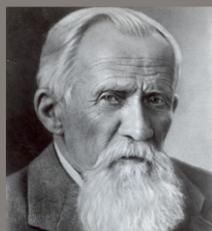


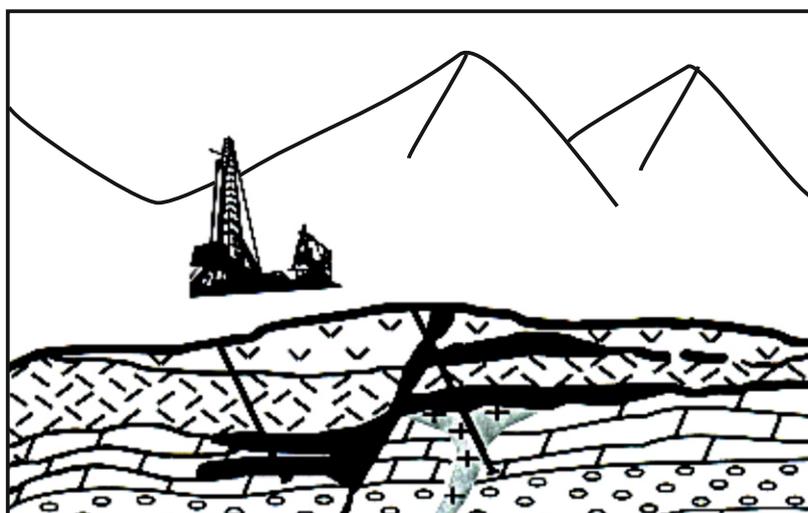
ISSN 2541-9455 (print)
ISSN 2541-9463 (online)

12+



ИЗВЕСТИЯ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ СЕКЦИИ НАУК О ЗЕМЛЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК

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



2019

Том 42 № 2

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 № 2

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. 2

**Irkutsk National Research
Technical University
Publishers**

2019

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

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), Korolov 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 № 2 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	123
Колонка главного редактора	
Лобацкая Р.М. О реновации издания журнала.....	127
Методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых	
Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. О формировании разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции (результаты физического моделирования).....	129
Качор О.Л. Разработка модели миграции мышьяка по почвенному профилю из накопленных отходов горно-перерабатывающей промышленности.....	144
Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. Интерпретация данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазописковых исследованиях на юге Сибирской платформы.....	151
Кочукова В.А., Пашевин А.М. Методика интерпретации электромагнитных зондирований в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (электрофациальный анализ).....	165
Пригара А.М. Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений.....	176
Технологии разведки и разработки месторождений полезных ископаемых	
Сорокин А.В. Моделирование системы управления электроприводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях.....	185
Чебан А.Ю. Горное оборудование для разработки рудных тел малой мощности и технология его применения.....	194
Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Буланов Н.С. Влияние микрокремнезема на физические свойства тампонажного камня.....	201
Гидрогеология и инженерная геология месторождений полезных ископаемых	
Ступин В.П. Картографирование морфосистем как основа мониторинга геологической среды водохранилищ.....	209

Нгуен Нгок Нам, Лай Тхи Биск Тхуи, Фам Динь Ан. Оценка эффективности методов рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при анализе глинистых минералов.....	221
Вашестюк Ю.В., Ряценок Т.Г. Использование метода «Микроструктура» при инженерно-геологической оценке глинистых и лессовых грунтов (на примере изысканий в районе правобережного примыкания Академического моста г. Иркутска).....	230
Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю., Батжаргал Долгорсурэн. Особенности изучения физико-механических свойств многолетнемерзлых массивов горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений.....	240
К сведению авторов.....	254

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. 2 2019

C O N T E N T S

Contents	125
-----------------------	-----

Chief Editor's Column

Lobatskaya R.M. On the journal renewal.....	127
--	-----

Methods of Mineral Deposits
Prospecting and Exploration

Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. On the formation of Malo-Botuobinskoye region faults, Yakutian diamond-bearing province (physical modeling results)	129
---	-----

Kachor O.L. Modeling of arsenic migration from the accumulated mining industrial waste along the soil profile.....	144
---	-----

Kompanies S.V, Kozhevnikov N.O., Murzina E.V., Emelyanov V.S. Interpretation of near-field transient electromagnetic sounding data with the account of induction-induced polarization in areal exploration for oil and gas in the south of the Siberian craton.....	151
--	-----

Kochukova V.A., Pashevin A.M. Procedure of electromagnetic sounding interpretation for geoelectric conditions of Siberian craton south (electric facies analysis)	165
--	-----

Prigara A.M. Specifics of the underground seismics method using shear waves with reflection separation.....	176
--	-----

