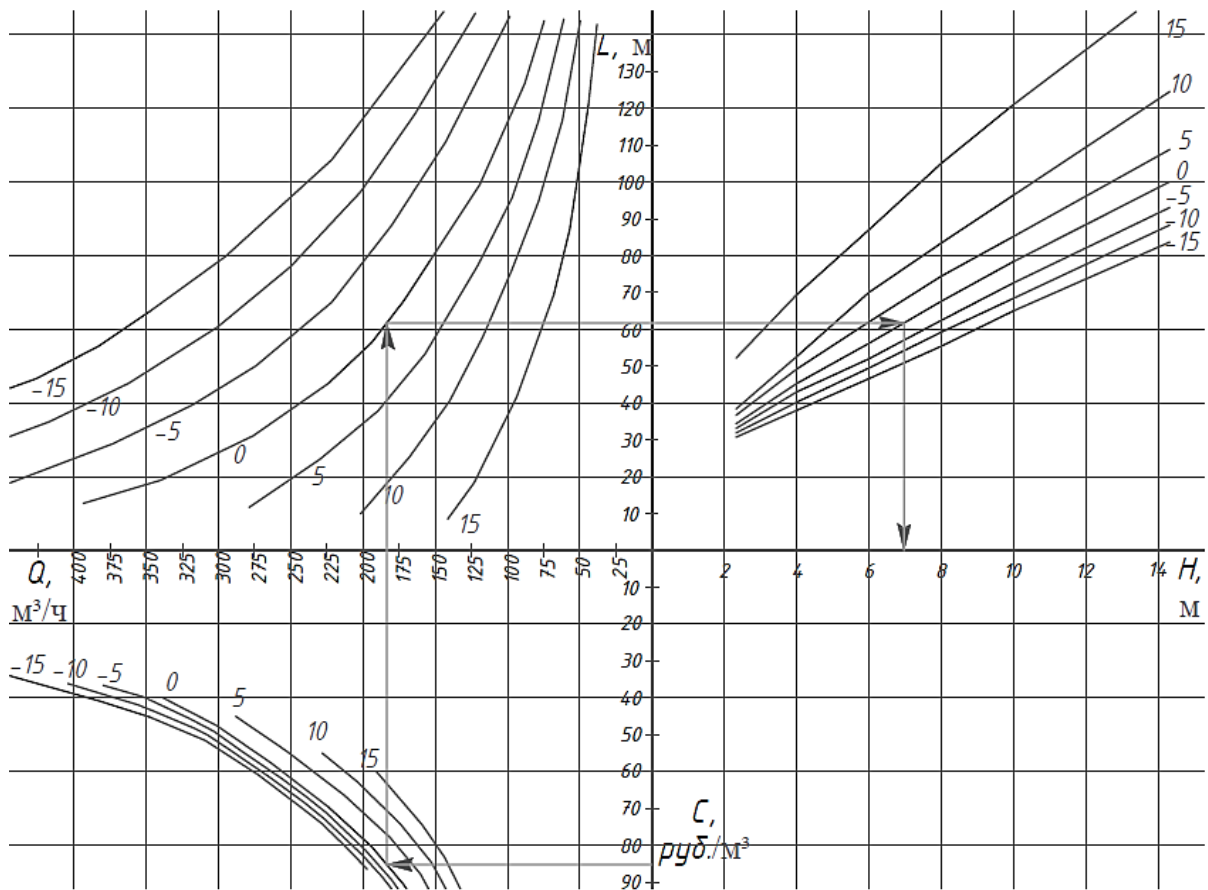


Рис. 2. Номограмма для определения себестоимости вскрышных работ, осуществляемых бульдозером ЧЕТРА Т35.01, при ширине вскрышной выработки по дну B , равной 25 м, и уклонах подотвальной поверхности от -15° до $+15^\circ$:
 H – глубина вскрышных работ, м; L – среднее расстояние транспортирования пород бульдозером, м;
 Q – производительность бульдозера, $\text{м}^3/\text{ч}$; C – себестоимость вскрышных работ, $\text{руб.}/\text{м}^3$

Fig. 2. Nomogram for determining the cost of stripping operations performed by the CHETRA T35.01 bulldozer when the strip mining width across the bottom B is 25 m and on the slopes of the underspoil surface it is from -15° to $+15^\circ$:
 H – stripping work depth, m; L – average distance of rock transportation by a bulldozer, m;
 Q – bulldozer performance, m^3/h ; C – cost price of stripping works, rubles/m^3

Данные номограммы (см. рис. 2) позволяют определить экономически обоснованную границу перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных работ к экскаваторному для различных горнотехнических условий залегания запасов. Для этого необходимо предварительно сопоставить себестоимость экскаваторно-автотранспортного и бульдозерного способов ведения вскрышных работ в зависимости от мощности разрабатываемых уступов и условий отвалообразования. По результатам сопоставления с учетом равенства затрат на выемку

торфов экскаваторно-автотранспортным и бульдозерным способами устанавливается целесообразная глубина вскрышных работ, осуществляемых бульдозером.

Результаты исследований

В соответствии с вышеизложенной методикой обоснования глубины бульдозерной разработки торфов рассмотрим пример обоснования технологической схемы вскрышных работ для одного из блоков глубокозалегающей россыпи.

Для этого блока, где намечен комбинированный способ вскрышных работ, были установлены зависимости дальности

сти транспортирования пород от высоты экскаваторного уступа и соответствующей производительности выемочно-транспортного оборудования, а также себестоимости вскрыши с учетом производительности экскаватора (рис. 3). Расчеты выполнены при условии использования экскаватора и двух автосамосвалов. Для конкретного примера нарастание мощности разрабатываемого экскаватором уступа обуславливало увеличение расстояния транспортирования вскрышных пород в отвалы в связи с увеличением длины выездной траншеи

(рис. 4). В других условиях эта зависимость может быть обратной.

По полученной номограмме (см. рис. 3) определяется себестоимость выемки пород экскаваторным способом. К найденному значению прибавляется себестоимость транспортирования торфов автосамосвалами. Таким образом определяется себестоимость экскаваторно-автотранспортного способа разработки торфов. Полученное значение отмечается на номограммах для определения себестоимости вскрышных работ (см. рис. 2), осуществляемых бульдозером,

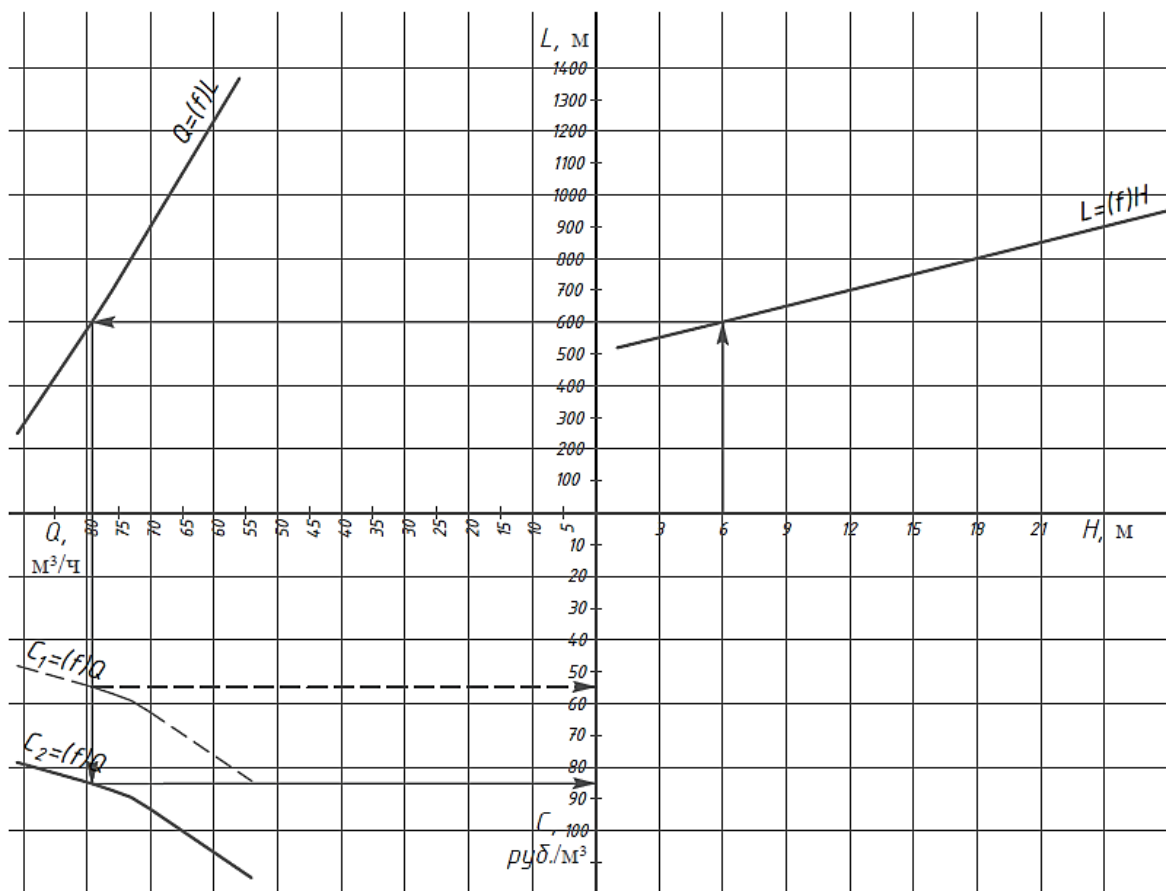


Рис. 3. Номограмма для определения себестоимости вскрышных работ, выполняемых экскаватором:

H – высота уступа, м; L – расстояние транспортирования пород автосамосвалом до отвала, м;
 Q – производительность экскаватора, м³/ч; C_1 – себестоимость экскаваторных работ, руб./м³;
 C_2 – себестоимость экскаваторно-автотранспортного комплекса, руб./м³

Fig. 3. Nomogram for cost determination of stripping works performed by a stripping shovel:

H – bench height, m; L – distance of rock transportation by a dump truck to the dump, m;
 Q – stripping shovel performance, m³/h; C_1 – cost of stripping shovel works, rubles/m³;
 C_2 – cost of the stripping shovel-motor transportation complex, rubles/m³

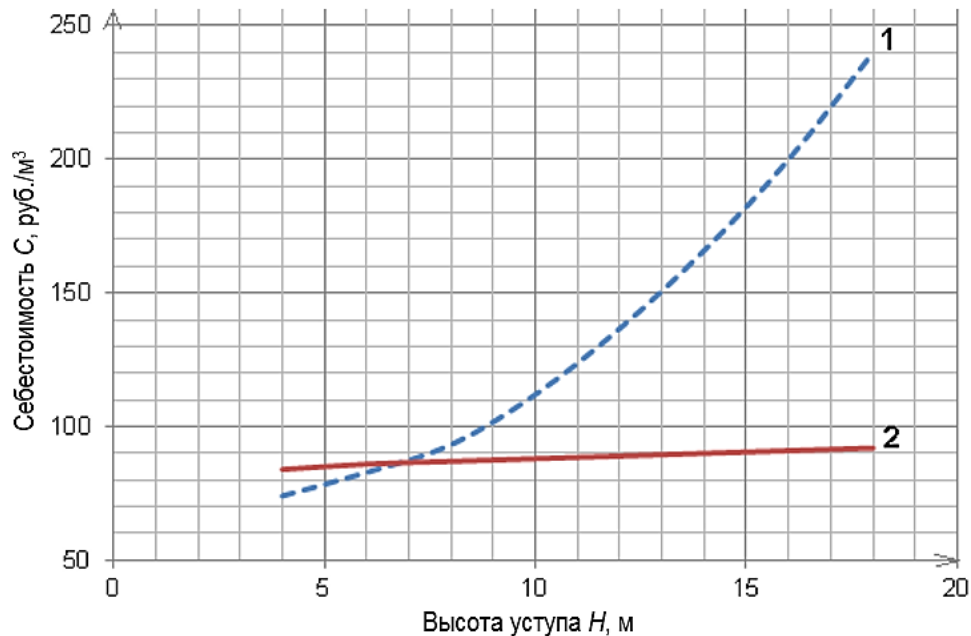


Рис. 4. График зависимости себестоимости вскрышных работ от высоты разрабатываемого уступа:

1 – себестоимость бульдозерного способа вскрышных работ;
2 – себестоимость экскаваторно-автотранспортного способа вскрышных работ

Fig. 4. Graph of stripping work cost dependence on the height of the developed bench:

1 – cost of the bulldozer method of stripping works;
2 – cost of the shovel-motor transport method of stripping

как граница, до которой эффективно использовать бульдозерный способ разработки торфов. При высоте уступа 6 м себестоимость экскаваторных работ составляет 55 руб./м³, к найденному значению прибавляется себестоимость транспортирования торфов автосамосвалами до внешнего отвала, при расстоянии транспортирования пород до отвала, равном 600 м, она составит 30 руб./м³. В данных условиях себестоимость экскаваторно-автотранспортного способа разработки торфов в целом составит 85 руб./м³. Чтобы установить глубину разработки торфов бульдозерным способом при различных горнотехнических условиях, на основании полученных выше номограмм (см. рис. 2) отстраивается график (рис. 5), используя который можно не только определять границу бульдозерных работ, но и распределять объемы торфов, складываемых на левом или

правом борте выработки (в зависимости от уклона подотвальной поверхности).

С увеличением высоты экскаваторного уступа (больше 6 м) себестоимость бульдозерных работ будет существенно ниже, чем экскаваторных, а с уменьшением высоты – наоборот. Общие затраты на вскрышные работы при этом должны быть минимальными.

Чтобы определить границу бульдозерных работ, по графику (см. рис. 5) на оси абсцисс откладывается половина ширины бульдозерной выработки по дну (на левую и правую стороны) таким образом, чтобы получить на оси ординат близкие по значению величины экономически обоснованной границы перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных работ к экскаваторно-автотранспортному. Используя полученный график, можно определить границу перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных

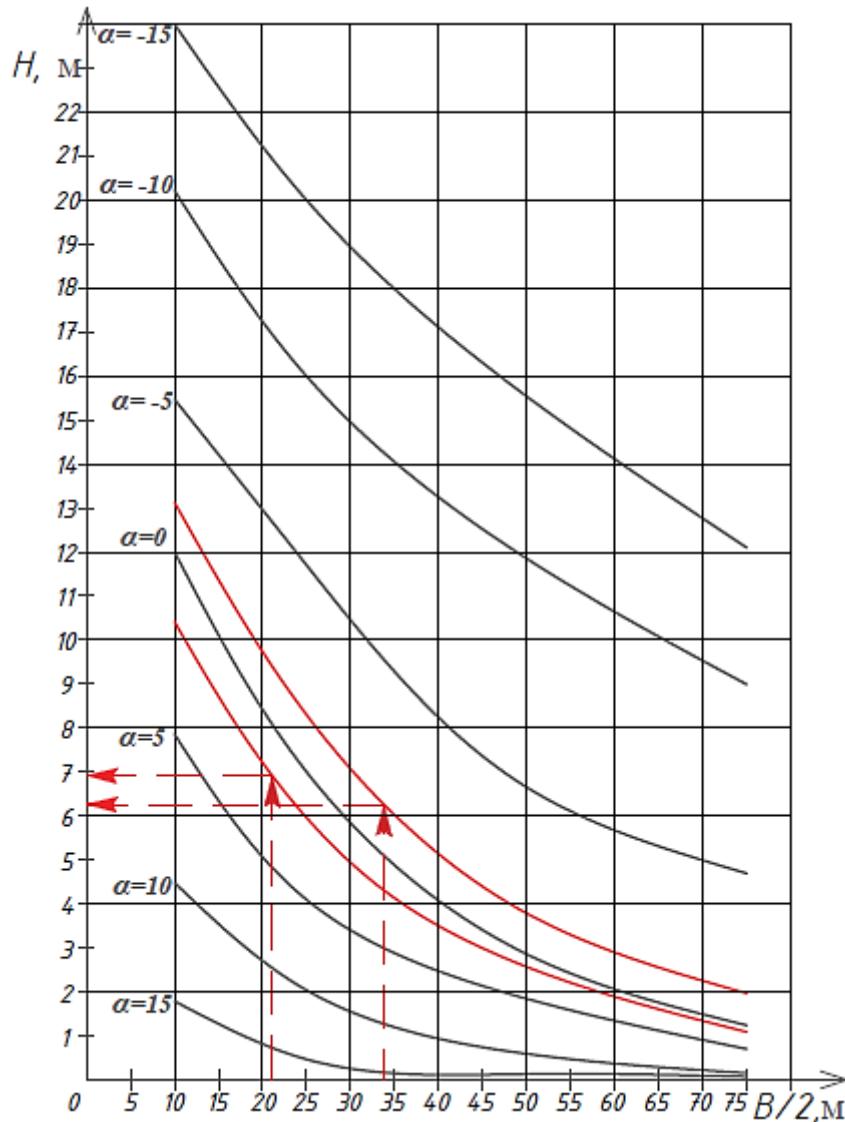


Рис. 5. График зависимости глубины разработки торфов бульдозерным способом от ширины блока и уклона прилегающей поверхности для разреза по буровой линии 1:
 H – граница перехода от бульдозерного способа разработки к экскаваторо-автотранспортному, м;
 $B/2$ – половина ширины вскрышной выработки по дну, м;
 α – угол наклона прилегающей поверхности, град.

Fig. 5. Dependence graph of peat development depth by the bulldozer method and the width of the block and the slope of the adjacent surface for the cut along the drilling line 1:
 H – border of transition from the bulldozer mining method to the strip shovel-motor transport method, m;
 $B/2$ – half of the stripping work width along the bottom, m;
 α – inclination angle of the adjacent surface, degrees

работ к экскаваторно-автотранспортному для конкретного блока (см. рис. 1), которая по буровой линии 1 составила в среднем 6,5 м. Данное значение установлено на основании того, что при ширине бульдозерной выработки по дну 34,4 м для торфов правого борта экономически обоснованная глубина ведения вскрыш-

ных работ составила 6,2 м при уклоне прилегающей (подотвальной) поверхности α , равном -2° . Для торфов левого борта при ширине бульдозерной выработки по дну 20,7 м экономически обоснованная глубина ведения вскрышных работ составила 6,9 м при уклоне прилегающей (подотвальной) поверхности α ,

равном 2°. Данные значения используются для определения границы перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных работ к экскаваторно-автотранспортному (см. рис. 5). Таким образом, благодаря установленным зависимостям можно определить экономически обоснованную границу между объемами торфов, складываемых на правом и левом бортах выработки. Для рассмотренного примера на правом борте будут складываться породы в объеме 241 м³, на левом – в объеме 237 м³ (см. рис. 1).

Заключение

Представленная методика расчета позволяет оперативно и обоснованно выбирать границу перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных работ к

экскаваторно-автотранспортному при различных горнотехнических условиях залегания запасов и разным горнотранспортным оборудованием. Кроме этого, описанная методика расчета дает возможность экономически обоснованно распределять объемы торфов, складываемых на разных бортах выработки.

Данную методику рекомендуется использовать для определения границы перехода от бульдозерного способа ведения вскрышных работ к экскаваторному при большом количестве блоков на месторождениях с разными горнотехническими условиями залегания запасов при наличии конкретного горнотранспортного оборудования.

Библиографический список

1. Итоги золотодобывающей отрасли в 2017 году // Золото и технологии. 2018. № 1 (39). С. 6–13.
2. Лунышин П.Д. Золотые недра России // Золотодобыча. 2013. № 8. С. 32–34.
3. Тальгамер Б.Л., Ершов В.А., Тютрин С.Т. Состояние и перспективы развития дражной золотодобычи в Иркутской области // Золотодобыча. 2016. № 12 (217). С. 11–14.
4. Суренков В.С. Сырьевая база золотодобывающей промышленности России: состояние, проблемы и возможные пути развития // Рациональное освоение недр. 2017. № 3. С. 16–19.
5. Емельянов А.И. Технология бульдозерной разработки вечномерзлых россыпей. М.: Недра, 1976. 287 с.

6. Костромитинов К.Н., Лысков В.М. Оценка эффективности обработки месторождений драгоценных металлов. Иркутск: Изд-во БГУЭП, 2015. 530 с.
7. Шорохов С.М. Технология и комплексная механизация разработки россыпных месторождений. М.: Недра, 1973. 768 с.
8. Лешков В.Г. Разработка россыпных месторождений. М.: Горная книга, 2007. 906 с.
9. Томаков П.И., Наумов И.К. Технология, механизация и организация открытых горных работ. М.: Недра, 1986. 312 с.
10. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Ч. 1. М.: Недра, 1985. 509 с.

References

1. Results of the gold mining industry in 2017. *Zoloto i tekhnologii* [Gold and Technologies], 2018, no. 1 (39), pp. 6–13. (In Russ.).
2. Lunyashin P.D. Gold resources of Russia. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2013, no. 8, pp. 32–34. (In Russ.).
3. Tal'gamer B.L., Ershov V.A., Tyutrin S.T. State and development prospects of dredging gold production in the Irkutsk region. *Zolotodobycha* [Gold Mining], 2016, no. 12 (217), pp. 11–14. (In Russ.).
4. Surenkov V.S. Raw materials base of the Russian gold mining industry: the state, problems and ways of development. *Ratsional'noe osvoenie nedr* [Mineral Mining & Conservation], 2017, no. 3, pp. 16–19. (In Russ.).

5. Emel'yanov A.I. *Tekhnologiya bul'dozernoi razrabotki vechnomerzlykh rossypei* [Bulldozer development technology of permafrost placers]. Moscow: Nedra Publ., 1976, 287 p. (In Russ.).
6. Kostromitinov K.N., Lyskov V.M. *Otsenka effektivnosti otrabotki mestorozhdenii dragotsennykh metallov* [Evaluation of mining efficiency of precious metal deposits]. Irkutsk: Baikal State University of Economics and Law Publ., 2015, 530 p. (In Russ.).
7. Shorokhov S.M. *Tekhnologiya i kompleksnaya mekhanizatsiya razrabotki rossypnykh mestorozhdeniya* [Technology and complex mechanization of placer deposit development]. Moscow: Nedra Publ., 1973, 768 p. (In Russ.).

8. Leshkov V.G. *Razrabotka rossypanykh mestorozhdenii* [Placer development]. Moscow: Gornaya kniga Publ., 2007, 906 p. (In Russ.).

9. Tomakov P.I., Naumov I.K. *Tekhnologiya, mekhanizatsiya i organizatsiya otkrytykh gornykh rabot* [Technology, mechanization and organization

of open pit mining]. Moscow: Nedra Publ., 1986, 312 p. (In Russ.).

10. Rzhavskii V.V. *Otkrytye gornye raboty* [Open cast mining]. Part 1. Moscow: Nedra Publ., 1985, 509 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Тальгамер Б.Л., Дорош Е.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Тальгамер Борис Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой разработки месторождений полезных ископаемых Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: talgamer@istu.edu, go_gor@istu.edu

Дорош Егор Алексеевич, студент Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: egor.dorosh@rambler.ru

Authorship criteria

Boris L. Talgamer, Egor A. Dorosh have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Boris L. Talgamer, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Mineral Deposit Development of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: talgamer@istu.edu, go_gor@istu.edu

Egor A. Dorosh, Student of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: egor.dorosh@rambler.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.276.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-64-77>

Режимные параметры при отработке технологии бурения скважин саморазрушающейся пеной на основе «Композита СП»

© В.Г. Заливин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данной статьи – исследовать параметры режима бурения скважин с очисткой забоя саморазрушающейся пеной по замкнутому циркуляционному циклу. В ходе работы сделан обзор и проведен анализ основных технико-экономических показателей бурения при использовании пены в качестве очистного агента в различных геологических условиях. Методика выбора твердосплавного колонкового породоразрушающего инструмента и режимных параметров его отработки при промывке забоя пеной такая же, как и при бурении на буровом растворе. В качестве определяющего показателя процесса бурения используется необходимость достижения максимальной механической скорости для конкретных горно-геологических условий. В результате обоснованы параметры режимов бурения для бескернового, твердосплавного и алмазного способов бурения пеной и произведена компоновка бурового оборудования. Разработаны рекомендации по эффективной и рациональной эксплуатации технологии и технических средств бурения с пеной, и показано их отличие от бурения скважин на промывочной жидкости. Приведены технологические ситуации, возможные осложнения и особенности бурения с пеной в осложненных условиях. Рекомендованы для различных условий бурения с пеной меры предупреждения возникновения аварий. Обосновано количество повторных циклов использования первоначально приготовленного раствора композита саморазрушающейся пены заданной концентрации. Применение саморазрушающейся пены при бурении скважин по рекомендованной технологии значительно увеличивает проходку на долото, механическую скорость бурения, способствует предупреждению ряда осложнений в процессе строительства скважин и снижает стоимость каждого метра бурения. При этом не происходит загрязнение устья скважины, что улучшает экологическую обстановку процесса бурения.

Ключевые слова: пена саморазрушающаяся, параметры режимов бурения, бурение пеной в осложненных условиях, рекомендации по эффективной эксплуатации, замкнутый цикл циркуляции, обвязка оборудования для получения пен, пеногенераторы, бустеры, компрессоры, дозирующие устройства

Информация о статье: Дата поступления 18 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 4 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Заливин В.Г. Режимные параметры при отработке технологии бурения скважин саморазрушающейся пеной на основе «Композита СП». *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42, № 1. С. 64–77. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-64-77.

Mode parameters when using the technology of drilling wells with self-destructive foam "Composite SDF"

© Vladimir G. Zalivin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this article is to study the parameters of the well drilling mode with closed-circuit bottom-hole cleaning by the self-destructive foam. The study involves the review and analysis of the main technical and economic indicators of drilling when using foam as a cleaning agent under various geological conditions. The method of selecting a hard-alloy core-rock-breaking tool and its operating parameters when washing the bottomhole with foam is similar to the one used at drilling with the drilling mud. The need to achieve the maximum mechanical speed for specific mining and geological conditions is used as a key indicator of the drilling process. As a result, the justification is given to the regime parameters of coreless, hard-alloy, and diamond foam drilling and the drilling

equipment is assembled. Recommendations have been developed for the efficient and rational use of the technology and technical tools for foam drilling. Their difference from the well drilling with flushing fluid is shown. The technological situations, possible complications and features of foam drilling in complicated conditions are described. Accident prevention measures are developed for various foam drilling conditions. The number of repeated cycles of using the originally prepared composite solution of a self-destructive foam with given concentration is substantiated. The use of the self-destructive foam when drilling wells by the recommended technology significantly increases the advance per bit, mechanical speed of drilling, helps to prevent a number of complications under well construction, as well as reduces the cost of each meter of drilling. Moreover, mud does not accumulate in the wellhead, which improves the environment setting of the drilling process.

Keywords: self-destructive foam, drilling mode parameters, foam drilling in complicated conditions, recommendations on effective operation, closed-circuit circulation cycle, piping of foam producing equipment, foam generators, boosters, compressors, metering devices

Information about the article: Received December 18, 2018; accepted for publication March 4, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Zalivin V.G. Mode parameters when using the technology of drilling wells with self-destructive foam "Composite SDF". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 64–77. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-64-77.

Введение

В проведенных ранее исследованиях [1, 2] разработаны составы саморазрушающихся пен для бурения по замкнутому циркуляционному циклу на основе «Композита СП». Эти составы рекомендуется использовать для прохождения осыпающихся пород, например филлитов, глинистых мергелей, высокоглинистых алевролитов, аргиллитов и глинистых невысокой влажности рыхлых песков.

Из-за малых весовых расходов пен в процессе бурения и низкой теплоемкости пена имеет небольшой запас тепла и может эффективно применяться при бурении многолетнемерзлых пород, не растепляя стенки скважины. Для снижения температуры замерзания пены и сохранения свойств при низких температурах в пенообразующий раствор добавляют NaCl, CaCl₂ (до 10 %-й концентрации).

Для улучшения свойств пены применимо использование реагентов-стабилизаторов и структурообразователей (органические полимеры и глины), регуляторов величины pH и смягчителей воды (Na₂CO₃), понизителей гидравлических сопротивлений (додециловый спирт) и пенообразователей – сульфанола, сульфаната, пенола, ОП-7, ОП-10.

Управление бурением с очисткой забоя композитом осуществляется аналогично буровому раствору, но осевая нагрузка на породоразрушающий инструмент принимается несколько ниже, а максимальная частота вращения бурового инструмента ограничивается 600 мин⁻¹. Рекомендуемые параметры режима бурения с применением газожидкостных смесей для схемы с компрессором низкого давления приведены в табл. 1.

Методы исследования

Методика выбора породоразрушающего инструмента и режимных параметров его обработки при промывке забоя пеной заключалась в обработке фактического материала непосредственно при бурении производственных скважин.

Результаты исследований

Бурение сплошным забоем. При бурении сплошным забоем с промывкой пеной в качестве породоразрушающего инструмента следует отдавать предпочтение двухшарошечным долотам при бурении до 1200 м, так как они обеспечивают наиболее эффективные условия очистки призабойной зоны от шлама и создание необходимых осевых нагрузок. Для интенсификации очистки и улучшения пенообразования в призабойной зоне эти

Таблица 1

Рекомендуемые параметры режима бурения

Table 1

Recommended drilling mode parameters

Тип породоразрушающего инструмента	Диаметр, мм	Частота вращения, мин ⁻¹	Осевая нагрузка, даН	Расход пенообразующего состава, дм ³ /мин	Расход воздуха, м ³ /мин	Давление нагнетания компрессора, МПа	Расчетная производительность дожимного насоса, дм ³ /мин
Шарошечные долота (типа К, ДДА)	112–93	118–254	1500–2000	5–6	0,3–0,5	0,5–0,6	120
	76		1000–1500			0,6	70
Твердосплавные коронки	76	254–480	300–1000	5–10	0,5	0,5–0,6	120
	59		300–800		0,4	0,6	70
Алмазные коронки	76	480–600	1000–1500	10–15	0,3–0,4	0,4–0,5	120
	59		600–1000	5–10	0,2–0,4	0,3–0,4	70

долота желательно оснащать центральными промывочными патрубками с круглым или щелевым выходным отверстием [3].

В компоновку бурового снаряда входят: долото, обратный клапан, расширитель, утяжеленная бурильная труба (при диаметре бурения 93 мм и выше) или жесткий направляющий снаряд (при диаметре 59 и 76 мм), а также один-два обратных клапана в колонне бурильных труб (в зависимости от глубины бурения).

Следует иметь в виду, что при восстановлении циркуляции пены (при пуске дожимных камер) давление в нагнетательной линии может превысить рабочее в 1,2–1,5 раза.

Также может наблюдаться повышенный износ опор применяемых шарошечных долот при увеличении стойкости их вооружения. Однако в конечном счете

основные технико-экономические показатели бурения могут быть выше, чем при промывке с буровым раствором: по проходке на долото – в среднем на 20–50 % и по механической скорости бурения – на 40–60 %.

Твердосплавное бурение с пеной. Методика выбора твердосплавного колонкового породоразрушающего инструмента и режимных параметров его обработки при промывке забоя пеной такая же, как и при бурении на буровом растворе, и в качестве определяющего показателя процесса бурения используется необходимость достижения максимальной механической скорости для конкретных горно-геологических условий.

В общем случае тип и марка твердосплавных коронок выбираются в соответствии с категорией буримости разбуриваемой породы по табл. 2 [4].

Таблица 2

Выбор типа буровых коронок

Table 2

Selection of the drilling bit type

Категория буримости	I–IV, частично V	IV–VI, частично VII	VI–VII, частично VIII–IX
Тип коронок	Ребристые	Резцовые	Самозатачивающиеся
Марка коронок	M1, M2, M5	CM5, CT2	CA2, CA3, CA4, CA5, CA6, CM4, CM5, CM6

Значения режимных параметров при разработке технологии твердосплавного бурения с промывкой пеной с использованием дожимных устройств в зависимости от диаметра коронок приведены в табл. 3.

Высокие нагрузки в сочетании с уменьшенной частотой вращения следует применять при разбуривании пород повышенной категории буримости, и наоборот. На самозатачивающиеся коронки нагрузку следует создавать больше, чем на ребристые и мелкорезцовые.

Алмазное бурение с пеной. Значительный отечественный опыт бурения алмазным породоразрушающим инструментом [5] с очисткой забоя пеной, получаемой с помощью поверхностных пеногенераторов и компрессорно-дожимных устройств, может служить основой при разработке технологии и областей рационального и эффективного применения композита в качестве пенообразующей композиции при алмазном бурении.

В качестве исходных значений режимных параметров при отработке технологии широкого использования композита с учетом его свойств и технологических особенностей получения можно принять значения, характерные для различных регионов страны со сходными геолого-техническими условиями (табл. 4).

Давление нагнетания пены при бурении скважин глубиной до 500–600 м алмазными коронками типа 01А3, 01А4 может достигать 2–2,5 МПа, а при водопритоках – подниматься и до 3–3,5 МПа, что резко увеличивает возможность прижога коронки.

Из-за повышения гидростатического давления в кольцевом пространстве часть пены может вдавливаться в трещины, создавая зоны повышенного избыточного давления, в результате чего при подъеме бурового снаряда возникает довольно длительное фонтанирование порядка 30–40 мин.

Углубку скважины алмазной коронкой следует начинать при пониженном расходе пенообразующего раствора и высоких степенях аэрации.

При бурении монолитных и слабо трещиноватых пород степень аэрации необходимо поддерживать в пределах 50–150, а в трещиноватых, многолетне-мерзлых породах, зонах поглощения и слабых водопритоков – 100–200 и более.

Особенности теплового режима при работе серийного алмазного инструмента накладывают определение ограничения на широкое использование пены как очистного агента при алмазном бурении.

Для уменьшения отрицательного воздействия температурного фактора в

Таблица 3

Режимные параметры при разработке технологии твердосплавного бурения с промывкой пеной

Table 3

Regime parameters in the development of the technology of hard-alloy drilling with foam washing

Диаметр коронок, мм	Осевая нагрузка, тс	Частота вращения, об./мин	Расход пенообразующего раствора, л/мин	Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	Степень аэрации	Допустимая подача дожимного насоса, л/мин
93	1,2–1,8	250–300	10–12	0,5–0,6	50	120–130
76	0,8–1,5	350–380	3–10	0,4–0,5	50	90–110
59	0,6–1,0	400–480	6–8	0,3–0,4	50	50–70

Таблица 4

Возможные исходные значения режимных параметров
при отработке технологии применения «Композита СП» при алмазном бурении

Table 4

Possible initial values of regime parameters when using
the "Composite SDF" technology at diamond drilling

Диаметр бурения, мм	Тип пород (категория буримости)	Тип колонкового набора	Марка алмазной коронки	Исходные режимные параметры				
				Осевая нагрузка, кг·с	Частота вращения, об/мин	Расход пенообразования раствора, л/мин	Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	Степень аэрации
76	Брекчии на кварцевом цементе (IX)	Одинарный	АКМ	1000–1200	360	8–10	1,1–1,5	138–150
	01АЗ, АЧДП		800–1400	140–250	8–12	1,5–1,8	190–150	
	Метаморфизованные алевролиты, кварциты (VIII–X1)	ТДН-0, ТДН-2	16ИЧ, КДТ	1200–1800	140–230	6–12	1,5–1,8	250–150
	Трещиноватые породы, зоны поглощений (VIII–X)	Одинарный	01АЗ, 02ИЗ, КСАВ	800–2000	190–480	15–20	2–2,5	133–125
	Многолетне-мерзлые породы (VIII–IX)	ССК-76	17АЧ, К-16	1300–1900	300–500	16–20	1,5–2	94–100
59	Трещиноватые породы, склонные к поглощению (VIII–X)	Одинарный	01АЗ, 01А4, 02ИЗ, 02И4	800–2000	150–300	5–16	1,5–2	300–125
			АЧДП, ИЧДП	500–3000	340–800	6–15	1,8–2	300–133
			АЧДП, 02ИЗ	900–1200	300–500	10–15	1–1,5	100
	Многолетне-мерзлые породы (IX–X1)	ССК-59	К-01, К-02	700–1000	500–800	10–12	0,7–1,1	70–90

зоне контакта коронки с забоем на исходные свойства пены и в целом на процесс бурения при выборе алмазных коронок следует руководствоваться следующим:

– в монолитных и слаботрещиноватых породах VIII–X категорий по буримости использовать серийные однослойные коронки с зернистостью объемных алмазов 50–60 шт. на коронку и насыщенностью на уровне коронок АЧДП;

– в породах X–XII категорий использовать импрегнированный инструмент с зернистостью алмазов 200–400 шт. на коронку и массовым содержанием около 12 карат (как у коронок ИЧДП);

– в случае необходимости увеличить площадь промывочных окон коронок.

Для нормального процесса бурения характерны следующие признаки:

– постепенный рост давления нагнетания пены (по мере заполнения колонковой трубы керном);

– равномерный (без всплесков) выход пены на устье скважины;

– стабильный характер записи затрат мощности.

Увеличение этих параметров и снижение механической скорости проходки указывает на начало интенсивного износа алмазной коронки и выхода ее из строя.

Общие закономерности возникновения и развития критических ситуаций при использовании пены в качестве очистного агента практически полностью соответствуют таковым, возникающим при бурении с водой, но характеризуются быстротой развития.

Определение возможного количества повторных циклов использования первоначально приготовленного раствора композита заданной концентрации. Перед началом бурения готовят необходимое количество водного раствора композита заданной концентрации.

Спускают в скважину буровой снаряд и устанавливают, не доходя до забоя.

Включают дозировочный насос и пеногенераторную установку (компрессор, дожимное устройство).

Включают вращение бурового снаряда без нагрузки на забой, и после восстановления нормальной циркуляции и регулирования однородности выходящего из скважины потока пены определяют ее кратность и период полураспада без выбуренной породы.

После постановки снаряда на забой и подбора приемлемых режимных параметров бурения и нагнетания пены начинают углубку скважины. При начале выноса пеной шлама замеряют ее параметры, регулируя их подачей пенообразующего раствора и сжатого воздуха и поддерживая нормальный процесс

бурения с замкнутым циклом циркуляции.

В специальном журнале регистрируют:

– первоначальный объем пенообразующего раствора $V_{пор}$, м³;

– объемный расход пенообразующего раствора $Q_{пор}$, м³/мин;

– время работы пеногенераторной установки $T_{пгу}$, мин.

Количество повторных циклов использования первоначально приготовленного объема раствора композита заданной концентрации можно определить по формуле:

$$N = Q_{пор} \cdot T_{пгу} / V_{пор}.$$

Дополнительные технологические операции и мероприятия при бурении с пенами на основе композита. Приготовление пенообразующего состава повышенной или необходимой концентрации, определяемой для каждого конкретного случая, производится централизованно на базе бурового подразделения или в крайнем случае непосредственно на буровой.

Массовый расход композита G_k , кг, плотностью ρ_k , кг/м³, при условии 100 %-го содержания активного вещества в концентрате для приготовления 1 м³ пенообразующего раствора требуемой концентрации $C_{тр}$, %, определяется по формуле:

$$G_k = 0,01 \cdot \rho_k \cdot C_{тр}.$$

Для приготовления рабочей концентрации (от 0,25 до 1 %) композита $C_{раб}$ из определенного объема концентрированного его раствора V_k с концентрацией C_k потребуется объем воды V_v , м³:

$$V_v = C_k \cdot V_k / C_{раб}.$$

Подготовка всего комплекса применяемого оборудования заключается:

– тщательной проверкой его состояния и работоспособности;

– регулированием обратного клапана компрессора на требуемое давление нагнетания;

– регулированием подачи пенообразователя сбросовым вентилем на дозировочном насосе, уменьшением числа

ходов или отключением части плунжеров.

Для восстановления циркуляции (после спуска снаряда в скважину, включения компрессора, дозирочного и бурового насосов с дожимным устройством) в зависимости от глубины скважины и рабочего давления нагнетания требуется в пределах 10–90 мин.

Прекращение роста и пульсации давления нагнетания свидетельствует о восстановлении циркуляции и выходе пены из-под торца породоразрушающего инструмента. Можно начинать бурение.

Во всех случаях для эффективного и безаварийного бурения необходимо добиваться выхода на устье достаточно однородного потока пены и низкого уровня его пульсации.

Перед очередным наращиванием снаряда:

- в течение 5–10 мин осуществляют промывку скважины до появления пены, свободной от шлама;

- выключают дозирочный и дожимной насосы, компрессор;

- воздушную магистраль переключают на сброс;

- открывают вентиль на нагнетательной линии.

После уравнивания давления в поверхностной обвязке с атмосферным производят наращивание.

Перед подъемом снаряда после окончания рейса с целью исключения зашламования призабойной зоны и возникновения возможных осложнений скважина также промывается пеной до полного выноса из скважины выбуренного шлама. Для этого в зависимости от диаметра и глубины бурения может потребоваться 20–60 мин, но это необходимо делать.

Обратные клапаны, находящиеся под давлением, открывают только с помощью специального переходника. Остановка оборудования производится так же, как и при наращивании.

При работе с комплексами ССК и КССК (комплексы технических средств со съемными керноприемниками) при бурении по трещиноватым породам перед наращиванием и подъемом снаряда для сокращения времени на сброс давления пены в бурильных трубах их необходимо заполнять водой или раствором пенообразователя (200–300 л) с помощью дозирочного насоса, включив его на максимальную подачу.

Особенности бурения с пеной в осложненных условиях. Контроль над процессом бурения базируется на наблюдении за давлением нагнетания пены, состоянием и равномерностью потока выходящей из скважины пены, а также за моментом вращения бурового инструмента. Изменение этих параметров в ту или иную сторону говорит о нарушении технологического режима бурения из-за возникновения осложнений [6].

Резкое падение давления нагнетания свидетельствует о свободном проходе воздуха по стволу скважины из-за чрезмерной его подачи. В этом случае необходимо снизить расход воздуха и увеличить подачу пенообразующего раствора.

Медленное постепенное увеличение давления указывает на накопление шлама или свободной жидкости в призабойной зоне скважины. Необходимо увеличить скорость подачи воздуха.

Резкое возрастание давления нагнетания свидетельствует об обвале стенок скважины и образовании сальников на бурильных трубах или породоразрушающем инструменте. Нужно прекратить бурение и, расхаживая инструмент с одновременной подачей пенообразователя, попытаться возобновить циркуляцию.

Сильное загрязнение потока пены шламом и наличие в нем кусков породы является признаком кавернообразования в стволе скважины. Для его предотвращения необходимо прекратить бурение и

увеличить концентрацию пенообразователя. Если это не помогает, через кольцевое пространство прокачивают большую порцию пенообразующей смеси.

Величина момента вращения бурового инструмента указывает на тип проходимых осложнений (песок, глина, сланцы и пр.), начало сальникообразования и прихватоопасных ситуаций.

При низких температурах окружающей среды воздухопроводы, находящиеся на открытом воздухе, должны быть утеплены с целью не допустить замерзание образующегося в них конденсата.

При кратковременных остановках компрессор можно не выключать, обеспечивая регулированием вентилей на ресивере и в нагнетательной линии сжатую циркуляцию воздуха.

При использовании пены отпадает необходимость в применении антивибрационных смазок. Одновременное их применение недопустимо, так как пена при этом будет интенсивно разрушаться в стволе скважины.

Другими причинами прекращения циркуляции пены могут быть:

- негерметичность соединений буровых труб;
- закупоривание промывочных окон и отверстий в породоразрушающем инструменте;
- нарушение режима работы или неисправность устройства для образования и нагнетания пены.

Избежать серьезных осложнений при бурении с промывкой пеной можно путем использования достаточно полного комплекса контрольно-измерительных средств для контроля за процессом бурения: чувствительных манометров, расходомеров воздуха и жидкости, приборов Н-348, ОМ-40.

При малых и средних водопритоках необходимо увеличивать концентрацию композита в растворе, одновременно уменьшая расход пенообразующего раствора.

Водопритоки, поступающие в скважину, подразделяют на несколько видов:

- малые – дебитом 2–4 л/мин (0,12–0,24 м³/ч).
- средние – дебитом 40–60 л/мин (2,4–3,6 м³/ч).
- сильные – дебитом более 40–60 л/мин.

В условиях средних водопритоков бывает наиболее трудно удалять из скважины перед началом каждого рейса накапливающуюся в ней пластовую воду из-за повышения ее гидростатического давления. При применении компрессоров низкого давления с рабочим давлением 8–9 кгс/см² возможно бурить скважину лишь до глубины 150–200 м, но даже в этом случае необходимо использовать следующие дополнительные мероприятия:

- производить спуск бурового инструмента ступенчато с промежуточными промывками;
- устанавливать в колонне дополнительные обратные клапаны;
- осуществлять начальную аэрацию поступившей в скважину воды.