Technologies of Mineral Deposits
Exploration and Development

Sorokin A.V. Modeling a control system for the lifting drive of ESH 20.90 excavators operating in arduous mining conditions.....	185
---	-----

Cheban A.Yu. Mining machinery for thin bed ore bodies and technology of its application.....	194
---	-----

Buglov N.A., Butakova L.A., Bulanov N.S. Influence of silica fume on the physical properties of oil-well cement stone.....	201
---	-----

Hydrogeology and Engineering Geology
of Mineral Deposits

Stupin V.P. Morphosystems mapping as the basis for monitoring water reservoirs' geological environment.....	209
--	-----

Nguyen Ngoc Nam, Lai Thi Bich Thuy, Pham Dinh An. Effectiveness evaluation of X-ray diffraction and differential scanning calorimetry methods in the study of clay minerals.....	221
Vashestyuk Yu.V., Ryashchenko T.G. “Microstructure” method for engineering-geological evaluation of clay and loess soils (the right-bank adjunction zone of Academic Bridge / Academichesky most, Irkutsk)	230
Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Bolotnev A.Yu., Batjargal Dolgorsuren. Specifics of permafrost rock mass’ physical-mechanical properties study in evaluation of ore deposit geotechnical conditions.....	240
Information for the authors	254

О реновации издания журнала

Добрый день, уважаемые коллеги!

Перед Вами очередной, казалось бы, традиционный и по содержанию, и по оформлению номер журнала «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых». Однако это не совсем так. Выпуск, который Вы держите в руках или читаете на экране монитора, в привычном для Вас формате выходит в последний раз.

Нет-нет, это не завершающий номер журнала! Редакционный совет планирует его долгую и, мы надеемся, успешную жизнь, не менее плодотворную, чем та, что сопровождала каждый номер с 2004 года. Усилиями его основателя и прежнего главного редактора профессора Жана Вячеславовича Семинского он выходил полтора десятилетия и продолжает выходить как издание, включенное в перечень журналов, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций.

Сегодня давно примелькавшийся глазу журнал появится перед Вами, наши дорогие читатели, в последний раз, поскольку его очередной, сентябрьский номер готовится редакцией в новом формате. Осенний, третий выпуск текущего года выйдет в свет под другим названием: «Науки о Земле и недропользование» – в обновленном в соответствие с такой переменной дизайне обложки и оформлении страниц.

На первый взгляд может показаться, название, рисунок на обложке – так ли уж это важно? Однако старая поговорка гласит: «Как корабль назовешь, так он и поплывет». Хотя, разумеется, дело не в названии. Ясно, что главные устремления редакционной коллегии, редакционного совета и постоянных авторов журнала направлены на совершенствование содержания публикуемых научных результатов, отражение новейших достижений геологических наук, обогащенных современными методами исследований, принципиально новыми технологиями сбора и обработки фактических данных, возможностями современных цифровых технологий.

За минувшие годы в геологической науке и практике произошли существенные перемены и, прежде всего, изменились акценты в научных приоритетах. Сегодня междисциплинарные исследования, многие десятилетия являвшиеся основой развития геологического знания, углубляются и дополняются мульти- и трансдисциплинарными. В этой связи современные статьи в любой области давно перестали быть прерогативой одного научного направления, поскольку стоящие перед ученым задачи требуют для своего разрешения синтеза основ многих дисциплин со спецификой их индивидуального теоретического и методологического потенциала.

Обязанность научного журнала – откликаться на запросы времени, не создавая из рубрики «прокрустово ложе», а, напротив, стимулируя авторов на написание статей не только глубоко обоснованного содержания, но и широкой востребованности у научной общественности. Наш журнал в прежнем формате отличался большим тематическим спектром. Реновация не только не изменит в этом отношении его политику, но даже направит усилия редакционного совета и рецензентов на поддержку публикаций результатов современных мультидисциплинарных исследований.

Получение нового научного знания никогда не оставалось «вещью в себе», особенно знания геологического, которое всегда было и остается ориентированным на конечный практический результат, теснейшим образом связанный с прикладной геологией и разумной, научно обоснованной эксплуатацией недр.

Реновацией журнала мы постараемся четко определить публикационную нишу и специфику отражения научных достижений, стимулировать постоянных и привлечь в журнал новых авторов, принципиально повысить индекс цитируемости их публикаций, что позволит самому журналу изменить научный рейтинг и повысить статус в обьеме существующих геологических изданий.