Значительно облегчается проходка таких зон с использованием дожимных устройств, позволяющих поднимать давление нагнетания пены до 50–60 кгс/см².

При сильных водопритоках применение пены часто становится неэффективным.

В условиях водопритоков необходимо учитывать химический состав поступающей в скважину воды с целью подбора новой рецептуры пенообразующего раствора, а также устойчивость стенок скважины с целью определения необходимости искусственного их закрепления обсадными трубами или тампонирующими составами.

При бурении в интенсивно трещиноватых, раздробленных породах и зонах разломов пена может поглощаться до полной потери циркуляции. В этом случае необходимо подобрать такую

концентрацию «Композита СП» и степень аэрации пены, при которых пластовое давление будет близко к гидростатическому. Степень аэрации в таких случаях может быть доведена до 200–300.

Особое внимание в данном случае необходимо уделять контролю за показаниями приборов Н-348 и ОМ-40, предупреждая приговорную ситуацию.

При бурении в условиях кавернообразования и осыпания пород, о чем свидетельствует сильное загрязнение пены, выходящей из скважины, необходимо прекратить бурение, увеличить концентрацию «Композита СП» в растворе и возобновить промывку скважины до полной ее очистки от шлама.

При проходке многолетнемерзлых пород с применением пен желательнее использовать колонковый способ бурения, так как при этом образуется меньше шлама и он имеет более мелкий фракционный состав, что позволяет уменьшать подачу очистного агента.

При выборе породоразрушающего инструмента предпочтение следует отдавать коронкам с развитой промывочной системой, что особенно важно при разбуривании мерзлых глинистых разностей пород.

Общие закономерности возникновения и развития критических ситуаций при использовании пены в качестве очистного агента практически полностью соответствуют таковым, возникающим при бурении с промывкой буровым раствором, но характеризуются быстротой развития.

Таким образом, для оперативного распознавания подобных ситуаций и своевременного устранения способствующих этому причин необходимо:

– повышенное внимание обслуживающего персонала к изменению основных технологических параметров, регистрируемых имеющейся контрольно-измерительной аппаратурой, и поддержание ее в исправном состоянии;

– использование приборов, регистрирующих и контролирующих газожидкостное соотношение в пене (степень аэрации), закачиваемой в скважину и выходящей из нее.

Сильное загрязнение пены, выходящей из скважины, свидетельствует о бурении в условиях кавернообразования и осыпания пород. При этом необходимо прекратить бурение, увеличить концентрацию композита в растворе и возобновить промывку скважины до полной ее очистки от шлама.

В связи со сжимаемостью газожидкостной смеси процесс возобновления циркуляции смеси в скважине несколько растянут во времени по сравнению с промывочными жидкостями. Поэтому циркуляцию можно считать восстановленной, если давление в нагнетательной линии после постепенного роста начинает уменьшаться или стабилизируется. Например, при глубине скважины 400 м восстановление циркуляции происходит за 15–20 мин.

Быстрое возрастание давления в нагнетательной линии означает, что буровой снаряд зашламован. Восстановление циркуляции осуществляется расхождением снаряда гидравликой бурового станка. Если в процессе бурения начинает постепенно возрастать давление нагнетания, то это обычно указывает на образование шламового сальника или на поступление воды в скважину. Поступление из скважины тонкой водянистой пены указывает на вскрытие скважиной водоносного горизонта. В этом случае необходимо увеличить концентрацию поверхностно-активных веществ и подачу воздуха или расход пенообразующего раствора (жидкой фазы) для создания противодавления. Необходимо определить химический состав пластовой воды и изменить процентное содержание поверхностно-активных веществ или пенообразующий раствор для получения устойчивого потока пены.

Во избежание зашламования породоразрушающего инструмента перед каждым наращиванием снаряда необходимо промыть скважину в течение 5–7 мин, а перед подъемом – 10–15 мин.

Если в компоновку бурового снаряда не включены обратные клапаны, то сбрасывать давление следует постепенно через предохранительный клапан бурового насоса, так как при резком сбросе давления в скважине может произойти обвал стенок скважины и активация водоносных горизонтов. То же происходит при многократной замене в процессе бурения пеной жидкостью и наоборот [7].

Для представительности кернового материала и полноты геологической информации важно, какой качественный характер имеет износ керна в каждом конкретном случае. В общем виде износ истиранием и объемным дроблением может быть равномерным или избирательным. При равномерном износе пропорционально и равномерно изнашиваются как вмещающая горная порода, так и включенные в нее рудные минералы.

При бурении с пеной процент выхода керна выше, чем при бурении с промывочной жидкостью. Здесь играет роль улучшение смазочных свойств раствора, увеличение скорости проходки при сохранении сравнительно невысокой частоты вращения. Положительный эффект дает введение в раствор смазочных добавок, например омыленного талового пека.

Более подробно возможные ситуации и меры предупреждения аварий приведены в табл. 5.

При применении газожидкостных смесей обвязка устья скважины должна исключать возможность проникновения в помещение буровой установки пены. На воздухопроводе должны быть установлены манометр, вентиль для регулирования подачи воздуха в скважину и предохранительный клапан с отводом. Предохранительный клапан должен

срабатывать при давлении, превышающем рабочее на 15 % [8, 9].

Запрещается прекращать подачу воздуха путем перегибания шланга и отогревать замерзшие шланги открытым огнем. При избыточном давлении воздуха в нагнетательной магистрали нельзя наращивать буровой снаряд и отвинчивать пробку сальника.

Присоединение шлангов к напорной магистрали, компрессору, рабочей трубе, а также соединение шлангов следует производить при закрытом вентиле магистрали компрессора.

Мероприятия по охране окружающей среды при бурении с газожидкостными смесями должны предусматривать изоляцию вскрываемых водоносных горизонтов от загрязнения и заражения; не допускается слив использованной промывочной жидкости в открытые водоемы и непосредственно в почву. При бурении с газожидкостными смесями должны быть предусмотрены средства пеногашения для организации замкнутого цикла циркуляции [10, 11].

При бурении с пеной глубоких скважин, имеющих водопритоки, необходимо применять трехфазную пену (вспененный полимерный малоглинистый раствор) с обязательным перекрытием водоносных бурения с газожидкостной смесью.

При углублении ствола с использованием пен после спуска обсадных колонн удаляют буровой раствор и перед разбуриванием цементного стакана создают нормальную циркуляцию рабочего агента с постоянным и равномерным выходом пены на поверхность. В это время удаляется активная жидкость. К разбуриванию цементного стакана приступают после стабилизации давления потока пены.

Заключение

Предлагаемое оборудование для получения пен и схемы поверхностной обвязки устья скважин при геологоразведочном бурении позволят обеспечить

Таблица 5

Технологические ситуации при бурении с пеной
и меры предупреждения возникновения аварий

Table 5

Technological situations under foam drilling
and accident prevention measures

Группы ситуаций	Типичные ситуации	Характерные особенности изменения информационных показателей	Управляющие воздействия
Ситуации нормального процесса углубки скважин	Нормальный процесс углубки	Стабильный уровень записи N , V_M и P	Продолжать углубку, поддерживая стабильными N , V_M и подачу пены
	Повышение (снижение) категории буримости горных пород	N и P увеличиваются (уменьшаются), V_M уменьшается (увеличивается) и стабилизируется на новом уровне	Продолжать углубку, поддерживая N , V_M стабильными на новом уровне при соответствующей подаче пены
Ситуации предаварийного процесса углубки скважины	Изменение фактической осевой нагрузки из-за погрешностей в работе механизма подачи (отставание V_M от скорости подачи)	После каждого перекрепления шпинделя увеличение N и V_M , то есть большому уровню N соответствует более высокая V_M	Привести в соответствие V_M и скорость подачи путем увеличения C при постоянном контроле за подачей пены
	Увеличение нагрузки из-за неправильного перекрепления шпинделя	Увеличение N , уменьшение (возможно до нуля) механической скорости	При перекреплении осуществить разгрузку бурильной колонны путем создания достаточного поддерживающего усилия лебедкой
	Заполирование алмазов из-за недостаточной осевой нагрузки	Постепенное снижение N и V_M	Осуществить заточку кратковременным увеличением C на 2000–4000 кг в течение 5–15 с
	Процесс углубки скважины по трещиноватым породам	Запись N нестабильная, периодическое уменьшение V_M и увеличение P	Снизить C и n на 15–20 % для нормализации N и V_M
	Вибрация бурового снаряда	Симметричное отклонение N от среднего уровня. Амплитуда записи соответствует интенсивности вибрации снаряда	Уменьшить C и n до стабилизации уровня записи N и V_M при увеличении подачи пены
	Зависание бурового снаряда из-за натяжения страховочного каната, «заедания» ведущей штанги в шпинделе	Интенсивное уменьшение N и V_M	Ликвидировать натяжение страховочного каната, «заедание» ведущей штанги в шпинделе
	Реализация мощности двигателя станка	Увеличение N выше номинального уровня загрузки двигателя; нестабильный характер записи N ; постепенное уменьшение V_M	Перейти на более низкую n
	Интенсивный тепловой износ породоразрушающего инструмента	Пикообразный, нестабильный характер записи N высокая V_M (больше	Снизить C . Если получена информация о выходе коронок из строя, приподнять

		установленных предельных значений для данных пород и типов коронок)	снаряд, остановить вращение, поднять снаряд
	Предприжоговая ситуация из-за утечки пены в снаряде или перекрытия промывочных каналов в коронке	Увеличение N в течение более чем 15–20 с. Давление пены уменьшается или соответственно увеличивается	Приподнять снаряд без остановки вращения. Остановить вращение. Сбросить давление в снаряде и поднять его. Устранить возможную причину возникновения ситуации
	Выход породоразрушающего инструмента из строя	Повышение N , затем увеличение P и уменьшение V_M	Приподнять снаряд, остановить его вращение, сбросить давление в снаряде и поднять его
	Подклинивание бурового снаряда	Увеличение N , при этом P увеличивается, а V_M уменьшается	Приподнять снаряд, углубку скважины продолжать при нормализации процесса, при повторении ситуации прекратить рейс
	Самозаклинивание керна	Нестабильный уровень N , ему соответствует изменение V_M , P периодически возрастает	Приподнять снаряд, остановить вращение. Если P не уменьшается, поднять лебедкой снаряд на высоту ведущей штанги. Периодически резко опуская и задерживая снаряд, так, чтобы коронка не касалась забоя, протолкнуть керн внутрь колонковой трубы. Момент проталкивания керна определяется по росту P при спуске бурильных труб
	Отказ компрессора или бустера (дожимного устройства)	Нулевое показание P и расходомеров	Приподнять снаряд, остановить его вращение. Сбросить давление в снаряде. Исправить оборудование
Аварийные ситуации в процессе углубки скважины	Обрыв бурового снаряда	Уменьшение N , снижение V_M и P	Приподнять снаряд, остановить его вращение. Сделать замер ведущей бурильной трубы и приступить к ликвидации аварии
	Прижог алмазного породоразрушающего инструмента	Интенсивное пикообразное увеличение N с периодическим снижением до первоначального с большей, чем при предприжого, амплитудой	Остановить вращение снаряда, предварительно приподняв его. Ликвидировать аварию
	Прихваты бурового снаряда в желобах	Периодические резкие колебания N и P относительно средней линии и в сторону увеличения. Повышение N без изменения P и без сохранения выхода пены на поверхность	Подорвав снаряд, остановить вращение. Приступить к ликвидации аварии. Принять меры по ликвидации желоба

Примечание. N – мощность на бурение; P – давление нагнетания; C – осевая нагрузка; V_M – механическая скорость бурения; n – частота вращения.

Note. N – drilling power; P – discharge pressure; C – axial load; V_M – mechanical speed of drilling; n – rotational speed.

оптимальное регулирование расхода воздуха, пенообразователя и получение необходимого давления нагнетания пены, то есть создать наиболее оптимальные режимы бурения на экологически чистых разрушаемых пенах.

Применение легко разрушаемых в статике пен обеспечит замкнутый цикл циркуляции, что в первую очередь повысит культуру производства.

При этой технологии не загрязняется место проведения буровых работ, снижаются необоснованные затраты

дорогостоящих реагентов-пеногасителей, обеспечивается повторное применение пенообразующего раствора, исключается применение дополнительных технических средств и специального оборудования для пеногашения, сокращается время сооружения скважины и себестоимость проводимых работ. Также снижается аэрогидродинамическое давление, что облегчает отделение выбуренных частиц породы от забоя, и тем самымкратно увеличивается механическая скорость бурения.

Библиографический список

1. Заливин В.Г. Технология бурения скважин на саморазрушающихся пенах // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 1 (44). С. 50–54.

2. Заливин В.Г. Оборудование, обеспечивающее цикл бурения скважин пеной на основе «Композита СП» // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Технологии разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41, № 3. С. 62–77. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77.

3. Яковлев А.И., Коваленко В.И. Бурение скважин с пеной на твердые полезные ископаемые. Л.: Недра, 1987. 128 с.

4. Бронзов А.С. Бурение скважин с использованием газообразных агентов. М.: Недра, 1989. 288 с.

5. Мураев Ю.Д. Газожидкостные системы в буровых работах. СПб.: Изд-во Санкт-Петербургского государственного горного института им. Г.В. Плеханова, 2004. 123 с.

6. Кирсанов А.И., Крылов Г.А., Нефедов В.П. Пены и их использование в бурении. М.: Изд-во ВИЭМС, 1980. 60 с.

7. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1983. 264 с.

8. ASME Shale Shaker Committee. Drilling Fluids Processing Handbook. Amsterdam: Elsevier, 2011. 700 p.

9. Angel R.R. Air Drilling Handbook. Air Drilling Division of MI Drilling Fluids. Gulf Publishing Co., October 1958. 453 p.

10. Рогачев М.К., Стрижнев К.В. Борьба с осложнениями при добыче нефти. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2006. 295 с.

11. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.

References

1. Zalivin V.G. Self-destructive foam-based drilling technology. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits], 2014, no. 1 (44), pp. 50–54. (In Russ.).

2. Zalivin V.G. Equipment for well foam drilling based on "Composite SP". *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* [Proceedings of the Siberian Department of the

Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits], 2018, vol. 41, no. 3, pp. 62–77. (In Russ.). DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-3-62-77.

3. Yakovlev A.I., Kovalenko V.I. *Burienie skvazhin s penoi na tverdye poleznye iskopaemye* [Foam drilling of wells for solid minerals]. Leningrad: Nedra Publ., 1987, 128 p. (In Russ.).

4. Bronzov A.S. *Burienie skvazhin s ispol'zovaniem gazoobraznykh agentov* [Well drilling with the use of gaseous agents]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 288 p. (In Russ.).

5. Muraev Yu.D. *Gazozhidkostnye sistemy v burovyykh rabotakh* [Gas-liquid systems in drilling

operations]. Saint-Petersburg: Saint-Petersburg State Mining Institute named after G.V. Plekhanov Publ., 2004, 123 p. (In Russ.).

6. Kirsanov A.I., Krylov G.A., Nefedov V.P. *Peny i ikh ispol'zovanie v burenii* [Foams and their use in drilling]. Moscow: All-Union Research Institute of Economics of Mineral Raw Materials and Geological Exploration named after N.M. Fedorovsky Publ., 1980, 60 p. (In Russ.).

7. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Foams. Theory and practice of their production and destruction]. Moscow: Khimiya Publ., 1983, 264 p. (In Russ.).

Критерии авторства

Заливин В.Г. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Заливин Владимир Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: ZalivinVG@yandex.ru*

8. ASME Shale Shaker Committee. *Drilling Fluids Processing Handbook*. Amsterdam: Elsevier, 2011, 700 p.

9. Angel, R.R. *Air Drilling Handbook*. Air Drilling Division of MI Drilling Fluids. Gulf Publishing Co., October 1958, 453 p.

10. Rogachev M.K., Strizhnev K.V. *Bor'ba s oslozhnennyami pri dobyche nefti* [Fighting complications in oil production]. Moscow: "Nedra-Biznescentr" LLC Publ., 2006, 295 p. (In Russ.).

11. Ryazanov Y.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg: Letopis' Publ., 2005, 664 p. (In Russ.).

Authorship criteria

Vladimir G. Zalivin has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Vladimir G. Zalivin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: ZalivinVG@yandex.ru*

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-78-85>

Результаты исследования деформационных процессов при бурении изотропных горных пород алмазным буровым инструментом

© П.С. Пушмин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данной статьи – анализ результатов проведенных аналитических и экспериментальных исследований процесса бурения изотропной горной породы алмазным породоразрушающим инструментом для представления в виде графических зависимостей взаимосвязи между основными параметрами процесса алмазного бурения и прочностными характеристиками твердых горных пород. В качестве исходного материала для работы приняты во внимание гипотезы, подкрепленные аналитическими расчетами и многочисленными экспериментальными исследованиями по разбурированию в стендовых условиях кафедры нефтегазового дела Иркутского национального исследовательского технического университета блоков горных пород различной твердости алмазным породоразрушающим инструментом. Результаты исследований обработаны при помощи пакета MS Office Excel и представлены в виде графических зависимостей. В результате построены и проанализированы графические зависимости, позволяющие наглядно оценить взаимосвязи между основными техническими (диаметр породоразрушающего инструмента, число одновременно работающих резцов), технологическими (усилие резания-скалывания, осевая нагрузка, механическая скорость бурения, тип очистного агента и др.) параметрами процесса бурения и основными прочностными характеристиками (разрушающее напряжение, общий коэффициент сопротивления) твердых изотропных горных пород. Экспериментально доказана эффективность применения очистного агента, содержащего поверхностно-активные вещества, при бурении твердых горных пород алмазным инструментом. Проведенный анализ позволяет расширить имеющиеся представления о деформационных процессах, происходящих при бурении изотропных горных пород алмазным породоразрушающим инструментом. На основании представленных результатов могут быть составлены рекомендации по повышению эффективности алмазного бурения твердых пород. Результаты работы могут быть полезны для производственных геологоразведочных организаций, а также применены в учебном процессе.

Ключевые слова: горная порода, процесс разрушения, алмазный инструмент, механическая скорость бурения

Информация о статье: Дата поступления 13 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Пушмин П.С. Результаты исследования деформационных процессов при бурении изотропных горных пород алмазным буровым инструментом. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 78–85. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-78-85.

Research results of deformation processes when drilling isotropic rocks by diamond drilling tools

© Pavel S. Pushmin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of this article is to analyze the results of the conducted analytical and experimental studies of the drilling process of isotropic rock with diamond rock cutting tools and present the relationships between the main parameters of diamond drilling and strength characteristics of solid rocks in the form of curves. The input material for the research is hypotheses supported by analytical calculations and numerous experimental studies on drilling-out the blocks of rocks of different hardness by the diamond rock cutting tool in the test conditions of the Department of Oil and Gas Business of the Irkutsk National Research Technical University. The research results

have been processed using the MS Office Excel package and presented in the form of graphical dependencies. The constructed and analyzed curves allow visual estimation of the relationship between the main technical (diameter of the rock-cutting tool, number of simultaneously working cutters), technological (cutting-shearing force, axial load, mechanical drilling speed, type of a cleaning agent, etc.) drilling parameters and the main strength characteristics (breaking stress, total resistance coefficient) of solid isotropic rocks. The effectiveness of the cleaning agent containing surfactants in the drilling of solid rocks with diamond tools has been experimentally proved. The performed analysis allows to widen the existing understanding of the deformation processes occurring when drilling isotropic rocks with diamond rock-cutting tools. On the basis of the presented results recommendations can be made to improve the efficiency of diamond drilling of solid materials. The obtained results can be useful for industrial exploration organizations, as well as applied in the educational process.

Keywords: rock, destruction process, diamond tools, mechanical drilling speed

Information about the article: Received February 13, 2019; accepted for publication March 12, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Pushmin P.S. Research results of deformation processes when drilling isotropic rocks by diamond drilling tools. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 78–85. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-78-85.

Введение

Настоящее исследование базируется на опубликованной ранее схеме деформации твердой горной породы алмазным резцом породоразрушающего инструмента [1]. Аналитические зависимости, основанные на анализе механики деформирования горной породы, а также некоторые результаты экспериментальных исследований, полученные при разбурировании блоков горных пород алмазным инструментом, представлены в работе [2].

Методы исследования

Результаты многочисленных экспериментальных работ по разбурированию в стендовых условиях блоков горных пород различной твердости алмазным породоразрушающим инструментом, подкрепленные аналитическим исследованием механики деформирования твердых изотропных пород, обработаны при помощи пакета MS Office Excel и представлены в данной работе в виде графических зависимостей.

Результаты

Как известно, механическая скорость углубки породоразрушающего

инструмента является одним из основных показателей эффективности процесса разрушения горной породы в процессе бурения. В свою очередь, разрушение породы – не что иное как последовательная совокупность деформационных процессов, происходящих в твердом теле (горной породе) в результате внешних силовых воздействий и, соответственно, возникновения и роста в теле разрушающих напряжений¹.

Взаимосвязь между скоростью протекания деформационных процессов, происходящих в изотропной горной породе, и механической скоростью бурения представлена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, рост интенсивности деформационных процессов (скорости деформации) в твердой горной породе приводит к повышению механической скорости бурения. При этом интенсивность развития деформационных процессов в породе в процессе бурения напрямую связана с типом применяемого очистного агента [3, 4]. В частности, использование в качестве очистного агента жидкости с добавлением поверхностно-активных веществ приводит к повышению

¹Нескоромных В.В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ: учеб. пособие. Красноярск: Изд-во СФУ, 2012. 297 с. /

Neskoromnykh V.V. Rock destruction at exploration works. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ., 2012. 297 p.



Рис. 1. Зависимости между механической скоростью бурения, усилием резания-скалывания и скоростью деформации твердой горной породы
Fig. 1. Relationship between the mechanical speed of drilling, cutting-shearing force and the strain rate of the solid rock

интенсивности развития деформаций в породе. В условиях роста разрушающего усилия (усилия резания-скалывания) со стороны резцов породоразрушающего инструмента и соответствующего повышения интенсивности деформационных процессов наблюдаются максимальные (в пределах исследования) значения механической скорости бурения вследствие снижения прочностных характеристик горной породы.