Таким образом, новое название журнала «Науки о Земле и недропользование», на взгляд редакции, окажется более привлекательным и востребованным для геологов и горняков, исповедующих современные подходы, методы и технологии в решении широкого круга задач в науках о Земле, будет направлять Вас, наши дорогие авторы, полнее и фундаментальнее освещать актуальные научные достижения, соответствующие мировым требованиям науки первой трети двадцать первого века.

Несмотря на то, что общие тенденции публикационной политики журнала не претерпят существенных изменений, просим всех Вас обратить внимание на скорректированные «Требования для авторов», предъявляемые к предоставлению статей. Они имеются в текущем номере журнала и размещены на сайте.

Редакционный совет журнала полагается на Ваше понимание и поддержку. Ждем Ваших содержательных статей и надеемся на дальнейшее многолетнее сотрудничество!



Лобацкая Раиса Моисеевна,

главный редактор,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
заведующая кафедрой ювелирного дизайна и технологий,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: lobatskaya@gmail.com

Raisa M. Lobatskaya,

Editor-in-Chief,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Head of the Department of Jewelry Design and Technology,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: lobatskaya@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 551.24

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-129-143>

О формировании разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции (результаты физического моделирования)

© А.В. Черемных, А.С. Гладков, А.С. Черемных

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данного исследования является уточнение специфики формирования кимберлитоконтролирующих разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции на основе экспериментов физического моделирования разрывообразования в чехле платформ при знакопеременных движениях блоков фундамента. Физическое моделирование на эквивалентных материалах проведено в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Модельный материал – водная суспензия монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с. Для проведения опытов изготовлено дополнительное приспособление «Фундамент 3», состоящее из серии линейно вытянутых блоков, имитирующих разломно-блоковую структуру Вилюйско-Мархинской разломной зоны Сибирской платформы в пределах района исследования. В серии из 12 опытов рассмотрено влияние скорости и вектора перемещения штампов экспериментальной установки на специфику структурного парагенеза вторичных разрывов, формирующихся в модельном аналоге чехла платформы. Сопоставление итоговых сетей разрывов в экспериментах, отличающихся граничными условиями, со схемой разломно-блокового строения Мирнинского кимберлитового поля и планами кимберлитовых тел позволило уточнить специфику формирования кимберлитоконтролирующих разломов района исследований. Сеть разрывов в пределах областей динамического влияния разломов Вилюйско-Мархинской зоны сформировалась при относительно невысокой скорости смещения блоков фундамента платформы, так как именно при медленной скорости смещения штампов экспериментальной установки наблюдалась сеть разрывов, параметры которой сопоставимы с природным аналогом. Структуры растяжения, наиболее благоприятные для рудоотложения, наблюдались в моделях с медленной скоростью перемещения штампов экспериментальной установки. Кроме того, они формировались в разломных зонах при знакопеременных смещениях крыльев только на втором этапе деформирования моделей (после смены направления перемещения блоков фундамента) в обстановках сдвига или трансенсии. В обстановке транспрессии второго этапа раздвиги этого типа не наблюдаются, а при трансенсии растяжение осуществляется не только у раздвигов е-типа, но и у плоскостей сколов второго этапа деформирования моделей. Наиболее амплитудные структуры растяжения всех типов тяготеют к центральным частям моделируемых разломных зон.

Ключевые слова: физическое моделирование, разломообразование, знакопеременные движения, Якутская алмазоносная провинция, сдвиги, фундамент, Сибирская платформа

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке АК «АЛРОСА» (ПАО).

Информация о статье: Дата поступления 30 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 3 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. О формировании разломов Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции (результаты физического моделирования). *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 129–143. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-129-143.

On the formation of Malo-Botyobinsky region faults, Yakutian diamond-bearing province (physical modeling results)

© Aleksandr V. Cheremnykh, Andrei S. Gladkov, Aleksei S. Cheremnykh

Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of study is to clarify the specifics of the formation of kimberlite-controlling faults in Malo-Botuobinsky region, Yakutian diamond-bearing province, using physical modeling of rupture genesis for the sedimentary cover with alternating movements of the foundation blocks. Physical modeling for equivalent materials has been carried out at the Tectonic Physics Laboratory of the Earth's Crust Institute. As the model material, an aqueous suspension of montmorillonite clay with viscosity of 10^6 – 10^7 Pa·s has been used. For the purpose of the experiment, a special setup "Basement 3" has been made. The setup consists of a series of linearly elongated blocks imitating the fault-block structure of the Vilyui-Markhinsk fault zone of the Siberian platform within the study area. In the series of 12 experiments, the effect of the experimental setup dies' velocity and displacement vector on the specific structural paragenesis of the secondary faults formed in the model platform cover has been studied. The comparison of the fault networks obtained in experiments with different boundary conditions, and the fault-block structure scheme of the Mirny kimberlite field and the kimberlitic bodies plans has clarified the specifics of the kimberlitic-controlling faults formation in the study area. The conclusion is that the fault network within the area of dynamic influence of the Vilyui-Markha faults has been formed at a relatively low rate of the platform basement blocks displacement. This is confirmed by the fact that the fault network with the parameters comparable with the natural model is observed at a low speed of the experimental setup dies displacement. The extension structures that are most favorable for ore deposition are observed in the models with a slow rate of the experimental setup dies displacement. Besides, they are formed in the fault zones with alternating block displacements only at the second stage of model deformation (after changing the direction of the basement blocks movement) in strike-slip or transtension conditions. In the second-stage transtension conditions, openings of this type are not observed; and under transpression, the tension is observed not only for the e-type openings, but also for the cleavage planes of the second stage model deformation. The highest amplitude tension structures of all types tend to belong to the central parts of the model fault zones.

Keywords: physical modeling, fault formation, alternating basement movements, Yakutian diamond-bearing province, strike-slip faults, basement, Siberian platform

Acknowledgements: The work has been performed with a financial support of PJSC "ALROSA".

Information about the article: Received April 30, 2019; accepted for publication June 3, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. On the formation of Malo-Botuobinskoye region faults, Yakutian diamond-bearing province (physical modeling results). *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 129–143. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-129-143.

Введение

Мало-Ботуобинский район Якутской алмазонасной провинции известен кимберлитовыми трубками с высоким содержанием алмазов – трубки Мир и Интернациональная. Эти и другие месторождения района пространственно приурочены к Вилуйско-Мархинской

зоне глубинных разломов. Основные разломы зоны и специфика их формирования детально охарактеризованы (в том числе в ходе экспериментов) в работах¹ [1].

Так, наиболее крупные дизъюнктивы Вилуйско-Мархинской разломной

¹ Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисковых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с. / Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. Tectonic-physical studies in diamond exploration: learning manual. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2008. 175 p.

зоны – Буордахский, Западный, Параллельный, Центральный и Восточный – имеют север-северо-восточное простирание (рис. 1). Они проявлены в фанерозойском чехле Сибирской платформы в виде линейных зон шириной до 2,5–3 км, внутренняя структура которых представлена серией субвертикальных разрывов запад-северо-западного, северо-западного, север-северо-восточного простираний. Известные кимберлитовые тела района исследований расположены в узлах пересечения север-северо-восточного и запад-северо-западного разрывов [2–4 и др.].

Кроме того, выявлена последовательность изменения напряженно-деформированного состояния Мало-Ботуобинского района²: 1) северо-восточное сжатие – северо-западное растяжение; 2) северо-западное сжатие – северо-восточное растяжение; 3) субмеридиональное сжатие – субширотное растяжение. В связи со сменой простирания осей главных нормальных напряжений по основным разломам Вилюйско-Мархинской зоны происходили вначале правосторонние сдвиговые смещения, затем – левосторонние перемещения блоков, а позднее – раздвиговые деформации. Внедрение кимберлитов связывается с образованием структур присдвигового растяжения на втором (левосдвиговом) этапе формирования разломно-блоковой структуры района.

Цель наших исследований – уточнить условия формирования кимберлитоконтролирующих разломов (направление приложения внешнего воздействия и скорость деформирования) на основе экспериментов физического моделирования разрывообразования в чехле платформ при знакопеременных движениях блоков фундамента.

Методика проведения экспериментов

Моделирование с применением эквивалентных материалов на протяжении многих лет широко используется для установления специфики разломообразования при различных граничных условиях [5–10 и др.]. Наши эксперименты выполнены на установке «Разлом» в лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН. Опыты проведены с соблюдением условий подобия и размерностей [11, 12]. В качестве модельного материала применялись водные суспензии монтмориллонитовой глины с вязкостью 10^6 – 10^7 Па·с. Вязкость модельного материала определялась в зависимости от влажности глинистой пасты по методике, изложенной в работе [13].

Для моделирования разрывообразования в чехле Сибирской платформы при знакопеременных смещениях блоков фундамента Мало-Ботуобинского района потребовалось изготовление дополнительного приспособления «Фундамент 3», которое состоит из серии линейно вытянутых блоков, имитирующих разломно-блоковую структуру субмеридиональной на данной площади Вилюйско-Мархинской разломной зоны фундамента Сибирской платформы (рис. 2). Блоки соединены между собой и перемещаются относительно друг друга с постоянной скоростью. Экспериментальная установка с модернизированными штампами «Фундамента 3» позволяла воспроизводить в моделях как правосторонние, так и левосторонние сдвиговые смещения блоков. Кроме того, для каждого модельного аналога разлома была заложена возможность реализации условий транспрессии (сдвиг с дополнительным сжатием) и транстенсии (сдвиг с

²Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопроисловых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с. / Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. Tectonic-physical studies in diamond exploration: learning manual. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2008. 175 p.