Согласно известной схеме деформирования твердой горной породы алмазным резцом, суммарное воздействие на резец осевого и тангенциального усилий приводит к образованию результирующей нагрузки, направление вектора которой определяется геометрическим сложением двух векторов названных сил. В связи с этим алмазный резец начинает контактировать с горной породой своей передней гранью. Данное обстоятельство вызывает смещение области максимальных касательных напряжений на переднюю грань алмазного резца на некоторый угол, определенный вектором результирующего усилия [5].

Повышение осевого усилия на алмазный резец при определенном значении тангенциального усилия приводит к увеличению глубины его внедрения в породу, а соответственно, и глубины борозды разрушения, что сопровождается повышением усилия сопротивления породы разрушению со стороны передней грани резца и приводит к увеличению усилия резания-скалывания горной породы. При этом повышению усилия резания-скалывания и уменьшению линейной скорости перемещения резца способствует увеличение общего коэффициента сопротивления горной породы. Данные зависимости приведены на рис. 2.

При нагружении работающих на забое алмазных резцов разных размеров равной нагрузкой величина напряжений под торцом единичного алмаза снижается по мере уменьшения его диаметра, что может способствовать эффективности разрушения твердой изотропной горной породы.

Применение в качестве очистного агента жидкостей, содержащих поверхностно-активные вещества, приводит к

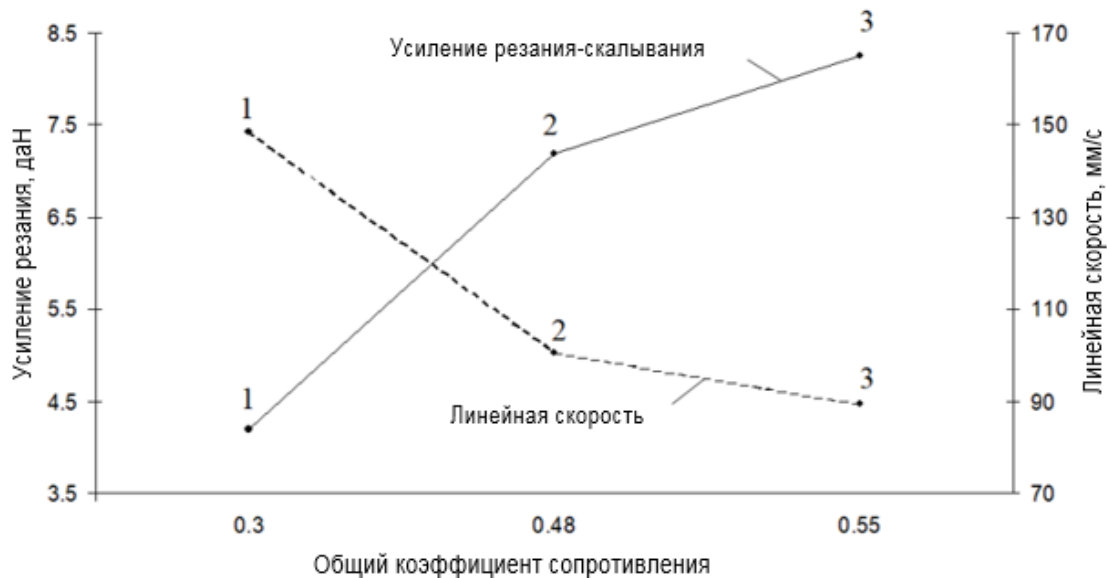


Рис. 2. Зависимости усилия резания-скалывания и линейной скорости перемещения реза от коэффициента сопротивления:

1 – активный очистной агент; 2 – техническая вода; 3 – сухое состояние

Fig. 2. Dependences of the cutting-shearing force and linear speed of the cutter travel on the resistance coefficient:

1 – active cleaning agent; 2 – process water; 3 – dry state

увеличению скорости резания-скалывания, особенно при больших диаметрах резцов, что объясняется способностью молекул активных веществ, проникая в микротрещины породы, снижать твердость и жесткость породы на микроуровне и увеличивать пластические свойства породы [6]. При этом глубина борозды разрушения будет тем больше, чем выше линейная скорость перемещения реза. В частности, согласно графикам, приведенным на рис. 3, повышение осевой нагрузки на единственный алмазный резец от 6 до 15 даН способствует росту его линейной скорости.

Как отмечено в работах [7, 8], механическая скорость бурения как показатель эффективности протекания деформационных процессов зависит не только от внешних силовых факторов разрушения, но и от числа одновременно работающих алмазных резцов в линии резания породоразрушающего инструмента. Проведенные аналитические расчеты позволяют представить данное соотношение в виде графиков на рис. 4.

Очевидно, при работе алмазного инструмента, оснащенного большим количеством резцов (коронки и долота большого диаметра), число лидирующих алмазов в линии резания будет соответственно больше, чем у коронок меньшего размера [9, 10]. При этом можно наблюдать интересную зависимость между механической скоростью бурения и числом одновременно работающих алмазных резцов (см. рис. 4).

С увеличением числа одновременно работающих резцов породоразрушающего инструмента до определенного значения механическая скорость повышается практически пропорционально, после чего происходит медленный спад скорости до первоначального значения в пределах исследования. Следовательно, рациональными можно считать значения механической скорости бурения, полученные при небольшой интенсивности повышения мощности на разрушение горной породы коронками малого диаметра (46, 59 мм) со средними для данных инструментов размерами разрушающих элементов.

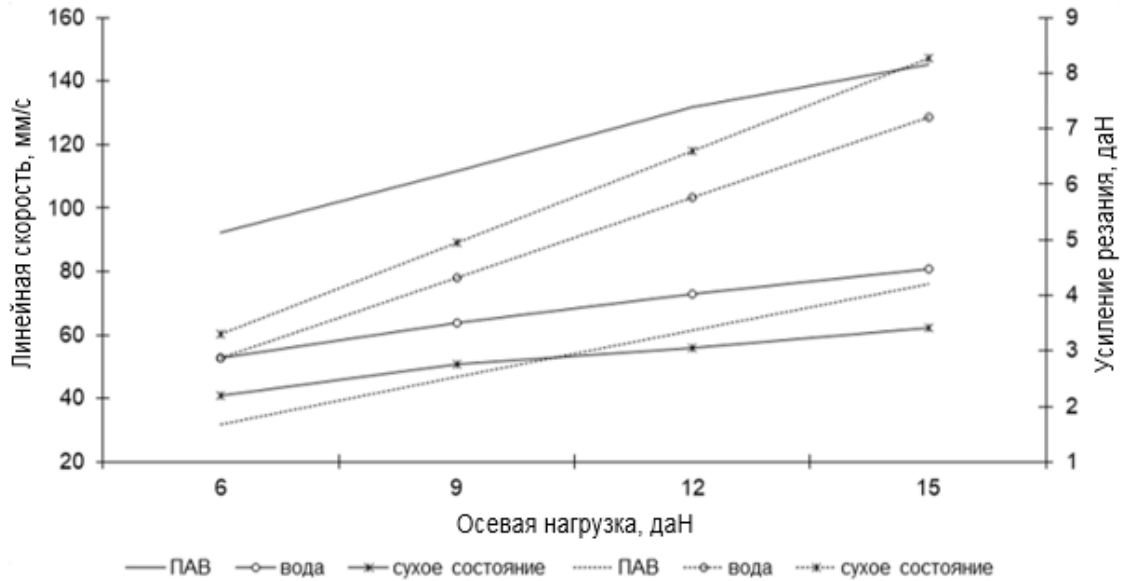


Рис. 3. Зависимости усилия резания-скалывания и линейной скорости перемещения резца от осевого усилия в различных средах

Сплошные линии – линейная скорость перемещения резца;
пунктирные линии – усилие резания-скалывания

Fig. 3. Dependences of the cutting-shearing force and linear speed of the cutter travel on the axial force in different environments

Continuous lines – linear speed of the cutter travel;
dashed lines – cutting-shearing force

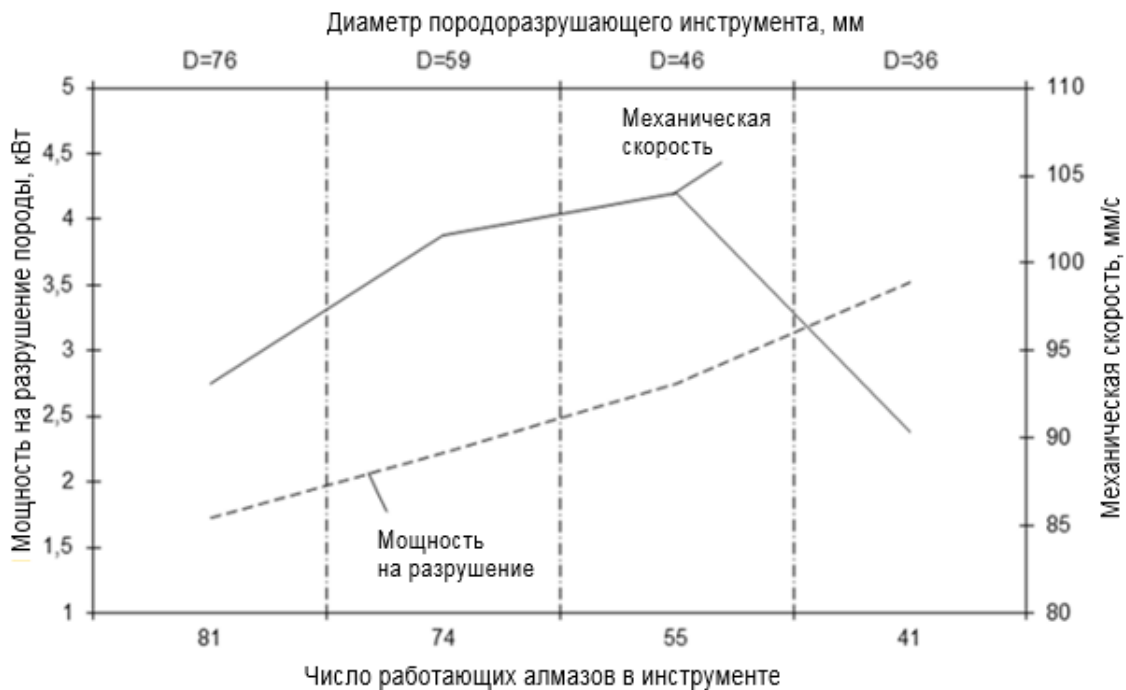


Рис. 4. Зависимости между мощностью на разрушение твердой горной породы, механической скоростью бурения и числом работающих алмазных резцов в инструменте различного диаметра

Fig. 4. Dependences between the power of solid rock destruction, mechanical speed of drilling and the number of diamond cutters in operation in the tools of various diameter

Зависимости напряжения в горной породе при ее деформировании и механической скорости бурения от глубины борозды разрушения в разных средах (вода, жидкость с поверхностно-активным веществом) приведены на рис. 5. Как видно из приведенных зависимостей, в процессе деформирования породы в среде с поверхностно-активным веществом по мере увеличения результирующего усилия и глубины борозды разрушения напряжения в горной породе на начальном интервале уменьшаются, затем при определенном усилии напряжения в породе начинают увеличиваться. При этом механическая скорость непрерывно возрастает.

При использовании в качестве промывочного агента воды напряжения, имеющие большие, чем в первом случае, величины, до определенного момента уве-

личиваются, затем уменьшаются. Механическая скорость также имеет тенденцию к возрастанию.

Интенсивность увеличения механической скорости при повышении глубины борозды разрушения (см. рис. 5) будет выше при использовании в качестве очистного агента жидкости с поверхностно-активным веществом. Меньшие величины механической скорости можно наблюдать при использовании в качестве очистного агента технической воды.

Неоднозначность зависимости напряжения при деформировании изотропной горной породы от величины результирующего усилия (см. рис. 5), очевидно, можно объяснить скачкообразностью процесса разрушения породы, связанной с цикличностью процесса нагружения – разгрузки в деформируемой области породы [11].

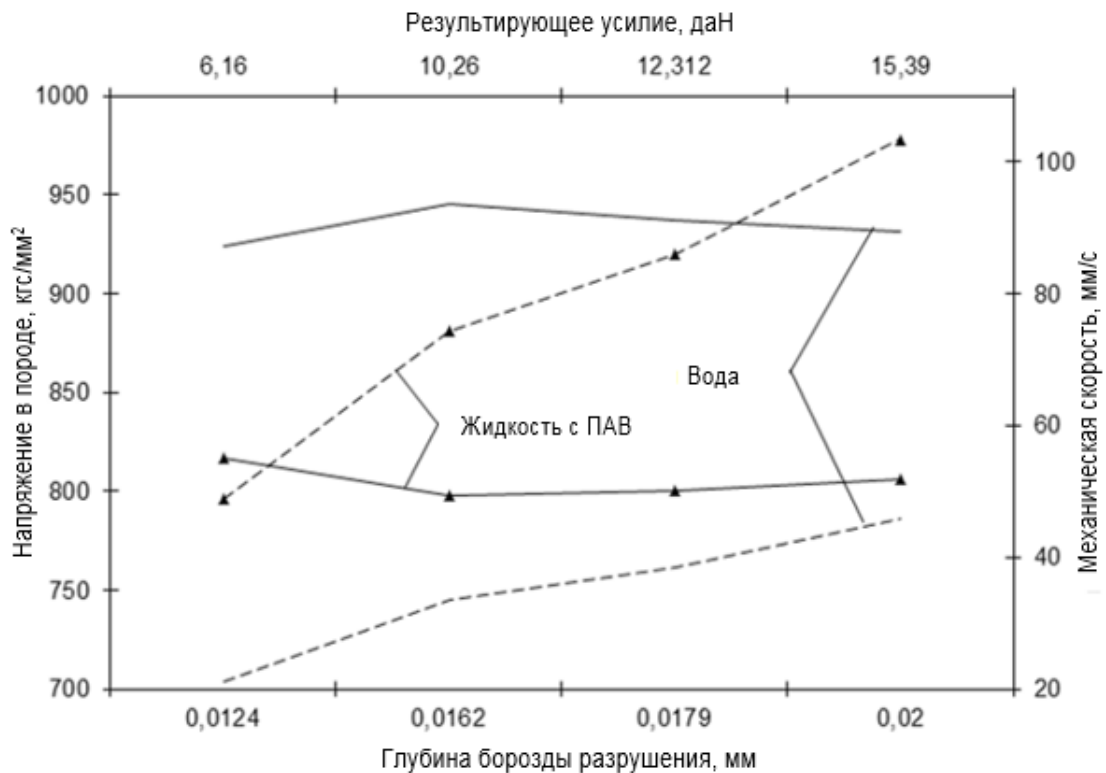


Рис. 5. Зависимости напряжения в горной породе (сплошные линии) и механической скорости бурения (пунктирные линии) от глубины борозды разрушения и результирующего усилия в различных средах
Fig. 5. Dependences of rock stress (continuous lines) and mechanical speed of drilling (dashed lines) on the depth of the destruction furrow and the resultant force in various environments

Заключение

Представленные в работе зависимости между основными техническими, технологическими параметрами процесса бурения и прочностными характеристиками изотропных горных пород, полученные на основании аналитических и экспериментальных исследований, поз-

воляют расширить знания о деформационных процессах, происходящих при бурении твердых пород, а также могут являться основой для составления рекомендаций по повышению эффективности бурения алмазным породоразрушающим инструментом.

Библиографический список

1. Пушмин П.С., Нескоромных В.В. Аналитическое исследование влияния усилия резания-скалывания и коэффициента сопротивления на процесс разрушения горной породы алмазным резцом // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. стат. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2003». Вып. 3. Иркутск, 2003. С. 212–217.

2. Пушмин П.С., Нескоромных В.В., Ламбин А.И. Экспериментальные исследования буримости анизотропной горной породы // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: сб. стат. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2005». Вып. 5. Иркутск, 2005. С. 310–316.

3. Пушмин П.С., Романов Г.Р. Особенности механизма разрушения твердой горной породы алмазным породоразрушающим инструментом // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 5 (48). С. 59–64.

4. Рязанов Я.А. Энциклопедия по буровым растворам. Оренбург: Летопись, 2005. 664 с.

5. Богданов Р.К., Загора А.П., Исонкин А.М. Некоторые представления механизма работы алмазного резца буровой коронки // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые: межвуз. науч. темат. сб. Вып. 25. Екатеринбург: Изд-во УГ-ГГА, 2003. С. 71–80.

6. Евсеев В.Д., Петухов М.В., Самохвалов М.А. Импульсные токи с забоя скважины –

источник информации о свойствах горных пород // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308, № 6. С. 39–43.

7. Зайцев В.И., Карпиков А.В., Че В.В. Эффективность использования долот PDC // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2014. № 5 (48). С. 58–66.

8. Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225–230.

9. Спиринов В.И., Будюков Ю.Е., Кубасов В.В. Алмазный породоразрушающий инструмент для бурения скважин предельно малого диаметра на нефть и газ // Инженер-нефтяник. 2013. № 4. С. 24–26.

10. Пушмин П.С. Некоторые причины нарушения устойчивости стенок скважин // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 2 (55). С. 61–65.

11. Буглов Н.А., Карпиков А.В., Гриб П.С. Стендовые исследования характера закрепления на забое нижней части буровой колонны при алмазном бурении геологоразведочных скважин // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2011. № 2 (39). С. 197–205.

References

1. Pushmin P.S., Neskromnykh V.V. *Analyticheskoe issledovanie vliyaniya usiliya rezaniya-skalivaniya i koeffitsienta soprotivleniya na protsess razrusheniya gornoj porody almaznym reztsom* [Analytical study of the effect of the cutting-shearing force and the resistance coefficient of the rock destruction by a diamond cutter]. *Sb. stat. Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. "Geonauki-2003" "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy"*

[Collection of articles of the all-Russian scientific and technical conference with international participation "Geosciences-2003" "Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research"]. Iss. 3. Irkutsk, 2003, pp. 212–217. (In Russ.).

2. Pushmin P.S., Neskromnykh V.V., Lambin A.I. *Eksperimental'nye issledovaniya burimosti anizotropnoi gornoj porody* [Experimental study of anisotropic rock drillability]. *Sb. stat. Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. "Geonauki-*

2005" "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy" [Collection of articles of the all-Russian scientific and technical conference with international participation "Geosciences-2005" "Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological research"]. Iss. 5. Irkutsk, 2005, pp. 310–316. (In Russ.).

3. Pushmin P.S., Romanov G.R. Features of the mechanism of solid rock breaking by a diamond rock-cutting tool. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 5 (48), pp. 59–64. (In Russ.).

4. Ryazanov Y.A. *Entsiklopediya po burovym rastvoram* [Encyclopedia of drilling fluids]. Orenburg: Letopis' Publ., 2005, 664 p. (In Russ.).

5. Bogdanov R.K., Zakora A.P., Isonkin A.M. *Nekotorye predstavleniya mekhanizma raboty almaznogo reztsa burovoi koronki* [Some representations of the operation mechanism of the drill bit diamond cutter]. *Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii bureniya skvazhin na tverdye poleznye iskopaemye* [Improving equipment and technology of drilling wells for solid minerals]. Iss. 25. Ekaterinburg: Ural State Mining University Publ., 2003, pp. 71–80. (In Russ.).

6. Evseev V.D., Petukhov M.V., Samokhvalov M.A. Pulse currents with the hole bottom as the source of information about rock properties. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2005, vol. 308, no. 6, pp. 39–43. (In Russ.).

7. Zaitsev V.I., Karpikov A.V., Che V.V. Application efficiency of PDC bits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii*

estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2014, no. 5 (48), pp. 58–66. (In Russ.).

8. Tret'yak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to designing highly efficient rock-breaking tool. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2017, no. 8, pp. 225–230. (In Russ.).

9. Spirin V.I., Budyukov Yu.E., Kubasov V.V. *Almaznyi porodorazrushayushchii instrument dlya bureniya skvazhin predel'no malogo diametra na nef' i gaz* [Diamond rock breaking tool for drilling wells of a very small diameter for oil and gas]. *Inzhenerneftyanik* [Petroleum Engineer], 2013, no. 4, pp. 24–26. (In Russ.).

10. Pushmin P.S. Some causes of well wall stability loss. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 2 (55), pp. 61–65. (In Russ.).

11. Buglov N.A., Karpikov A.V., Grib P.S. The results of experimental-theoretical studies on establishing conditions for fastening bottom section of string when using series diamond bits. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2011, no. 2 (39), pp. 197–205. (In Russ.).

Критерии авторства

Пушмин П.С. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Пушмин Павел Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: pps@istu.edu

Authorship criteria

Pavel S. Pushmin has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Pavel S. Pushmin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: pps@istu.edu

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-86-92>

Определение давления разрыва обсадных колонн при бурении скважин на море

© В.И. Зайцев

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель данной статьи – обратить особое внимание на величину давления разрыва обсадной колонны при бурении на нефть и газ на шельфе и море. При бурении в акватории эти колонны испытывают дополнительные нагрузки по сравнению с бурением на суше. Без учета особенностей бурения на море возможны осложнения и даже аварии. Ремонт же обсадных колонн при подводном устье скважины с привлечением нескольких вспомогательных судов и ремонтного оборудования очень сложен и требует огромных затрат. Сложность ремонтных работ на Севере и Дальнем Востоке Российской Федерации усугубляется суровыми и в большую часть года ледовыми условиями. Информации по этому вопросу в отечественной литературе практически нет. Автором проведен уточненный аналитический расчет давления разрыва обсадной колонны при подводном расположении устья скважины. Предлагается для определения давления разрыва обсадных колонн вносить поправки на глубину шельфа (моря) и высоту стола ротора над средним уровнем поверхности шельфа (моря). Особенно это важно при бурении на больших глубинах моря, где давление морской воды значительно возрастает. В статье приведена выведенная эмпирическая формула определения величины падения в штуцерной линии при включении штуцера в работу. Зная гидравлические потери в штуцерной линии, можно откорректировать затрубное давление в обсадной колонне на величину падения давления. Уточненный расчет давления разрыва обсадной колонны при бурении на шельфе (море) аналитическим способом является важной задачей, так как дает действительное его значение, что поможет предотвратить возможные осложнения и аварии.

Ключевые слова: бурение скважин, деформация, испытание, колонна, разрыв

Информация о статье: Дата поступления 27 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 1 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Зайцев В.И. Определение давления разрыва обсадных колонн при бурении скважин на море. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 86–92. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-86-92.