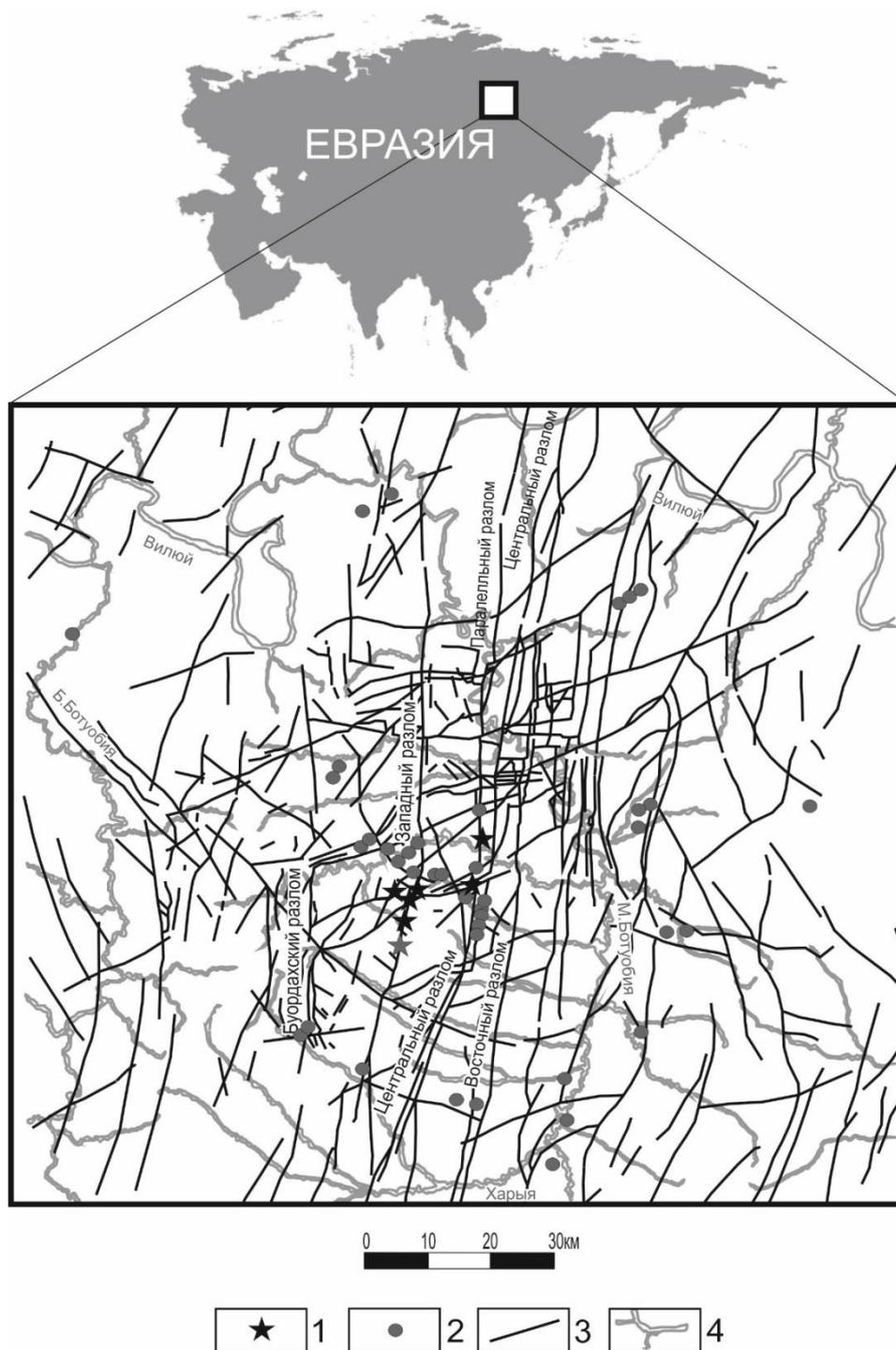


Рис. 1. Карта разломов фундамента Мало-Ботуобинского района с разрывными нарушениями по данным сейсморазведки:

1 – кимберлитовые тела Мирнинского поля; 2 – туфовые трубы;
 3 – разрывные нарушения фундамента по данным интерпретации
 методом общей глубинной точки; 4 – речная сеть

Fig. 1. Fault map of the Malo-Botuobinsky region basement compiled by seismic data:

1 – kimberlite bodies of the Mirninsky field; 2 – tuff pipes;
 3 – basement faults according to the interpretation
 of the common point depth method data; 4 – river network

растяжением). Последние достигались за счет конфигурации штампов, верхняя часть которых представляла собой пластины, перекрывающие друг друга, а нижняя – жесткие блоки, расстояние между которыми было от 5 до 30 мм (см. рис. 2, А, В).