Determination of casing string burst pressure when offshore well drilling

© Vitaliy I. Zaitsev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of the article is to focus on the value of the casing string burst pressure under drilling for oil and gas on the shelf and offshore. When drilling offshore casing strings are subjected to additional stress in comparison with drilling on the land. The lack of allowance for the features of offshore drilling can lead to complications and even accidents. The repair of casing strings at underwater well mouth involving several auxiliary vessels and repair equipment is very complicated and costly. The complexity of repair works in the North and the Far East of the Russian Federation is aggravated by severe and ice conditions in the most part of the year. There is practically no information on this problem in the domestic literature. The author has performed a refined analytical calculation of the casing string burst pressure at the underwater position of the well mouth. For casing string burst pressure determination, it is proposed to make corrections for the depth of the shelf (sea) and the height of the rotor table above the average level of the shelf (sea) surface. This is especially important when drilling in deepwater where the pressure of sea water increases significantly. The article presents the derived empirical formula for determining the magnitude of the fall in the choke line when the choke is put into operation. Knowing the hydraulic losses in the

choke line, it is possible to correct the annular pressure in the casing string by the value of pressure drop. The refined calculation of the casing string burst pressure under drilling on the shelf (offshore) by an analytical method is an important task, since it gives the real value of pressure, which will enable to prevent possible complications and accidents.

Keywords: well drilling, deformation, test, string, burst

Information about the article: Received December 27, 2018; accepted for publication March 1, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Zaitsev V.I. Determination of casing string burst pressure when offshore well drilling. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = *Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 86–92. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-86-92.

Введение

Обсадные колонны используются для закрепления стенок скважины, сложенных недостаточно устойчивыми горными породами, разобщения различных пластов и создания долговременного канала для извлечения нефти и газа из скважины.

Эти колонны также могут служить каналом для нагнетания в скважины жидкости и газа¹.

Обсадные колонны для морских скважин отличаются от колонн, применяемых на суше: они имеют значительно большие размеры по диаметру². В морских скважинах направление обычно спускают на глубину 100–500 м в зависимости от общей глубины, а в некоторых особо опасных случаях (сейсмических районах) – до глубины 1000 м³.

Обсадные колонны могут крепиться на платформе буровой остановки или на дне шельфа в зависимости от нахождения устья скважины. В северных районах, где наблюдается множество ледяных скоплений, монтируют подводные устья скважин.

Данные колонны рассчитывают на прочность согласно инструкции, разработанной Всесоюзным научно-исследовательским институтом по транспортировке, хранению и применению нефтепродуктов для скважин, бурящихся на суше [1]. Наблюдения показывают, что обсадные колонны разрушаются под действием избыточных внутренних и наружных давлений, а также собственного веса.

Особенностью расчета обсадных колонн, бурящихся на шельфе и море, является учет дополнительных нагрузок на эти колонны, в частности давления морской воды [2].

Длина морской обсадной колонны увеличивается из-за добавления расстояния от ротора, находящегося на портале плавающей платформы, до поверхности моря и глубины самого моря. При этом на больших глубинах, например в 2500 м, колонна подвергается громадному давлению в 250 атм. (около 25 МПа) [3]. Она может смяться или сильно деформироваться. При бурении дна моря и дальнейшем углублении скважины внутреннее и

¹Баграмов Р.А. Буровые машины и комплексы: учебник для вузов. М.: Недра, 1988. 501 с. / Bagratov R.A. Drilling machines and complexes. Moscow: Nedra Publ., 1988. 501 p.

²Калинин А.Г., Ганджумян Р.А., Мессер А.Г. Справочник инженера-технолога по бурению глубоких скважин. М.: Недра, 2005. 808 с. / Kalinin A.G., Gandzhumyan R.A., Messer A.G. Handbook of the

process engineer on deep well drilling. Moscow: Nedra Publ., 2005. 808 p.

³Зайцев В.И., Аверкина Е.В. Бурение нефтяных и газовых скважин на море: учебник. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. 382 с. / Zaitsev V.I., Averkina E.V. Drilling of offshore oil and gas wells. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2017. 382 p.

наружное давления на обсадную колонну возрастают⁴ [4].

Предельное внутреннее давление, характеризующее сопротивляемость трубы внутреннему напорному давлению, определяется по давлению, при котором напряжения в меридиональном сечении трубы достигают предела текучести. Величина этого давления зависит от диаметра, толщины стенки и материала трубы [5, 6].

Сопротивление трубы внутреннему давлению бурового раствора, подаваемого буровыми насосами под большим давлением по высоконапорным трубам, возрастает с уменьшением диаметра и увеличением толщины стенки и прочности материала труб [7].

Предельные наружное давление, создаваемое давлением морской воды или пластовым давлением (стенкой скважины), может быть критическим и характеризуется давлением, при котором напряжение в сечении трубы достигает предела текучести. Смятие труб происходит при давлениях, превышающих критические на 10–18 %⁵.

Наиболее опасным избыточное наружное давление является для сечения обсадной колонны с наименьшим внутренним давлением или свободной от жидкости в колонне.

Целью данного исследования является определение давления разрыва обсадной колонны при подводном блоке противовыбросового оборудования, то есть при устье скважины, находящемся на дне водоема.

Опыт бурения на воде показывает, что определение давления разрыва обсадных колонн должно быть проведено с большой точностью для надежной их эксплуатации. В противном случае возможны осложнения и аварии, а ремонтные работы таких колонн на шельфе и море связаны с большими трудностями и огромными затратами. Хотя текущий и капитальный ремонт скважин на морских буровых установках и нефтепромыслах технологически существенно не отличаются от аналогичных работ на скважинах, расположенных на суше, их ремонт может быть связан с некоторыми осложнениями, возникающими в связи со следующими обстоятельствами:

- ограниченность рабочих площадок вокруг устьев морских скважин;
- значительная удаленность морских скважин от основных материально-технических баз, цехов и мастерских нефтегазодобывающих управлений;
- значительная зависимость ремонтных работ и операций по освоению скважин от гидрометеорологических условий в открытом море.
- требования охраны моря от загрязнения нефтью, пластовыми водами, кислотами, щелочами и химическими реагентами, а также песком, буровым шламом и грязью, насыщенными нефтью, и т. д.

Ремонтные работы на морских скважинах еще больше усложняются, если устье располагается под водой, то есть на дне моря.

Водолазы могут работать на глубинах до 150 м, к тому же это должен быть

⁴Большой справочник инженера нефтегазодобычи. Разработка месторождений. Оборудование и технология / под ред. У. Найонза, Г. Плизга; пер. с англ. СПб.: Профессия, 2009. 952 с. / Great reference book of an oil and gas production engineer. Mining. Equipment and Technology / under edition of W. Nyonz, G. Plizg; translated from English. Saint-Petersburg: Professiya Publ., 2009. 952 p.

⁵Основы разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и строительства морских сооружений в Арктике: справочник / под. ред. А.Б. Золотухина, О.Т. Гудмстада, А.И. Ермакова. М.: Нефть и газ, 2000. 770 с. / Fundamentals of offshore oil and gas fields development and construction of offshore facilities in the Arctic / under edition of A.B. Zolotukhin, O.T. Gudmestad, A.I. Ermakov. Moscow: Oil and Gas Publ., 2000. 770 p.

водолаз, обученный ремонтным работам. Проведение буровых работ в настоящее время производится на акваториях свыше 2,5 км. Применение роботов пока проблематично. Ремонт обсадных колонн требует привлечения специальной техники: буксиров, водолазных судов, судов морских кранов и т. д. В связи с этим в некоторых сложных случаях такую скважину просто глушат с дальнейшим консервированием.

Методы исследования

Предлагается в связи с огромной сложностью ремонта и большими затратами ремонтных работ на море проводить уточненный аналитический расчет давления разрыва обсадных колонн, принимая во внимание не только глубину моря и его давление на колонну, но и расстояние от ротора до поверхности воды. Глубина шельфа должна учитываться не смотря на ее небольшие значения.

Результаты

Необходимо отметить, что отечественных литературных источников по определению давления разрыва обсадных колонн при бурении на море нет.

Для определения максимальных внутренних давлений в обсадной колонне установим максимально допустимую плотность бурового раствора $\rho_{б.р.}^{max}$ при подводном устье скважины исходя из данных испытания зоны башмака обсадной колонны:

$$\rho_{б.р.}^{max} = \rho_{исп.} + \rho_{б.р.},$$

где $\rho_{исп.}$ – плотность раствора для испытаний, кг/м³; $\rho_{б.р.}$ – плотность применяемого бурового раствора, кг/м³;

$$\rho_{б.р.}^{max} = 10^6 \cdot \frac{P_{утеч.}}{H_{баш.} \cdot g} + \rho_{б.р.},$$

где $P_{утеч.}$ – давление испытания на утечку зоны башмака обсадной колонны, МПа; $H_{баш.}$ – глубина от стола ротора плаваю-

щей платформы до башмака обсадной колонны по вертикали, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; $\rho_{б.р.}$ – плотность применяемого бурового раствора, кг/м³.

$$H_{баш.} = l_1 + l_2 + L,$$

где l_1 – расстояние от ротора до поверхности воды, м; l_2 – глубина акватории, м; L – глубина скважины по вертикали, м.

С учетом полученной максимально допустимой плотности бурового раствора определим максимально допустимое наружное давление в обсадной колонне, то есть затрубное давление $P_{затр.}^{max}$:

$$P_{затр.}^{max} = 10^{-6} (\rho_{б.р.}^{max} - \rho_{б.р.}) g \cdot H_{баш.}$$

Данная формула преобразована из известной формулы определения плотности бурового раствора без учета суммарной репрессии на пласт:

$$\rho_{б.р.} = P_{пл.} / g \cdot H,$$

где $P_{пл.}$ – пластовое давление, МПа; H – глубина скважины, м.

Затем определяем внутреннее давление достижения предела текучести $P_{тек.}$ для обсадной колонны с учетом ее материала изготовления по таблице из справочного руководства по бурению нефтяных и газовых скважин.

В найденную величину внутреннего давления, при котором напряжения в теле обсадной трубы достигают предела текучести, вводим поправку в виде коэффициента безопасности $k_б$, равного 0,7–0,8.

Получаем исправленное внутреннее давление достижения предела текучести материала обсадной колонны $P_{испр.тек.}$:

$$P_{испр.тек.} = P_{тек.} \cdot k_б,$$

где $P_{тек.}$ – давление достижения предела текучести, МПа; $k_б$ – коэффициент безопасности.

При значительных глубинах бурения принимают $k_б$ равным 0,7–0,75, при незначительных – 0,8⁶.

⁶Калинин А.Г., Ганджумян Р.А., Мессер А.Г. Справочник инженера-технолога по бурению глубоких скважин. М.: Недра, 2005. 808 с. / Kalinin A.G.,

Gandzhumyan R.A., Messer A.G. Handbook of the process engineer on deep well drilling. Moscow: Nedra Publ., 2005. 808 p.

Для учета внутреннего давления определяем гидростатическое давление используемого бурового раствора $P_{г.с.}$. При этом учитываем глубину от стола ротора до дна моря:

$$P_{г.с.} = \rho_{б.р.} \cdot g \cdot (l_1 + l_2).$$

Получаем гидростатическое давление используемого бурового раствора $P_{г.с.}$ в паскалях, переводим в мегапаскалях.

Затем учитываем наружное давление на колонну морской воды. Для этого определяем наружное гидростатическое давление, создаваемое морской водой, $P_{г.с.м.}$:

$$P_{г.с.м.} = \rho_{м.} \cdot g \cdot l_2,$$

где $\rho_{м.}$ – плотность морской воды, кг/м³.

Определяем давление разрыва обсадной колонны $P_{разр.}$ с учетом гидростатических давлений бурового раствора и морской воды:

$$P_{разр.} = P_{испр.тек.} + P_{г.с.м.} - P_{г.с.}$$

Приведем пример расчета давления разрыва обсадной колонны при подводном расположении устья скважины.

Имеем следующие данные:

$P_{утеч.}$ – давление испытания на утечку – 6 МПа;

$H_{баш.}$ – глубина от стола ротора до башмака обсадной колонны по вертикали – 1300 м.;

$\rho_{б.р.}$ – плотность используемого бурового раствора – 1150 кг/м³;

$\rho_{м.}$ – плотность морской воды – 1030 кг/м³;

l_1 – высота стола ротора над поверхностью моря – 30 м;

l_2 – глубина воды – 470 м;

$k_б$ – коэффициент безопасности;

$P_{тек.}$ – внутреннее давление достижения предела текучести в теле трубы – 512 кгс/см²;

Q – расход жидкости – 15 л/с;
 $l_{шт.}$ – длина штуцерной линии – 500 м;

$d_{шт.}$ – внутренний диаметр штуцерной линии – 0,063 м.

Определяем допустимую плотность бурового раствора исходя из данных испытания на утечку зоны башмака обсадной колонны:

$$\rho_{б.р.}^{max} = 10^6 \cdot \frac{6}{1300} \cdot 9,8 + 1150 = 1621 \text{ кг/м}^3.$$

Рассчитываем максимально допустимое наружное давление в обсадной колонне (затрубное давление):

$$P_{затр.}^{max} = 10^{-6}(1621 - 1150) \cdot 9,8 \cdot 1300 = 6 \text{ МПа.}$$

По справочнику⁷ находим внутреннее давление достижения предела текучести в теле трубы (группа прочности Д) $P_{тек.} = 512 \text{ кгс/см}^2$.

Исправленное давление достижения предела текучести

$$P_{испр.тек.} = 512 \cdot 0,8 = 401 \text{ кгс/см}^2.$$

Определяем гидростатическое давление, оказываемое используемым буровым раствором:

$$P_{г.с.} = 1150 \cdot 9,8 \cdot (470 + 30) = 63,5 \text{ КПа} = 56,3 \text{ кгс/см}^2.$$

Гидростатическое давление, оказываемое морской водой,

$$P_{г.с.м.} = 1030 \cdot 9,8 \cdot 470 = 744180 \text{ Па} = 47,4 \text{ кгс/см}^2.$$

Рассчитаем давление разрыва обсадной колонны:

$$P_{разр.} = 401 + 47,4 - 56,3 = 392,1 \text{ кгс/см}^2 = 39,2 \text{ МПа.}$$

При выводе скважины на штуцер при подводном устье давление в обсадной колонне, так называемое затрубное давление, необходимо откорректировать с учетом уменьшения на величину

⁷Большой справочник инженера нефтегазодобычи. Разработка месторождений. Оборудование и технология / под ред. У. Найонза, Г. Плизга; пер. с англ. СПб.: Профессия, 2009. 952 с. / Great reference book of petroleum and gas production

engineers. Mining. Equipment and Technology / under edition of W. Nyonz, G. Plizg; translated from English. Saint-Petersburg: Professiya Publ., 2009. 952 p.

падения давления (гидравлических потерь) в штуцерной линии $\Delta P_{шт.}$:

$$P_{ум.затр.} = P_{затр.}^{max} - \Delta P_{шт.}$$

Для подсчета падения давления в штуцерной линии автором выведена экспериментальная формула:

$$\Delta P_{шт.} = 2,5 \cdot 10^{-12} \cdot P_{б.р.} \cdot l_{шт.} \cdot \frac{Q^2}{d_{шт.}^4},$$

$$\Delta P_{шт.} = 2,5 \cdot 10^{-12} \cdot 1150 \cdot 500 \cdot 15^2 / 0,063^4 = 20,53 \text{ кг/см}^2 = 2,014 \text{ МПа.}$$

Тогда затрубное давление в обсадной колонне

$$P_{ум.затр.} = 6 - 2,01 = 3,99 \text{ МПа.}$$

Получено реальное давление (затрубное) в обсадной колонне при работе штуцера.

Заключение

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы:

1. Уточненный расчет с учетом расстояний от ротора до поверхности моря и от поверхности воды до дна водоема, а также принятие во внимание давления морской воды позволяет получить действительную величину давления разрыва обсадной колонны при бурении на море. Это, возможно, позволит избежать лишних осложнений и аварий, связанных с колоннами.

2. В процессе коррекции давлений выведена эмпирическая формула падения давления в штуцерной линии и определено реальное затрубное давление в обсадной колонне при работе штуцера.

Библиографический список

1. Вяхирев Р.И., Никитин Б.А., Мизоев Б.А. Обустройство и освоение морских нефтегазовых месторождений. М.: Академия горных наук, 1999. 374 с.

2. Зайцев В.И., Карпиков А.В. Экологические проблемы очистки акваторий при бурении и эксплуатации нефтяных скважин в Арктике // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2013. № 2. С. 109–114.

3. Зайцев В.И. Тенденции развития бурения на нефть и газ на континентальном шельфе России // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследова-

ний: материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Геонаука-60». Иркутск, 2012. Вып. 12. С. 173–180.

4. Скрыпник С.Г. Техника для бурения нефтяных и газовых скважин на море. М.: Недра, 1989. 310 с.

5. Доусон Т. Проектирование сооружений морского шельфа / пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2001. 416 с.

6. Леффлер У., Паттароззи Р., Стерлинг Г. Глубоководная разведка и добыча нефти / пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2008. 272 с.

7. Хайн Н. Геология разведки, бурения и добычи нефти / пер. с англ. М.: Олимп-Бизнес, 2008. 532 с.

References

1. Vyakhirev R.I., Nikitin B.A., Mizoev B.A. *Obustroistvo i osvoenie morskikh neftegazovykh mestorozhdenii* [Equipment and development of offshore oil and gas fields]. Moscow: Akademiya gornykh nauk Publ., 1999, 374 p. (In Russ.).

2. Zaitsev V.I., Karpikov A.V. Environmental problems of cleaning up water areas under drilling and operation of oil wells in the Arctic. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya seksii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2013, no. 2, pp. 109–114. (In Russ.).

3. Zaitsev V.I. *Tendentsii razvitiya bureniya na nef' i gaz na kontinental'nom shel'fe Rossii* [Development trends of drilling for oil and gas on Russian continental shelf]. *Materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf "Geonauka-60" "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy"* [Materials of All-Russian scientific and technical conference "Geoscience-60" "Geology, prospecting and exploration of minerals and methods of geological researches"]. Irkutsk, 2012. Iss. 12, pp. 173–180. (In Russ.).

4. Skrypnik S.G. *Tehnika dlya bureniya neftyanikh i gazovykh skvazhin na more* [Equipment for offshore drilling of oil and gas wells]. Moscow: Nedra Publ., 1989, 310 p. (In Russ.).

5. Dawson T. Offshore Structural Engineering, 2001, 416 p. (Russ. ed.: *Proektirovanie sooruzhenii morskogo shel'fa*. Moscow: Olimp-Biznes Publ., 2001, 416 p.).

6. Leffler W., Pattarozzi R., Sterling G. Deep-water Petroleum Exploration and Production, 2008, 272 p. (Russ. ed.: Leffler U., Pattarozzi R., Sterling G.

Glubokovodnaya razvedka i dobycha nefiti. Moscow: Olimp-Biznes Publ., 2008, 272 p.).

7. Hynes N. Geology of Petroleum Exploration, Drilling and Production, 2008, 532 p. (Russ. ed.: Khain N. *Geologiya razvedki, bureniya i dobychi nefiti*. Moscow: Olimp-Biznes Publ., 2008, 532 p.).

Критерии авторства

Зайцев В.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Зайцев Виталий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: zaicshev@istu.edu

Authorship criteria

Vitaliy I. Zaitsev has written the article, has all author's rights and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Vitaliy I. Zaitsev, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: zaicshev@istu.edu

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-93-103>

Определение дисперсной фазы буровых растворов на полимерной основе

© А.И. Ламбин, Е.В. Аверкина

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Целью данной статьи является установление объема дисперсной фазы растворов полимера и определение степени их подчинения степенному закону течения жидкостей, а также определение реологической модели течения бурового раствора для вычисления потерь давления при движении жидкости в элементах циркуляционной системы. Водорастворимые полимеры широко применяются как в составе буровых растворов, так и самостоятельно в качестве промывочных жидкостей при бурении скважин. Несмотря на широту применения полимеров, в бурении мало внимания уделяется объему дисперсной фазы, получающемуся в результате растворения полимера в воде. Причем особый интерес вызывают так называемые в теории растворов полимеров и мало упоминаемые в бурении разбавленные растворы, в которых количество макромолекулярных клубков полимера таково, что они не взаимодействуют между собой при течении жидкости. Вискозиметрическим методом определялись молекулярная масса и характеристическая вязкость каждого раствора, использовавшиеся при установлении объема дисперсной фазы. Определение параметров реологического степенного закона осуществлялось путем применения ротаметрической вискозиметрии. В результате установлено, что приготовленные для изучения растворы рассматриваемых полимеров относятся к разбавленным, и на примере одного из них показана возможность определения относительного объема макромолекулярных клубков полимера с иммобилизованным растворителем (водой). Показано, что изменение указанного объема вызывает изменение параметров реологического степенного закона течения исследуемых растворов. Предложенная методика определения относительного объема дисперсной фазы буровых растворов на основе разбавленных растворов полимеров позволяет регулировать реологические свойства промывочных жидкостей и устанавливать параметры реологического степенного закона течения псевдопластических жидкостей.

Ключевые слова: буровой раствор, вязкость жидкости, молекулярный вес, дисперсная фаза, реологический закон

Информация о статье: Дата поступления 7 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 26 февраля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Ламбин А.И., Аверкина Е.В. Определение дисперсной фазы буровых растворов на полимерной основе. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 93–103. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-93-103.

Determination of the dispersed phase of polymer based drilling fluids

© Anatoliy I. Lambin, Elena V. Averkina

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The purpose of the article is determination of the volume of the polymer solution dispersed phase, estimation of their subordination degree to the power law of fluid flow, as well as determination of the rheological model of mud flow in order to calculate the pressure losses under fluid movement in the elements of the circulation system. Water-soluble polymers are widely used in the composition of drilling fluids and are also used independently as flushing fluids for drilling wells. Despite the wide application range of polymers, when drilling little attention is paid to the volume of the dispersed phase resulting from the dissolution of polymer in water. Particular interest is caused by so-called dilute solutions (term used in the theory of polymer solutions). They are little mentioned in drilling but their number of macromolecular coils of the polymer reaches such a value that they do not interact with each other

when the fluid flows. Using a viscometric method, the molecular mass and the characteristic viscosity of each solution used for the dispersion phase volume determination are estimated. The parameters of the rheological power law are determined through the application of rotametric viscometry. As a result, it has been found out that the solutions of the considered polymers prepared for the study are referred to diluted. On example of one of them the possibility of determining the relative volume of macromolecular coils of polymer with the immobilized solvent (water) is shown. It is demonstrated that a change in the specified volume causes a change in the parameters of the rheological power law of researched solution flow. The proposed methods for determining the relative volume of the dispersed phase of drilling muds based on dilute polymer solutions allows to adjust the rheological properties of flushing fluids and set the parameters of the rheological power law describing the flow of pseudoplastic fluids.