Проведена серия из 12 экспериментов, и рассмотрена специфика разрывообразования в чехле платформы на моделях, имитирующих разломно-блоковую структуру фундамента района исследований. От опыта к опыту изменялись: 1) величина смещения штампов экспериментальной установки; 2) скорость перемещения штампов; 3) угол между направлением перемещения штампов и модельными аналогами магистральных сместителей основных разломов Вилуйско-Мархинской разломной зоны (были заданы граничные условия моделей с простираем вектора перемещения штампов – 1° , 6° и 10°).

Каждый эксперимент проводился согласно приведенной ниже последовательности операций. Модельный материал тщательно перемешивался. Затем, после взятия пробы для определения вязкости, он размещался равномерным слоем на дополнительном приспособлении «Фундамент 3». Толщина слоя, согласно теории подобия, соответствовала мощности осадочного чехла в пределах района исследований с необходимым увеличением, учитывающим денудацию. Поверхность модели выравнивалась, после чего производилось перемещение штампов экспериментальной установки с одной из скоростей: 10^{-4} или 10^{-5} м/с. На первом этапе штампы «Фундамента 3» смещались на суммарную величину от 80 до 170 мм от исходного положения. Затем направление перемещения штампов изменялось на противоположное. На втором этапе опыт продолжался до двукратного суммарного смещения

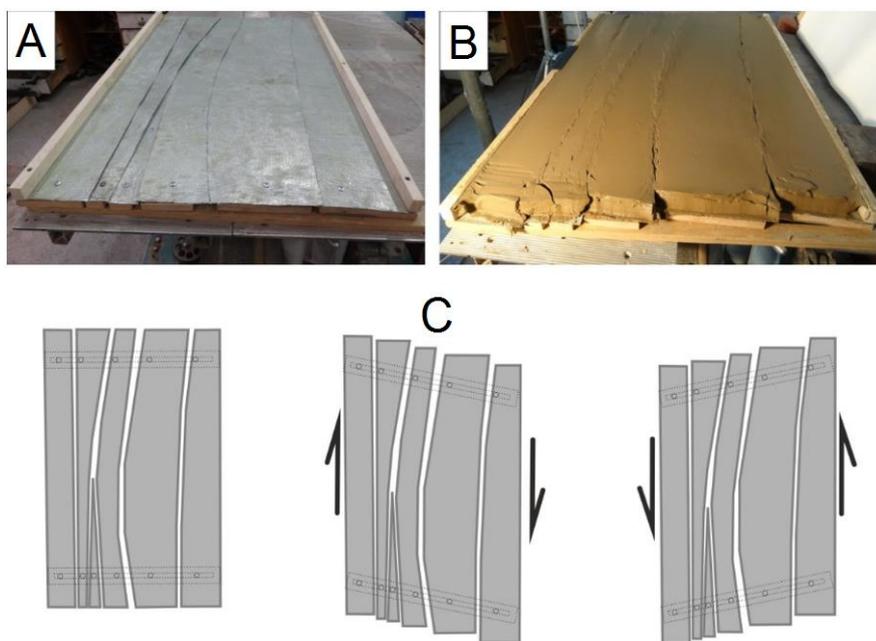


Рис. 2. Дополнительное приспособление «Фундамент 3», имитирующее разломно-блоковую структуру Вилуйско-Мархинской разломной зоны:

А – общий вид без модельного материала; В – модель на втором этапе эксперимента;

С – схемы, показывающие механизм и этапы смещения блоков «Фундамента 3»

Fig. 2. Auxiliary setup "Basement 3"

imitating the fault-block structure of the Vilyui-Markha fault zone:

A – general view without model material; B – model at the second stage of the experiment;

C – diagrams showing the mechanism and displacement stages of "Basement 3" blocks

штампов по сравнению с первым этапом. Для подавляющего большинства экспериментов на первом этапе воспроизводились условия правостороннего сдвига, а на втором – сдвига с левосторонним смещением крыльев (см. рис. 2, С). Все изменения на поверхности моделей фиксировались фотосъемкой через определенные промежутки времени, что позволило проследить динамику разрывообразования и установить особенности формирующихся разрывных дислокаций.