Keywords: drilling mud, fluid viscosity, molecular weight, disperse phase, rheological law

Information about the article: Received December 7, 2018; accepted for publication February 26, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Lambin A.I., Averkina E.V. Determination of the dispersed phase of polymer based drilling fluids. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 93–103. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-93-103.

Введение

Оптимальное строительство скважин на нефть и газ во многом зависит от свойств бурового раствора, применяемого для их промывки. Основой буровых растворов по классификации¹ может быть вода, нефть и газ. Многообразие растворов на водной основе позволяет решать различные технологические задачи строительства скважин. В настоящее время широкое распространение получили промывочные жидкости на основе водорастворимых полимеров. Подробная классификация полимеров, применяемых в буровых растворах, приведена в источнике [1]. Все большее применение в буровой практике находят безглинистые полимерные системы, которые наиболее полно отвечают требованиям промывки скважин, в том числе скважин с горизонтальными стволами. Широкий диапазон изменения реологических свойств позволяет решать многие задачи технологии промывки скважин. Высокие технико-экономические показатели бурения достигаются благодаря комплексу положительных свойств: сравнительно слабых реологических, удовлетворительных смазывающих, ингибирующих, флокулирующих

и других, которые можно регулировать в зависимости от конкретных горно-геологических условий [2]. При этом основной задачей является выбор полимерного реагента для создания требуемой реологии и формирования кольматационного экрана в призабойной зоне продуктивного пласта.

Вязкость буровых растворов является одной из наиболее важных его характеристик: она определяет реологическое поведение раствора при своем движении в циркуляционной системе скважины. Регулирование реологических свойств бурового раствора может осуществляться, как указано выше, с использованием водных растворов высокомолекулярных веществ – полимеров. В свою очередь, реологическая характеристика водных растворов полимеров зависит от его молекулярного веса, гидродинамического размера молекул, их взаимодействия между собой. Знание указанной характеристики полимеров позволяет качественно решать технологические задачи при строительстве скважины путем выбора полимеров с соответствующими макромолекулярными характеристиками [3].

¹Булатов А.И., Макаренко П.П., Проселков Ю.М. Буровые промывочные и тампонажные растворы: учеб. пособие для вузов. М.: Недра, 1999. 424 с. /

Bulatov A.I., Makarenko P.P., Proselkov Yu.M. Drilling flushing and grouting solutions: textbook for universities. Moscow: Nedra Publ., 1999. 424 p.

Целью настоящего исследования является определение молекулярной массы полимеров под торговыми марками Poly-Mud H, Poly-Mud FL, SpecFloc A и SpecFloc N, приобретаемых буровыми компаниями для улучшения свойств буровых растворов на водной основе, а также определение степени соответствия реологии водных растворов полимера степенному закону.

Физико-химические свойства указанных акриловых полимеров представлены в табл. 1.

Выделенные марки выпускаются без контроля таких характеристик, как молекулярная масса, молекулярно-массовое распределение, степень гидролиза, что вызывает трудности их применения.

Изучение молекулярных характеристик полимеров необходимо для определения поведения макромолекул в растворах при установлении требуемой реологии циркуляционных потоков для решения технологических задач. При этом знание закономерностей поведения макромолекул в растворах важно как с теоретической, так и с практической точки зрения [4].

Содержание полимеров в буровых растворах на водной основе и содержание полимеров в качестве добавок к буровым растворам составляет доли процента. Такие растворы в рамках теории солюбилизированных растворов называются разбавленными. В таких растворах полимеров расстояния между макромолекулами значительно превышают их средние размеры и локальная концентрация сегментов не является постоянной величиной для любой точки раствора.

Обычно под разбавленным понимают такой раствор, в котором макромолекулы находятся друг от друга на расстоянии r , значительно превышающем их собственные геометрические размеры.

Методика исследования

Определение молекулярной массы осуществлялось вискозиметрическим методом на основании данных по вязкости раствора полимера. Измерение вязкости водных растворов полимеров осуществлялось вискозиметром ВПЖ-2 с термостатированием в течение 5 мин. Приготовление разбавленного раствора полимера производилось в следующем

Таблица 1

Физико-химическая характеристика полимеров

Table 1

Physico-chemical characteristic of polymers

Характеристика	Описание полимеров			
	Poly-Mud H	Poly-Mud FL	SpecFloc A7950-20	SpecFloc N6919
Внешний вид	Порошок от белого до светло-желтого цвета	Порошок от белого до желтого цвета, допускаются комки	Белый порошок	
Насыпная плотность, г/см ³	0,5–0,8	0,5–0,9	≥0,60	≥0,60
Гранулометрический состав	Более 1250 мкм – не более 10 %	–	Более 1 мм – не более 4 %	Более 1 мм – не более 3 %
	Менее 100 мкм – не более 2 %		Менее 0,1 мм – не более 2 %	Менее 0,15 мм – не более 5 %
Массовая доля основного вещества, %	–	Не менее 90	≤0,025	≤0,025

порядке. Предварительно высушенный и измеренный с точностью 0,001 г порошок реагента высыпался в лабораторный стакан с дистиллированной водой емкостью 0,5 л и перемешивался в течение 1 ч. Перед измерением вязкости раствор выдерживался при комнатной температуре в течение 24 ч.

Для определения молекулярной массы пользуются нелинейным уравнением Марка – Куна – Хаувинка, выражающим зависимость характеристической вязкости от молекулярной массы:

$$[\eta] = KM^\alpha, \quad (1)$$

где $[\eta]$ – характеристическая вязкость, которая определяется экстраполяцией приведенной вязкости ($\eta_{уд}/c$) к нулевому содержанию концентрации c полимера (отношение $\eta_{уд}/c$ называют приведенной вязкостью $\eta_{пр}$, здесь $\eta_{пр} = (\eta - \eta_0)/\eta_0$, где η – вязкость раствора полимера, а η_0 – вязкость растворителя); K и α – константы для данной системы полимер – растворитель при определенной температуре.

Все значения вышеупомянутых вязкостей рассчитывают для разных концентраций c и для постоянной комнатной температуры. Затем строят графики зависимости $\eta_{пр}$ и $\lg(\eta_{отн}/c)$ от концентрации c и проводят двойную экстраполяцию к нулевой концентрации. Обе прямые

должны пересекаться на оси ординат в точке, соответствующей нулевой концентрации, и отрезок на оси ординат дает значение характеристической вязкости. Если прямые не пересекаются в этой точке, то за предельное число вязкости принимают значение, соответствующее средней точке между пересечениями каждой прямой оси ординат (рис. 1).

Определив значение характеристической вязкости при известных величинах констант K и α , вычисляют молекулярную массу полимера. Для расчета молекулярной массы подставляют значения $[\eta]$, констант K и α и логарифмируют уравнение Марка – Куна – Хаувинка:

$$\lg[\eta] = \lg K + \alpha \cdot \lg M. \quad (2)$$

Значения α и K , равные 0,8 и 6,31 соответственно, взяты из источника [5].

Результаты

Результаты расчета молекулярных масс изучаемых образцов полимеров представлены в табл. 2.

Теоретически размер молекулы полимера в растворе или ее гидродинамический объем пропорционален характеристической вязкости продукта $[\eta]$ и его молекулярной массе M [6].

Произведение характеристической вязкости $[\eta]$ и концентрации c является безразмерным параметром, значение которого позволяет оценить, является ли

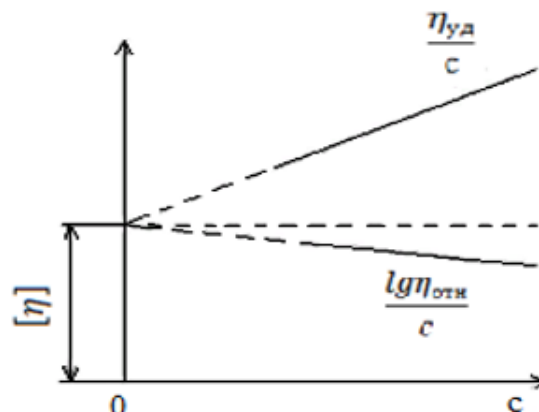


Рис. 1. Зависимость приведенной $\eta_{уд}/c$ и логарифмической приведенной вязкости $\lg(\eta_{отн}/c)$ от концентрации раствора полимера

Fig. 1. Dependence of the reduced $\eta_{уд}/c$ and the logarithmic reduced viscosity $\lg(\eta_{отн}/c)$ on polymer solution concentration

Таблица 2

Молекулярные характеристики образцов

Table 2

Molecular characteristics of samples

Молекулярная характеристика образца	Poly-Mud H	Poly-Mud FL	SpecFloc A 7950-20	SpecFloc N 6919
Характеристическая вязкость $[\eta]$	10	4,5	14,4	4,16
Молекулярная масса M	$3,16 \cdot 10^6$	$1,17 \cdot 10^6$	$4,98 \cdot 10^6$	$1,05 \cdot 10^6$

раствор «разбавленным», то есть не происходит ли перекрывания макромолекул в растворе. Значение этого произведения должно быть меньше единицы. В рассматриваемом случае максимальная концентрация полимеров составляла 0,05 % и по максимуму характеристической вязкости для полимерного образца SpecFloc A 7950-20 произведение характеристической вязкости на концентрацию составляет $14,40 \cdot 0,05 = 0,72$, что соответствует характеристикам «разбавленных» растворов.

Согласно модели Зимма, между звеньями цепи и жидкостью существует гидродинамическое взаимодействие, благодаря которому образуется клубок с иммобилизованной жидкостью растворения, который можно рассматривать как непроницаемую сферу. Для раствора непроницаемых сфер Эйнштейн вывел соотношение:

$$\eta = \eta_0(1 + 2,5\varphi_2), \quad (3)$$

где η_0 – вязкость растворителя; φ_2 – объемная доля растворенного вещества.

В этом уравнении вязкость суспензии не зависит от размера сфер. Однако не все полимеры образуют в растворах жесткий непроницаемый клубок сферической формы, например, макромолекулы полиакриламида в водных растворах имеют форму набухших клубков, ча-

стично проницаемых для молекул растворителя², что влечет отказ от применения формулы Эйнштейна для оценки объема дисперсной фазы. Эту оценку можно сделать по другим характеристикам разбавленных растворов полимеров.

Объемную долю макромолекулярных клубков в растворе, зависящую от характеристической вязкости $[\eta]$ и концентрации раствора c , предложено выражать следующим образом [7]:

$$\varphi = \frac{[\eta] \cdot c}{1 + [\eta] \cdot c}. \quad (4)$$

Подставляя вычисленное ранее произведение характеристической вязкости и концентрации полимера в растворе, получим:

$$\varphi = \frac{0,72}{1 + 0,72} = 0,42.$$

Таким образом, почти половина растворителя находится в связанном состоянии.

Исследование реологических свойств полимерных растворов на водной основе проводилось на ротационном вискозиметре OFITE модели 900. Замеры вязкости жидкостей выполнялись при скоростях сдвига от 1,704 до 1022 с⁻¹ (1–600 об./с). Например, результаты замеров вязкости растворов Poly-Mud H различной концентрации представлены в табл. 3 и на рис. 2.

²Байбурдов Т.А., Шиповская А.Б. Синтез, химические и физико-химические свойства полимеров акриламида: учеб. пособие. Саратов: Изд-во СГУ, 2014. 67 с. / Baiburdiv T.A., Shipovskaya A.B.

Synthesis, chemical and physico-chemical properties of acrylamide polymers: Learning aids. Saratov: Saratov State University Publ., 2014. 67 p.

Таблица 3

Вязкость растворов Poly-Mud H различной концентрации

Table 3

Viscosity of Poly-Mud H solutions of various concentration

Концентрация, %	Вязкость при скорости сдвига об./с, мПа·с										
	1	2	3	6	10	20	30	60	100	300	600
0,001	17,4	10,4	7,8	5,7	4,6	3,7	3,5	2,5	2,2	2,3	1,7
0,005	25,2	13,5	13	7,4	5,1	3	2,6	1,8	2,5	1,9	1,6
0,015	33,9	22,6	17,7	13,7	11,7	7,9	6,6	4,6	4,3	2,7	2,4
0,02	77,8	44,3	31,3	14,4	14,4	10,8	8,5	5,9	5,7	2,9	2,9
0,025	133,5	74,1	51,3	28,5	18,7	11	8,1	5,5	4,8	3,4	3
0,03	156,5	84,3	60	33,3	22,3	13,9	10,7	7,4	7,2	4,6	3,7
0,035	164,3	94,6	65,5	36,3	24	14,1	10,9	8,3	7,4	5,5	4
0,04	156,5	85,6	62,2	34,6	23,3	14	11,6	10,5	9	5,9	4,3
0,045	63,5	40,2	33,6	23,5	17,6	13,5	15,5	12,1	9,4	6,4	4,4

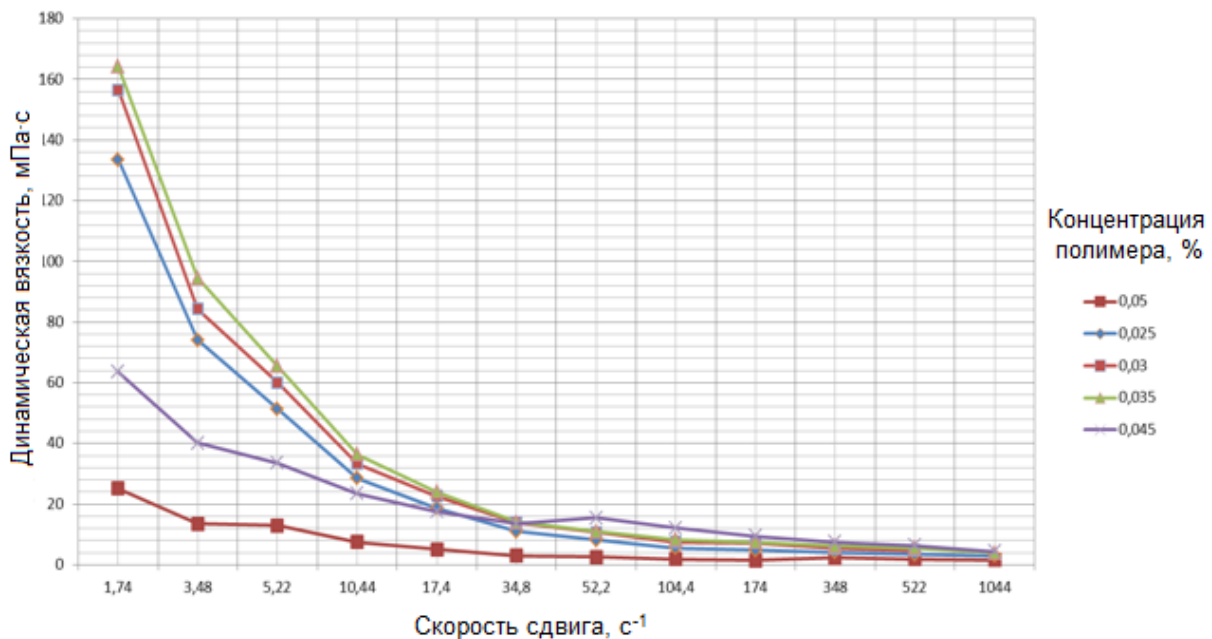


Рис. 2. Вязкость водных растворов Poly-Mud H в зависимости от концентрации и скорости сдвига

Fig. 2. Viscosity of Poly-Mud H water solutions depending on concentration and shear rate

Деформационное поведение дисперсных систем характеризуются так называемой кривой течения. Это график зависимости напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ ($\tau = f(\dot{\gamma})$). В двойных логарифмических координатах он представлен на рис. 3.

Для описания зависимости η от $\dot{\gamma}$ существует широко известный степенной

закон Оствальда-де Ваале:

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n, \quad (5)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; K – коэффициент консистенции потока, Па·с ^{n} ; $\partial u / \partial y$ – градиент скорости вдоль оси, перпендикулярной к плоскости сдвига слоев жидкости; n – показатель поведения или индекс псевдопластичности.

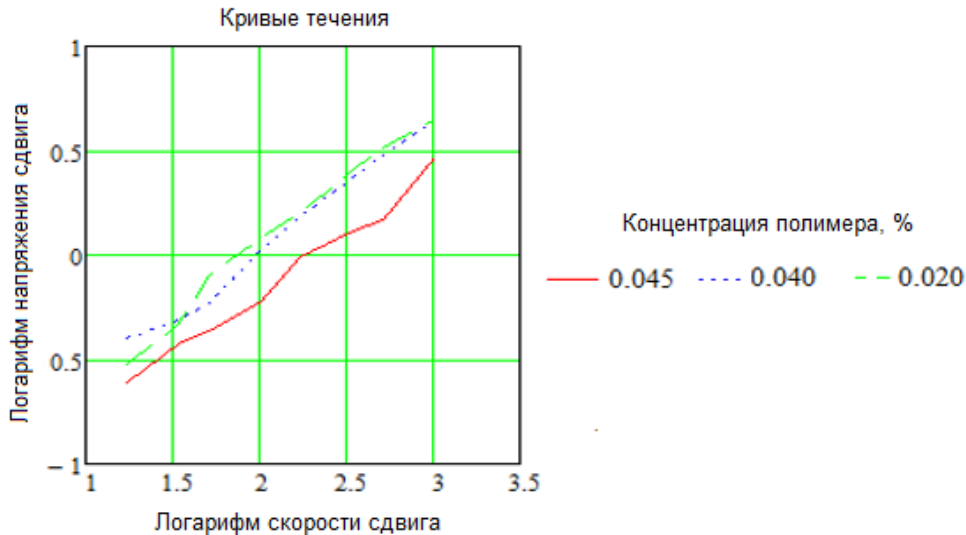


Рис. 3. Кривые течения раствора полимера в двойных логарифмических координатах в зависимости от концентрации
Fig. 3. Curves of polymer solution flow in double logarithmic coordinates depending on concentration

Вязкость жидкости, вычисленную из зависимости (5), называют кажущейся или эффективной вязкостью:

$$\eta = \frac{\tau}{\partial u / \partial y} = K(\partial u / \partial y)^{n-1}.$$

При обозначении величины градиента скорости $\partial u / \partial y$ через $\dot{\gamma}$ вязкость определяется следующим образом:

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1}. \quad (6)$$

Степенной закон позволяет более точно описать поведение растворов при малых скоростях сдвига, то есть в области максимальной нелинейности реологических кривых буровых растворов (рис. 4).

Значения n могут быть меньше, больше единицы и равны единице, это означает, что эффективная вязкость в первом случае снижается с ростом скорости сдвига, а во втором случае, наоборот, увеличивается и не подчиняется степенному закону, то есть является ньютоновской жидкостью. Значения показателя нелинейности оказывают влияние на профиль скорости течения жидкости.

Распределение скоростей показано на рис. 5.

Как видно из рис. 5, с уменьшением значения n профиль становится более пологим, что говорит об образовании

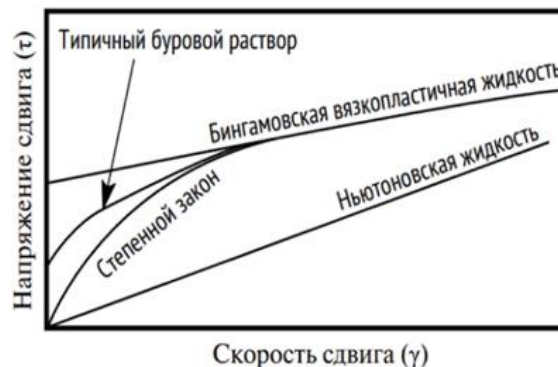


Рис. 4. Положение модели степенного закона
Fig. 4. Position of the power law model

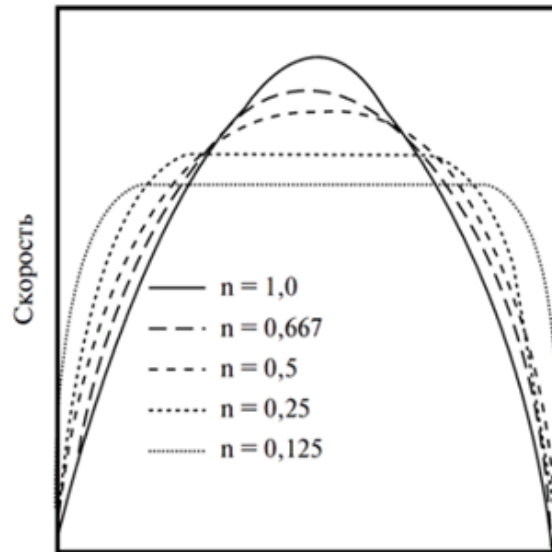


Рис. 5. Влияние значения n на вид профиля скоростей жидкости при их течении в круглом канале
Fig. 5. Influence of value n on the form of the fluid velocity profile when flowing in the round channel

области ламинарного течения с высокой эффективной вязкостью. Таким образом, выбуренные частицы породы увлекаются в этой области, и тем больше, чем меньше значение n , то есть охватывается большая область кольцевого пространства скважины [8].