Результаты

Проведенное исследование подтвердило закономерности разрывообразования в сдвиговых зонах с наложенными разнонаправленными деформациями, выявленные ранее [1, 14–16], и позволило уточнить условия формирования кимберлитовмещающих разрывов в чехле Сибирской платформы, в Мало-Ботуобинском районе Якутской алмазодобывающей провинции, при знакопеременных смещениях блоков фундамента. Рассмотрим специфику структурообразования в моделях на примере разрывных дислокаций известного парагенеза зон скалывания [17, 18 и др.], который состоит из таких элементов, как: сдвиги Риделя [5] – R и R' , разрывы растяжения – e , взбросы и надвиги – t , сегменты магистрального сдвигового сместителя – Y , а также сдвиги – P . В процессе разрывообразования не всегда формируются все элементы структурного парагенеза зоны скалывания. Специфика образования и дальнейшего развития элементов данного структурного парагенеза зависит от граничных условий проведения экспериментов. В нашем исследовании оценено влияние скорости перемещения штампов экспериментальной установки и их ориентировки по отношению к внешнему воздействию на особенности разрывообразования в осадочном чехле платформы при знакопеременном смещении блоков фундамента.

Влияние величины смещения штампов экспериментальной установки на специфику образования разрывов. Влияние величины смещения штампов установки «Разлом» на особенности образования разрывов в подобных моделях обсуждалось ранее в статьях [15, 16]. Основная особенность заключается в том, чтобы первый этап каждого эксперимента прекратить до образования магистрального разрыва. Иначе на втором этапе эксперимента все деформации сосредотачиваются в окрестностях последнего, из-за чего формируются только элементы парагенеза зоны скалывания, генетически связанные со скольжением берегов магистрального шва. При отсутствии магистрального сместителя в начале второго этапа эксперимента образование разрывов начинается в широкой зоне и даже за пределами разломной зоны, сформировавшейся на первом этапе, что будет изложено ниже.

Выше отмечено, что в наших экспериментах штампы «Фундамента 3» на первом этапе смещались на суммарную величину от 80 до 170 мм, которая зависела от скорости их перемещения. В результате в формирующихся разломных зонах наблюдаются парагенезы разрывов, характерных для ранней и поздней дизъюнктивных стадий разломообразования [14]. Сеть разрывов, подобная природной, наблюдалась в моделях, характеризующихся минимальными смещениями штампов установки и медленной скоростью деформирования модельного материала. Однако скорость перемещения штампов экспериментальной установки и, соответственно, деформирования модельного материала оказывает существенное влияние на специфику разрывообразования.

Влияние скорости перемещения штампов экспериментальной установки на специфику разрывообразования. Опыты были проведены при двух отличающихся на порядок скоростях пере-

мещения штампов экспериментальной установки, что позволило выявить основные особенности структурообразования в зависимости от скорости деформирования (рис. 3). Так, уже на первом этапе наблюдаются отличия внутренней структуры формирующихся разломных зон при разных скоростях деформирования моделей. При скорости смещения штампов 10^{-4} м/с шаг между образующимися разрывами в пределах одного и того же сегмента моделируемого разлома меньше ($\sim 3-9$ мм), а при скорости, равной 10^{-5} м/с, он значительно больше (7–22 мм). На втором этапе в зависимости от скорости деформирования на поверхности модели вначале

появляются либо разрывы растяжения е-типа (см. рис. 3, А II), либо R-сколы соответствующего направления (см. рис. 3, В II). Это важное отличие структурообразования при различных скоростях перемещения штампов экспериментальной установки, от которого зависят типы структур, благоприятных для локализации кимберлитовых тел.

Кроме того, на некоторые особенности разрывообразования скорость перемещения штампов экспериментальной установки оказывает меньшее влияние. Так, при использованных нами скоростях деформирования и сопоставимой с мощностью осадочного чехла платформы толщиной модели над