Для нахождения показателей модели степенного закона (6) используют показания ротационного вискозиметра при частоте вращения муфты ротора 300 и 600 об./мин [9], что определяет скорость сдвига, равную 511,2 и 1022,4 с⁻¹ соответственно:

$$\begin{aligned} n &= 3,32 \cdot \lg(\theta_{600}/\theta_{300}), \\ K &= \theta_{300}/(511)^n. \end{aligned} \quad (7)$$

Вычисленные по формулам (7) на основе данных табл. 3 для раствора Poly-Mud Н концентрации 0,03 % n и K получили значения 0,686 и 0,033 соответственно. Сопоставление измеренных значений напряжения сдвига и вычисленных по модели представлено на рис. 6.

$$\tau = 0,033 \cdot \dot{\gamma}^{0.686}. \quad (8)$$

Как видно из рис. 6, вычисленные параметры модели реологического степенного закона приемлемо аппроксимируют измеренные значения напряжения

сдвига. Исследования показали, что изменение концентрации растворяемого полимера влечет за собой изменение параметров модели степенного закона. Так, например, аппроксимация по формуле (7) измеренных значений напряжений сдвига раствора полимера Poly-Mud Н концентрации 0,045 % изменила значения параметров модели (8):

$$\tau = 0,1868 \cdot \dot{\gamma}^{0.4591}.$$

Изменение параметров указывает на закономерное увеличение консистенции с ростом концентрации полимера и еще большее отклонение от ньютоновской модели течения жидкости.

Как указывалось ранее, установление реологического закона течения жидкости необходимо для определения потерь давления жидкости в циркуляционной системе скважины. Так, в бурильной колонне режим течения в большинстве случаев считается турбулентным, а в кольцевом пространстве скважины – ламинарным. В связи с этим технический бюллетень Американского нефтяного института [10] рекомендует два набора уравнений для расчета параметров K и n бурового раствора:

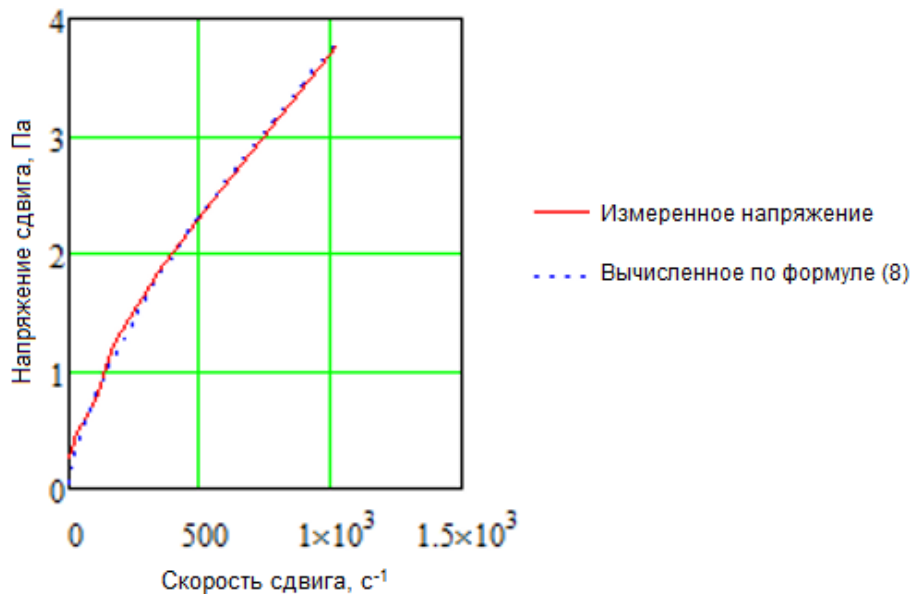


Рис. 6. Сопоставимость измеренных и вычисленных значений напряжений сдвига
Fig. 6. Comparability of measured and calculated shear stress values

– один – для течения в буровой колонне:

$$n = 3,32 \cdot \log_{10}(\theta_{600}/\theta_{300}),$$

$$K = \theta_{300}/(511)^{n_p};$$

– второй – для расчета в кольцевом пространстве скважины:

$$n = 0,657 \cdot \log_{10}(\theta_{100}/\theta_3),$$

$$K = \theta_{100}/170,3^{n_a}.$$

Заключение

Разбавленные растворы полимеров образуют дисперсную фазу, состоящую из макромолекулярных клубков с иммобилизованным растворителем

(в представленном исследовании – водой). Объем этих клубков необходимо учитывать при определении и регулировании реологических свойств жидкости. Предложенная методика определения относительного объема дисперсной фазы буровых растворов на основе водорастворимых полимеров позволяет регулировать реологические свойства промывочных жидкостей и устанавливать параметры реологического степенного закона течения псевдопластических жидкостей.

Библиографический список

1. Овчинников В.П., Аксенова Н.А., Каменский Л.А., Федоровская В.А. Полимерные буровые растворы. Эволюция «из грязи в князи» // Бурение и нефть. 2014, № 12. С. 24–30.

2. Энциклопедия полимеров / под ред. В.А. Каргина. М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 1. 323 с.

3. Аверкина Е.В., Анисимов Н.В., Тренёв И.С. Исследование свойств глинистых буровых растворов, обработанных акриловыми полимерами // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар.

уч., посвящ. памяти профессора В.Д. Маца, «Геонауки-2018: актуальные проблемы изучения недр». Иркутск, 2018. Вып. 18. С. 132–137.

4. Ламбин А.И., Иванишин В.М., Сираев Р.У., Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Коротков А.В. Исследование влияния состава эмульсионных буровых растворов на их показатели // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015, № 4 (53). С. 58–66.

5. Манжай В.Н., Климова Н.Л. Новые возможности турбореометрического метода исследова-

дования разбавленных растворов полимеров // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309, № 6. С. 85–87.

6. Шакирова Э.В., Аверкина Е.В., Сабиров Т.Р. Влияние добавок на характеристики бурового раствора, применяемого при бурении скважин в Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 86–94. DOI: 10.21285/0130-108X-2016-56-3-86-94.

7. Рабиа Х. Технология бурения нефтяных скважин / пер. с англ. В.Г. Григулецкого, Ю.М. Кисельмана. М.: Недра, 1989. 413 с.

8. Реологические модели // FluidsPro [Электронный ресурс]. URL: <http://fluidspro.ru/reologiya-i-gidrodinamika/reologicheskie-modeli/> (22.11.2018).

9. Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Сабиров Т.Р., Перышкина К.О. Применение нефти в качестве смазочной добавки в буровом растворе (на примере Ярактинского нефтегазоконденсатного месторождения) // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16, № 2. С. 12–19.

10. API RP 13D:1995. Recommended practice on the rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids. American Petroleum Institute, 1220 L Street NW, Washington, DC 20005.

References

1. Ovchinnikov V.P., Aksenova N.A., Kamenskii L.A., Fedorovskaya V.A. Polymer drilling muds. Their evolution "from rags to riches". *Burenie i neft'* [Oil and Drilling], 2014, no. 12, pp. 24–30. (In Russ.).

2. Kargin V.A. *Entsiklopediya polimerov* [Encyclopedia of polymers]. Moscow: Sovetskaya entsiklopediya Publ., 1972. Vol. 1, 323 p. (In Russ.).

3. Averkina E.V., Anisimov N.V., Trenev I.S. *Issledovanie svoystv glinistykh burovyykh rastvorov, obrabotannykh akrilovymi polimerami* [Research of properties of the clay drilling muds processed by acrylic polymers]. *Materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch., posvyashch. pamyati professora V.D. Matsa "Geonauki-2018: aktual'nye problemy izucheniya nedr"* "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy" [Materials of All-Russian scientific and technical conference with international participation devoted to the memory of the Professor V.D. Matz "Geosciences-2018: current problems of subsurface studies" "Geology, Search and Exploration of Minerals and Methods of Geologic Researches". Irkutsk, 2018. Iss. 18, pp. 132–137. (In Russ.).

4. Lambin A.I., Ivanishin V.M., Siraev R.U., Averkina E.V., Shakirova E.V., Korotkov A.V. Study of the effect of emulsion drilling muds composition on their indicators. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2015, no. 4 (53), pp. 58–66. (In Russ.).

5. Manzhai V.N., Klimova N.L. New opportunities of turbo-rheometric investigation method of polymer diluted solutions. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2006, vol. 309, no. 6, pp. 85–87. (In Russ.).

6. Shakirova E.V., Averkina E.V., Sabirov T.R. The effect of lubricating additives on characteristics of the mud used in well-drilling in Eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2016, no. 3 (56), pp. 86–94. (In Russ.). DOI: 10.21285/0130-108X-2016-56-3-86-94.

7. Rabia H. Oil well drilling engineering, 1989, 413 p. (Russ. ed.: Rabia Kh. *Tekhnologiya burenii neftyanykh skvazhin*. Moscow: Nedra Publ., 413 p.).

8. *Reologicheskie modeli* [Rheological models]. FluidsPro. URL: <http://fluidspro.ru/reologiya-i-gidrodinamika/reologicheskie-modeli/> (accessed 22 November 2018).

9. Averkina E.V., Shakirova E.V., Sabirov T.R., Peryshkina K.O. Use of oil as lubricant additive in drilling mud fluid (on the example of the Yarakinsky oil-gas condensate field). *Neftegazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2018, vol. 16, no. 2, pp. 12–19. (In Russ.).

10. API RP 13D:1995. Recommended practice on the rheology and hydraulics of oil-well drilling fluids. American Petroleum Institute, 1220 L Street NW, Washington, DC 20005.

Критерии авторства

Ламбин А.И., Аверкина Е.В. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Anatoliy I. Lambin, Elena V. Averkina have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Ламбин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: alambin@ex.istu.edu*

Аверкина Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры нефтегазового дела Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: averkina@istu.edu*

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Anatoliy I. Lambin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: alambin@ex.istu.edu*

Elena V. Averkina, Senior Lecturer of the Department of Oil and Gas Business of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: averkina@istu.edu*

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.063.46:622.61

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111>

О перспективах применения автоматизированных способов добычи полезных ископаемых

© А.Н. Шевченко, В.А. Храмовских

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Статья посвящена теме организации автоматизированной разработки месторождений полезных ископаемых. В настоящее время многие зарубежные компании на рынке горных машин предлагают оборудование, позволяющее полностью автоматизировать процессы транспортировки, бурения, выемки полезного ископаемого и другие виды работ. Системы включают в себя установленные на машины датчики, контроллеры, навигационное и другое оборудование, позволяющее управлять ими. При четком представлении необходимости и востребованности горно-шахтной промышленности в высокотехнологичном оборудовании можно увидеть все предпосылки для создания современного самоходного горно-шахтного оборудования, в котором будут использованы новые технологии компоновки узлов и агрегатов с дополнительным оснащением приборами учета рабочих и технологических параметров работы оборудования. Наряду с дистанционным управлением, способствующим повышению безопасности производства горных работ, конструкцией машин должен быть предусмотрен ряд дополнительных функций, все разработки направлены на создание условий труда – безопасных и удобных, без снижения качества выполнения рабочих операций и общей производительности. В статье рассмотрены принципы создания высокотехнологичной продукции, предназначенной для повышения эффективности и безопасности проведения подземных горных работ при добыче урановых руд в сложных горнотехнических и горно-геологических условиях урановых месторождений. Проведены исследования возможных решений проблемы с учетом мирового опыта применения инновационных способов организации безопасного извлечения полезных ископаемых. Представлен план поэтапного решения вопросов организации производства, обозначены планируемые виды работ по созданию высокотехнологичного производства и внедрению высокой технологии. Основным результатом выполняемых исследований должны стать работы по созданию комплекса самоходного горно-шахтного оборудования, включающего самоходные бурильные установки для бурения шпуров, погрузочно-доставочные машины с дистанционным управлением, обеспечивающие повышение производительности и безопасности проведения подземных горных работ при добыче урановых руд в сложных горнотехнических и горно-геологических условиях урановых месторождений.

Ключевые слова: выемка полезного ископаемого, безлюдные технологии, дистанционное управление, техническое перевооружение, погрузочно-доставочная машина, урановые рудники

Информация о статье: Дата поступления 16 января 2019 г.; дата принятия к печати 14 февраля; дата онлайн-размещения 28 марта 2019 г.

Для цитирования: Шевченко А.Н., Храмовских В.А. О перспективах применения автоматизированных способов добычи полезных ископаемых. *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 104–111. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.

On application prospects of automated mining methods

© Aleksei N. Shevchenko, Vitaly A. Khramovskikh

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The article deals with the organization of automated mining of mineral deposits. Today there are many foreign companies in the market of mining machinery that offer equipment enabling full automation of the processes of transportation, drilling, mining of minerals, and other types of works. The systems include the equipment (sensors, controllers, navigation and others) installed on the machines that allows to control the machines. If there is a clear idea of the mining industry's need and demand in high-tech equipment you can see all the prerequisites for creating

modern self-propelled mining equipment, which will use new technology of component and assembly layouts with additional devices for monitoring working and technological parameters of equipment. The design of machines should include both a remote control contributing to the increased safety of mining works and a number of additional functions. All the developments are aimed at creating safe and convenient working conditions without compromising the quality of works and overall productivity. The article discusses the creation principles of high-tech products designed to improve the efficiency and safety of underground mining when extracting uranium ores in complex mining-engineering and mining-geological conditions of uranium deposits. Possible solutions to the problem have been studied with consideration of international experience in the application of innovative methods of mineral safe mining organization. A plan for a stage-by-stage solution of production organization problems is presented with specification of the planned types of works on creation of high-tech production and introduction of high technology. The main result of the research performed should be the works on the creation of a complex of self-propelled mining equipment including self-propelled drilling rigs for short-hole drilling, remote operated load haul dumpers ensuring improved productivity and safety of underground mining in the extraction of uranium ores in complex mining-engineering and mining-geological conditions of uranium deposits.

Keywords: mineral mining, unattended processing, remote control, technical re-equipment, load haul dumpers, uranium mines

Information about the article: Received January 16, 2019; accepted for publication February 14, 2019; available online March 28, 2019.

For citation: Shevchenko A.N., Khramovskiykh V.A. On application prospects of automated mining methods. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 104–111. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-104-111.

Введение

Современное горнодобывающее предприятие представляет собой крупное механизированное и автоматизированное производство, характеризующееся разнообразием технологического оборудования, которое в оптимальных условиях требует согласованности и взаимодействия между его отдельными элементами.

Рациональное использование материалов и трудовых ресурсов, переоборудование горных предприятий на основе нового высокоэффективного автоматизированного оборудования, внедрение прогрессивных технологий дистанционного управления дают возможность значительно повысить безопасность проведения работ, а также производительность и качество продукции.

Материалы и методы исследования

Увеличение добычи полезных ископаемых в горнодобывающей промышленности во многом обусловлено техническим перевооружением предприятий на основе комплексной механизации и

автоматизации производственных процессов, повышением безопасности и экономической эффективности производства. Следует отметить, что в настоящее время недостаточно внимания уделено вопросам создания технологии с внедрением малолюдной и безлюдной технологии добычи полезного ископаемого. Под системами безлюдной технологии подразумевается инновационное направление научной мысли, в которой рассматривается использование робототехники для выполнения рутинной, вредной и опасной работы без непосредственного участия человека. Робототехника выступает в качестве инструмента обеспечения безопасности и высокой производительности труда за счет исключения простоев оборудования, сокращения количества обслуживающего персонала непосредственно в забое, эффективной оптимизации управления и т. д.

Горная техника, применяемая на горных предприятиях, полностью не избавляет работающих от негативного воздействия факторов внешней среды, воздействия динамических нагрузок,

вибраций и циклически-монотонно совершаемых операций. Для эффективной защиты персонала возникает необходимость вынесения рабочих мест за пределы машины и создания условий дистанционного управления горными машинами и оборудовани­ем, поскольку здоровье людей, особенно обладающих высокой квалификацией и опытом управления техникой, – один из самых главных и ценных капиталов любого предприятия [1].

Принимая во внимание положительные стороны технологий дистанционного управления, следует рассмотреть возможность создания высокотехнологичной продукции, предназначенной для повышения эффективности и безопасности проведения подземных горных работ на примере добычи урановых руд в сложных горнотехнических и горно-геологических условиях урановых месторождений Забайкалья.

Следует отметить, что часто на предприятиях, действующих долгое время, наблюдается схожая ситуация, когда горно-геологические условия добычи полезного ископаемого постоянно усложняются и все беднее становятся руды, а самое главное, нормы радиационной безопасности требуют выдвигания на первый план защиты персонала от внешнего гамма-излучения, особенно в блоках с богатым содержанием урана в руде. Снижение дозы облучения персонала за счет применения новых подходов к механизации процесса добычи полезного ископаемого позволит решить проблему чрезмерного облучения персонала и избежать перевода рабочих в течение года на другие рабочие места.

Использование современных инновационных способов дистанционного управления горными машинами и механизмами позволит минимизировать негативное воздействие опасных факторов рабочей зоны на человека за счет сокращения времени пребывания персонала в особо опасных условиях.

Результаты исследования и их анализ

Опыт разработки сложноструктурных урановых месторождений и анализ проводимых опытно-промышленных испытаний обуславливают применение нисходящей слоевой выемки с применением высокопроизводительного самоходного горно-шахтного оборудования (ГШО) с дистанционным управлением [2].

Применяемые комплексы автоматизированного самоходного ГШО, включающего в себя самоходные бурильные установки (СБУ) для бурения шпуров и погрузочно-доставочные машины (ПДМ) с дистанционным управлением, должны обеспечивать:

- повышение безопасности сотрудников за счет снижения радиационного воздействия на персонал, которое имеет прямую зависимость от пылеобразования, возникающего при бурении шпуров и транспортировке руды от забоя до рудоприемника;

- повышение производительности и качества продукции за счет снижения потерь и разубоживания урановых руд вследствие уменьшения площади обрабатываемого забоя.

В ходе выполнения комплексного проекта по созданию и организации производства высокотехнологичного самоходного ГШО на первом этапе должны быть созданы ПДМ и СБУ с элементами систем дистанционного управления [3].

ПДМ предназначена для применения вне дорог общего пользования для погрузки разрыхленной горной массы из штабеля, последующей доставки и разгрузки ее в транспортные средства, в том числе кузова автосамосвалов, приемные бункеры, рудоспуски, конвейеры в горных выработках при подземной разработке полезных ископаемых и строительстве подземных сооружений. СБУ предназначена для бурения шпуров в подземных выработках при разработке полезных ископаемых и строительстве подземных сооружений.

Обе машины могут выпускаться в модификации с дизельным двигателем либо с электрическим силовым приводом, а также в модификации на аккумуляторных батареях.

Машины должны отличаться малыми габаритами, обеспечивающими высокую маневренность и надежность для использования в сложных горнотехнических условиях, и хорошо подходить для эксплуатации в узких тоннелях с ограниченной высотой и грязной рабочей поверхностью, быть рассчитаны для работы в среде, опасной по газу и пыли.

Немаловажен тот факт, что создание инновационного ГШО позволит расширить модификационную линейку оборудования, пользующуюся спросом на рынке горнодобывающих предприятий, а также будет отвечать требованиям политики импортозамещения.

Таким образом, сложная и, безусловно, актуальная научно-техническая проблема, имеющая большое практическое значение, может быть решена при помощи: разработки документации и технических требований по созданию ГШО, обеспечивающего высокую производительность, минимальное разубоживание и, самое главное, защиту персонала от негативного влияния излучения при обработке маломощных и богатых по содержанию полезного компонента рудных тел урановых месторождений; изготовления прототипов разрабатываемого ГШО с элементами систем дистанционного управления и их адаптации для реальных условий эксплуатации [3–6].

Обсуждение

Повышение эффективности работы ГШО за счет широкого использования достижений информационных технологий в конструкции самой техники происходит путем создания так называемых умных машин, выполняющих операции по разработанным алгоритмам. В частности, применение спутниковых навигационных систем актуально и целесообразно для

позиционирования горного оборудования, диспетчеризации рудничного и карьерного транспорта, определения объемов выемки горной массы, контроля устойчивости естественных и техногенных откосов, обеспечения контроля производства, надежной связи, в том числе сквозь массивы горных пород, и для других целей [7, 8].

Рядом зарубежных компаний горного машиностроения разработаны и уже испытаны в производственных условиях автономные карьерные автосамосвалы и буровые станки, а также автономное технологическое оборудование для подземных горных работ. Некоторые виды горного оборудования адаптированы под дистанционное управление операторами, в том числе находящимися на значительном удалении от непосредственных мест производства горных работ [8–10].

Проведенные испытания беспилотных автосамосвалов подтверждают [8, 9, 11] реальность автономизации практически любого горного оборудования: погрузчиков, экскаваторов, буровых станков, бульдозеров и иных машин, особенно в условиях Севера и Сибири. А если учесть тот факт, что продвижение горнодобывающей промышленности осуществляется в северные и северо-восточные районы России, то спрос на технику с дистанционным управлением будет увеличиваться.

На первом этапе исключения человека из производственного процесса полезно и, по-видимому, неизбежно использование оборудования, дистанционно управляемого оператором, применяемого в нестандартных и неблагоприятных условиях, хотя конечной целью должно быть создание полностью автономной технологии с элементами искусственного интеллекта. Тогда роботизированная машина самостоятельно будет принимать решения к действию в соответствии с анализируемой информацией. К тому же появляется ряд полезных

функций, предоставляемых информационными системами, для мониторинга использования горной техники, таких как: диспетчеризация и сбор данных о ключевых параметрах функционирования машин для согласования ритмичности работы всего сложного комплекса оборудования горного предприятия; системы прогнозирования выхода из строя элементов горного оборудования для снижения расходов на ремонт и эксплуатацию техники; системы динамического взвешивания для строго учета количества погруженной массы и многие другие системы, отвечающие за расход ресурсов и безопасность.

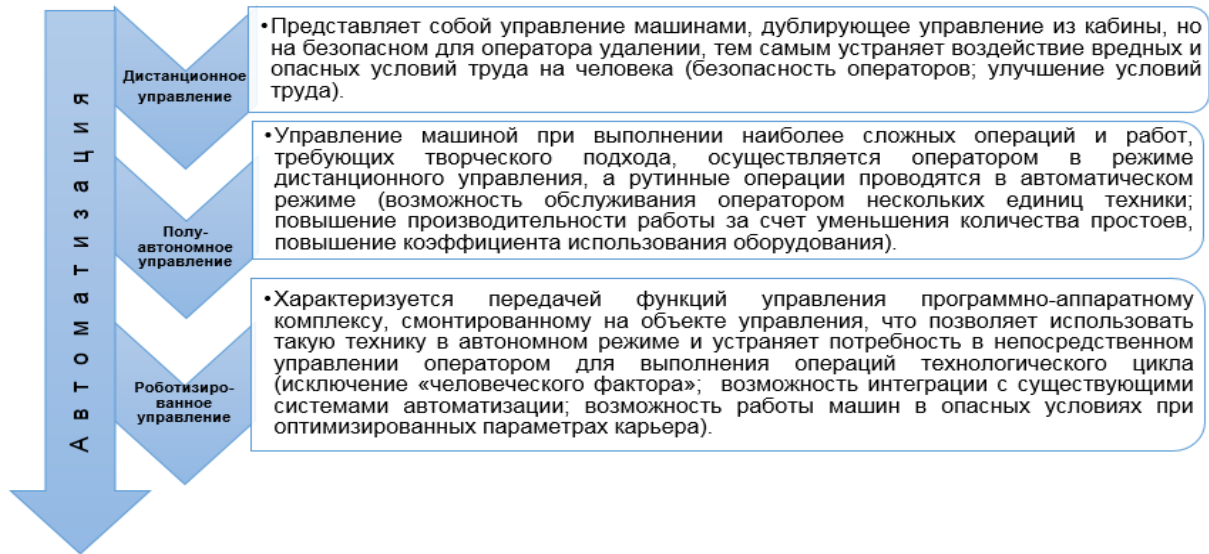
Увеличение стоимости оборудования при переориентации на дистанционно управляемые или автономные машины быстро компенсируется увеличением их производительности. Отмечается, что средняя скорость у автономных самосвалов намного выше, чем у машин, управляемых человеком [7]. Кроме того, уменьшается количество несчастных случаев, а производственные травмы и профессиональные заболевания исключаются. Время простоя оборудования из-за загазованности или запыленности воздуха сводится к минимуму, так как в рабочем пространстве не будет людей.

Добыча полезных ископаемых в промышленно развитых странах сейчас находится на стадии перехода к автоматизированной добыче, в то время как в странах третьего мира, где затраты на рабочую силу относительно невелики, потребность в повышении эффективности остается низкой.

На сегодняшний день крупнейшими мировыми производителями горно-шахтного и карьерного оборудования накоплен значительный опыт создания и эксплуатации горнотранспортных комплексов с частичным роботизированным управлением, при этом выполнение самых сложных операций находится в

ведении оператора в ручном режиме, а монотонный труд отдан автоматике. Таким образом, можно представить развитие уровня автоматизации в зависимости от объема человеческого участия в процессе управления горными машинами в виде трех основных этапов: дистанционное управление (дублирующее управление на безопасном для оператора удалении); комбинированное (управление машиной при выполнении наиболее сложных операций и работ, требующих творческого подхода, которое осуществляется оператором в режиме дистанционного управления, при этом рутинные операции осуществляются в автоматическом режиме); полностью роботизированное (позволяет использовать технику в полностью автономном режиме, под управлением программно-аппаратного комплекса, лишенного потребности в непосредственном участии оператора для выполнения операций технологического цикла) (рисунок).

Нередко возникают опасения, что повсеместное внедрение систем автоматизации добычи полезных ископаемых приведет к сокращению числа рабочих мест. Но в целом это не оправдано: хоть некоторые специальности и могут стать ненужными (это в первую очередь относится к выполнению работы в опасных и антисанитарных условиях или к выполнению тяжелой и/или монотонной работы), автоматизация приведет к созданию новых рабочих мест, поскольку остается потребность в высококвалифицированном ремонтном персонале непосредственно на горнодобывающем предприятии. Также сохраняется невозможность полной автоматизации сложных технологических процессов (например, селективной выемки, действий в нестандартных ситуациях), поэтому для предприятий с большим количеством таких операций количество персонала будет только увеличиваться [12].



**Виды удаленного управления по степени автоматизации
в зависимости от объема человеческого участия**
*Types of remote control according to the automation degree
depending on the amount of human participation*

Для производителей горного, горно-транспортного и вспомогательного оборудования основной целью должно стать создание автономных «умных» машин, которые позволят полностью вывести людей из опасных рабочих процессов горного производства [8].

Наше видение решения поставленной задачи заключается в предложении поэтапного плана проработки вопросов организации производства и внедрения самых современных наработок мирового уровня на предприятиях-изготовителях горного оборудования.

Основные этапы и необходимые виды работ по созданию высокотехнологичного производства и внедрению высокой технологии должны включать следующее: проведение исследования рынка ГШО с целью обоснования модельного ряда; анализ конструкции производимого ГШО; подготовка перечня деталей и узлов, подлежащих доработке и повторной разработке; изготовление базовых агрегатов и опытных образцов разрабатываемого ГШО; моделирование и выполнение расчетов разрабатываемого ГШО; проведение испытаний опытных образцов и системы дистанционного

управления разрабатываемого ГШО согласно программам и методикам исследовательских испытаний; разработка технологических рекомендаций по применению разрабатываемого ГШО и пр.

Реализация данного проекта будет способствовать: созданию нового импортнезависимого наукоемкого ГШО с системой дистанционного управления; исключению опасного радиационного воздействия на операторов ГШО при добыче полезного ископаемого шахтным методом за счет дистанционного управления ГШО; развитию современного уровня производства ГШО и повышению производительности труда, повышению научно-технического, производственно-технологического и кадрового потенциала на заводах-изготовителях, а также усилению конкурентоспособности производства; развитию и укреплению научно-исследовательского потенциала ИР-НИТУ, его материально-технической и интеллектуальной базы, используемой при выполнении научно-исследовательской, опытно-конструкторской и технологической работы в рамках проекта, а результаты научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологиче-

ских работ будут способствовать подготовке специалистов в области современного машиностроения и рационального недропользования.

Заклучение

Решение проблемы защиты персонала от негативного воздействия производственных факторов, а также повышение производительности горнодобывающих предприятий возможно за счет внедрения автоматизированных систем добычи полезного ископаемого. В мире накоплен положительный опыт создания

и применения технологий безлюдной выемки полезного ископаемого: как с использованием отдельных элементов дистанционного управления, так и полностью автоматизированного производства. Предложенный поэтапный план создания высокотехнологичного производства позволит отечественным горно-машиностроительным предприятиям расширить линейку выпускаемого ГШО, соответствующего современным мировым требованиям к безопасности и технологичности.

Библиографический список

1. Дистанционно-автоматизированное управление машинами // Горная промышленность. 2004. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/gorobor/1378-distantionno-avtomatizirovanoe-upravlenie-mashinami> (19.08.2018).
2. Алексеев О.Н. Перспективы развития горного машиностроения в ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 3. С. 253–255.
3. Овсейчук В.А., Алексеев О.Н. Разработка отечественной дешевой узкозахватной электрогидравлической погрузо-доставочной машины для отработки маломощных рудных тел // Вестник Читинского государственного университета. 2009. № 2 (53). С. 39–43.
4. Шурыгин С.В., Белоусов А.С., Алексеев О.Н. Совершенствование системы разработки сложно-структурных рудных тел на урановых рудниках ОАО «ППГХО» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 7. С. 22–25.
5. Овсейчук В.А., Алексеев О.Н. Предохранение горнорабочего очистного забоя от радиоактивного облучения при разработке урановых месторождений // Вестник Читинского государственного университета. 2009. № 3 (54). С. 19–24.
6. Алексеев О.Н. Оценка радиационной безопасности при добыче урановых руд на рудниках ОАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» // Вестник Читинского государственного университета. 2009. № 1 (52). С. 8–11.
7. Решетняк С.П. Дистанционно управляемое и автономное горное оборудование // Горная техника 2012: каталог-справочник. Вып. 2 (10). СПб.: Славутич, 2012. С. 46–50.
8. Решетняк С.П. Актуальные направления развития методов проектирования горнодобывающих предприятий // Горная промышленность. 2015. № 3 (121) [Электронный ресурс]. URL: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/8822-aktualnye-napravleniya-razvitiya-metodov-proektirovaniya-gornodobyvayushchikh-predpriyatij> (08.09.2018).
9. Cooper P. Automation & Remote Mining // International Mining [Электронный ресурс]. URL: <https://im-mining.com/2012/01/01/automation-remote-mining/> (12.08.2018).
10. Smith B. Automation for mining in remote locations // AZoMining [Электронный ресурс]. URL: <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1349> (14.08.2018).
11. Лисенков А.А., Куандыков А.А., Букейханова С., Лысенко С.Б. Интеллектуализация систем проектирования, управления и функционирования горного производства // Горная Промышленность. 2017. № 6 (136). С. 88–91.
12. Журавлев А.Г. Тенденции развития транспортных систем карьеров с использованием роботизированных машин // Проблемы недропользования. 2014. № 3. С. 164–175. [Электронный ресурс]. URL: <https://trud.igduran.ru/edition/3> (22.08.2018).

References

1. Automated remote control of machines. *Gornaya Promyshlennost'* [Mining Industry], 2004, no. 4. Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/gorobor/1378-distantionno-avtomatizirovanoe-upravlenie-mashinami> (accessed 19 August 2018).

2. Alekseev O.N. Development prospects of mining machine-building in the "Priargun Production and Mining and Chemical Association" OJSC. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2013, no. 3, pp. 253–255. (In Russ.).

3. Ovseichuk V.A., Alekseev O.N. Development of domestic cheap narrow-cut electrohydraulic loader for shallow ore bodies. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Chita State University Bulletin], 2009, no. 2 (53), pp. 39–43. (In Russ.).

4. Shurygin S.V., Belousov A.S., Alekseev O.N. Improving the complex-structure ore body mining method in uranium mines of "Priargun Mining and Chemical Production Association" OJSC. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2013, no. 7, pp. 22–25. (In Russ.).

5. Ovseichuk V.A., Alekseev O.N. Stope protection from radioactive radiation under development of uranium deposits. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Chita State University Bulletin], 2009, no. 3 (54), pp. 19–24. (In Russ.).

6. Alekseev O.N. Radiation safety evaluation under uranium ore mining on the mines of "Priargun Mining and Chemical Production Association" OJSC. *Vestnik Chitinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Chita State University Bulletin], 2009, no. 1 (52), pp. 8–11. (In Russ.).

7. Reshetnyak S.P. *Dstantsionno upravlyаемое i avtonomное gornoe oborudovanie* [Remotely

controlled and autonomous mining equipment]. *Gornaya tekhnika 2012* [Mining equipment 2012]. Iss. 2 (10). Saint-Petersburg: Slavutich, 2012, pp. 46–50. (In Russ.).

8. Reshetnyak S.P. Relevant development directions of mining enterprise design methods. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], 2015, no. 3 (121). Available at: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/8822-aktualnye-napravleniya-razvitiya-metodov-proektirovaniya-gornodobyvayushchikh-predpriyatij> (accessed 8 September 2018).

9. Cooper P. Automation & Remote Mining. International Mining. Available at: <https://im-mining.com/2012/01/01/automation-remote-mining/> (accessed 12 August 2018).

10. Smith B. Automation for mining in remote locations. AZoMining. Available at: <https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1349> (accessed 14 August 2018).

11. Lisenkov A.A., Kuandykov A.A., Bukeikhanova S., Lysenko S.B. Intellectualization of mine design, planning, control and operation systems. *Gornaya Promyshlennost'* [Mining Industry], 2017, no. 6 (136), pp. 88–91. (In Russ.).

12. Zhuravlev A.G. Tendencies of open pit transport systems progress employing robotic machines. *Problemy nedropol'zovaniya* [Problems of Subsoil Use], 2014, no. 3, pp. 164–175. Available at: <https://trud.igduran.ru/edition/3> (accessed 22 August 2018).

Критерии авторства

Шевченко А.Н., Храмовских В.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах

Шевченко Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и электромеханических систем, директор Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: shan@istu.edu*

Храмовских Виталий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры горных машин и электромеханических систем Института недропользования Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация; *e-mail: wax@istu.edu*

Authorship criteria

Aleksei N. Shevchenko, Vitaly A. Khramovskyykh have written the article, have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Information about the authors

Aleksei N. Shevchenko, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Machinery and Electromechanical Systems, Director of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: shan@istu.edu*

Vitaly A. Khramovskyykh, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mining Machinery and Electromechanical Systems of the Institute of Subsoil Use of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; *e-mail: wax@istu.edu*

Уважаемые коллеги!

1. В журнале публикуются статьи по следующей тематике:
 - геологическое строение рудных, нерудных, в том числе горючих, месторождений полезных ископаемых (вмещающие комплексы пород, связь оруденения с магматизмом, метаморфизмом, осадконакоплением);
 - тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
 - минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
 - генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых;
 - минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
 - методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
 - экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
 - физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
 - геофизические, геохимические и другие методы поисков месторождений полезных ископаемых;
 - геоинформационные технологии в науках о Земле;
 - технология и техника горно-буровых работ;
 - технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
 - технология обогащения и переработки минерального сырья;
 - геммология;
 - гидрогеология и инженерная геология;
 - безопасность жизнедеятельности;
 - геоэкология.
2. Статьи принимаются от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.
3. Объем статьи должен быть не более 15 с. машинописного текста, включая библиографический список, таблицы и иллюстрации.
4. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows на CD-диске или по электронной почте geo_info@istu.edu. В обязательном порядке в ауд. Ж-04 предоставляется два экземпляра в распечатанном виде на листах формата А4. Электронный и печатный варианты должны быть полностью идентичны. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 14 (строки через 1,0 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху, снизу, слева и справа – 2,5 см, абзацный отступ – 1 см, ориентация страницы – книжная.
5. В структуру статьи должны входить: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, введение (краткое), цель исследования, материал и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, выводы или заключение, библиографический список и references, критерии авторства, конфликт интересов и сведения об авторах (вся информация предоставляется одним файлом).
6. Аннотация по объему должна быть 200–250 слов и композиционно содержать следующие разделы: цель, методы, результаты, выводы.
7. Статья должна сопровождаться актом экспертизы, сведениями обо всех авторах (название вуза, организации, учреждения, должность и структурное подразделение, нали-

чие ученой степени, ученого звания, контактные рабочий или сотовый (для связи) телефоны, почтовый и электронный адреса) на русском и английском языках. Образец оформления первого разворота статьи приводится ниже.

8. Текст статьи формируется в одну строку. Рисунки и таблицы помещаются в тексте непосредственно после абзаца с первой ссылкой на них.

9. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул, например MathType или Microsoft Equation Editor. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

10. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали. Дополнительно должны приводиться переводы названий таблиц на английский язык.

11. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 5 рисунков). Они должны быть выполнены чисто и аккуратно в соответствии с требованиями к геологической графике. Масштаб их должен быть пригодным для тиражирования, а размер – не более 160×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок должен иметь подпись (под рисунком), в которой дается объяснение всех его элементов. В электронном варианте статьи рисунки дополнительно предоставляются в виде отдельных файлов с расширением *JPEG. Для построения графиков и диаграмм следует использовать программу Microsoft Office Excel. Дополнительно должны приводиться переводы названий рисунков на английский язык.

12. Ссылки на литературные источники приводятся в тексте в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере обращения к источникам литературы. Минимальное количество источников в библиографическом списке – не менее 14. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, законы, государственные стандарты, положения (при необходимости обращения к этим источникам ссылку на них следует размещать в подстрочной сноске). Желательно ссылаться на оригинальные источники (первоисточники), на статьи и монографии по данной тематике, на публикации из высокорейтинговых источников. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science – не менее 5 источников); кроме того, рекомендуем ознакомиться с трудами ученых ИРНТУ по тематике работы, это можно сделать на сайте журнала или в системе РИНЦ, осуществив поиск по ключевым словам. Также в списке литературы должно быть не менее 5 ссылок на иностранные источники.

13. Список литературы составляется в двух вариантах*.

Первый вариант (библиографический список) оформляется на языке источника в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 2008.

Второй вариант (references) оформляется в виде транслитерации русского текста в латиницу с переводом на английский язык и служит для отслеживания цитируемости авторов. Он оформляется в том же порядке, что и библиографический список. На сайте

*В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов, не сокращая их на трех, четырех. Правильное описание используемых источников является залогом того, что цитируемая публикация будет учтена при оценке научной деятельности ее авторов (и, соответственно, организации, региона, страны). По цитированию журнала определяется его научный уровень, авторитетность, эффективность деятельности его редакционного совета и т. д.

translit.net можно бесплатно воспользоваться программой транслитерации русского текста на латиницу. В вариантах транслитерации необходимо предварительно выбрать вариант BSI.

Для русскоязычных статей из журналов, сборников, материалов конференций следует использовать следующий вариант структуры библиографической ссылки: авторы (транслитерация), перевод названия статьи на английский язык (обязательно должен соответствовать опубликованному переводу в цитируемом журнале, если таковой имеется), транслитерация названия источника и его перевод на английский язык в квадратных скобках (у журналов – только официальные названия, существующие на английском языке), выходные данные с обозначениями на английском языке (в получившемся описании заменяются обязательные элементы – «том» на «vol.», «№» на «no.», «с.» на «pp.» для диапазона страниц). Если есть, обязательно указывается DOI.

В иных источниках (книги, монографии) также в дополнение к транслитерации приводится перевод названия источника на английский язык, место издания обязательно должно быть переведено, а название издательства остается транслитерированным и обозначается добавлением слова Publ.

Описание статей, материалов конференций и книг на русском языке заканчивается описанием языка источника (для русского – In Russ.).

Ссылки на источники на иностранном языке приводятся без изменения.

Примеры оформления источников в References можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

14. Статья должна быть подписана всеми авторами (количество авторов должно быть не более пяти). Подписи авторов заверяются в канцелярии учреждения или вуза. Статьи аспирантов и магистрантов должны быть подписаны научным руководителем.

15. Желательно, чтобы к статье были приложены выписка из протокола заседания кафедры (лаборатории) о рекомендации публикации статьи и рецензия одного из членов редколлегии журнала.

16. Авторы статей, публикуемых в сборнике, обязуются содействовать его популяризации в своих организациях и содействовать подписке.

17. Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям. Поступающие в редакцию материалы возврату не подлежат.

18. Редакция оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

19. Представленные статьи проходят проверку на антиплагиат.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

Внимание! Публикация статей является бесплатной, включая один авторский экземпляр. Стоимость каждого дополнительного экземпляра журнала – 300 рублей.

Статьи, опубликованные в журнале «Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых», реферируются и рецензируются.

Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей.

По вопросам публикации обращаться по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, редколлегия, аудитория Е-317.

Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: 8 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com

Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, e-mail: lauzina@mail.ru

Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: 8 (3952) 405101, e-mail: sk@istu.edu

Статьи необходимо направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: 8 (3952) 405069, e-mail: geo_info@istu.edu, аудитория Ж-04.

Образец оформления статьи

УДК 549.09

МИНЕРАЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ РУД ТОМИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДИ (ЮЖНЫЙ УРАЛ)

© Е.М. Курчевская^а, М.В. Яхно^б, А.Е. Сенченко^с

^{а,с}НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Российская Федерация

^бИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Российская Федерация

РЕЗЮМЕ: **Цель.** Цель данной статьи заключается в исследовании технологических типов руд Томинского месторождения меди, изучении минерального состава вмещающих пород и руд каждого из трех типов, выявлении минералогических и структурно-текстурных особенностей руд, выявлении взаимосвязи изменения рудной минерализации и степени метаморфизма для каждого типа руд. **Методы.** Рудные тела Томинского медно-порфинового месторождения, залегающие в диоритах и кварцевых диоритах, представляют собой прожилковые и прожилково-вкрапленные скопления в зонах дробления. На месторождении широко развиты метасоматиты кварц-серицитовой формации. Изучение типов руд проводилось с использованием микроскопов. **Результаты.** В результате выделено три геолого-технологических типа руд в пределах Томинского месторождения. Первый тип представлен первичными сульфидными рудами, которые наблюдаются в среднем ниже глубины 50–55 м. По составу это хлорит-мусковит-кварцевые метасоматиты. Вмещающие породы представлены серицитизированными, хлоритизированными и карбонатизированными диоритами. В составе руд преобладают халькопирит и пирит. Практически вся медь содержится в халькопирите. Второй тип – это рудные зоны вторичного сульфидного обогащения. Этот тип сложен первичными и вторичными сульфидами меди. Все породы аргиллизированные и представлены метасоматитами различного состава. Все виды пород несут в себе рудную минерализацию. К третьему типу относятся окисленные руды, которые образуют зону окисления месторождения. Они делятся на три подтипа: глинистые, глинисто-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

Ключевые слова: Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд

Для цитирования: Курчевская Е.М., Яхно М.В., Сенченко А.Е. Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал). *Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42, № 1. С. 9–25. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-9-25.

MINERALOGICAL AND TECHNOLOGICAL TYPES OF TOMINSKOYE DEPOSIT COPPER ORES (SOUTHERN URAL)

© Elena M. Kurchevskaya^а, Marina V. Yakhno^б, Arkady Y. Senchenko^с

^{а,с}NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russian Federation

^бIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT. Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **Main conclusions.** The influence of metasomatic processes is indicated. The last have changed the structure and mineral composition of ores. The presence of primary rocks – diorites with saturated sulfide impregnation and insignificant metasomatic alterations is typical for the first type of ore. The rocks in the zone of secondary concentration have undergone intense metasomatic alteration. These rocks are saturated with iron hydroxides. The presence of clay and chloritized rocks characterize the zone of intense weathering. Ore mineralization is represented exclusively by oxidized minerals. Sulfides are rare. Variations in the mineral composition of the three types of ores influence the choice of ore processing methods at Tominskoye ore deposit.

Keywords: Tominskoye field, porphyry copper mineralization, metamorphism, technological ore types

For citation: Kurchevskaya E.M., Yakhno M.V., Senchenko A.Y. Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits*, 2019, vol. 42, no. 1, pp. 9–25. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-1-9-25.

Далее идут **текст статьи** (в виде: введение, цель исследования, материалы и методы исследования, результаты исследования и их обсуждение, заключение (выводы)), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorship criteria) и **конфликт интересов** (conflict of interests).

Информация об авторах

Курчевская Елена Михайловна, старший научный сотрудник НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Яхно Марина Владиславовна, старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых Иркутского национального исследовательского технического университета, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: ymar@istu.edu

Сенченко Аркадий Евгеньевич, генеральный директор НИИПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Российская Федерация; e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

Information about the authors

Elena M. Kurchevskaya, Senior Researcher of the Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Marina V. Yakhno, Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals of Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: ymar@istu.edu

Arkady E. Senchenko, CEO of the Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”, Irkutsk, Russian Federation; e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

ГЕОЛОГИЯ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Научный журнал

№ 1 (66) 2019

12+

Редактор Ф.А. Посысоева
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой
Перевод на английский язык В.В. Батицкой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 28.03.2019 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 15,25.
Тираж 500 экз. Зак. 95. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83