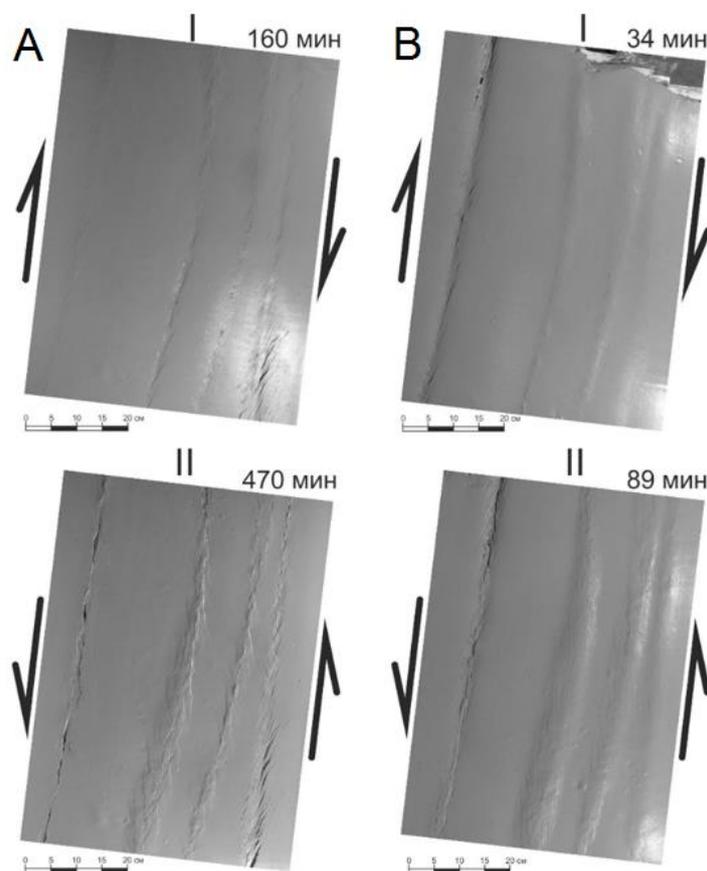


Рис. 3. Разрывная структура в моделях, деформирующихся при различных скоростях (фото экспериментов):

А – скорость 10^{-5} м/с; В – скорость 10^{-4} м/с

Римскими цифрами обозначены этапы эксперимента

Fig. 3. Faults structure in the models deformed at different speed values (photos of the experiments):

A – speed, 10^{-5} m/s; B – speed, 10^{-4} m/s

Roman figures indicate the experiment stages

Параллельным и Центральным разломами образуется единая зона. Далее при описании результатов моделирования мы будем обозначать этот разлом как Параллельный-Центральный, подчеркивая данную специфику разломообразования района исследований.

Однако не только скорость деформирования модельного материала оказывает влияние на особенности структурообразования в разломных зонах. Так как разрывы фундамента платформы расположены под углами друг к другу, то и разрывы чехла формируются не только в условиях простого сдвига, но и в обстановках сдвига с дополнительным сжатием (транспрессия) или сдвига с растяжением (транстенсия), что отражается на специфике образования и относительных размерах элементов структурного парагенеза.

Влияние угла между направлением перемещения штампов и модельными аналогами разломов на формирование структурных ловушек. Ранее экспериментально воспроизведены обстановки в зоне единичного прямолинейного разлома фундамента, которые позволили изучить структурообразующую роль знакопеременных движений в разломных зонах при сдвиге, транспрессии и транстенсии [16]. Исследование показало, что наиболее благоприятные структуры для локализации рудовмещающих тел формируются на втором этапе экспериментов и приурочены к разломным зонам. Исключение составляют разрывы е-типа, которые наблюдаются за пределами зон скалывания и образуются на втором этапе развития зон в условиях знакопеременных смещений блоков фундамента, при смене динамической обстановки транспрессии первого этапа на транстенсию второго этапа. При дальнейшей деформации эти разрывы, зарождающиеся на периферии разломных зон, постепенно прорастают к центральным частям зон, где в итоге

наблюдаются максимальные амплитуды раздвигов е-типа.

В данном исследовании рассмотрим области формирования различных структурных обстановок и, соответственно, разных типов структур растяжения при активизации разломно-блоковой структуры в пределах субмеридиональной Вилюско-Мархинской зоны. Необходимость этих экспериментов связана со спецификой деструктивного процесса в разломно-блоковой среде, когда особенности взаимодействия дизъюнктивов, обусловленные расположением их относительно друг друга и геометрическими параметрами, вызывают формирование разрывных дислокаций, нетипичных для обособленных разломных зон, изученных ранее [14, 16]. Нами воспроизведены три генеральных простирания линии смещения блоков «Фундамента 3»: 1°, 6° и 10°, каждое из которых соответствовало двум направлениям векторов движения блоков (рис. 4, В–D).

При субмеридиональном генеральном смещении штампов экспериментальной установки за счет различия простирания разломов фундамента и ориентировки вектора перемещения блоков наблюдается следующая специфика структурообразования (см. рис. 4, В). На первом этапе над каждым разломом фундамента формируется зона транстенсии. При этом существенная раздвиговая составляющая наблюдается в зоне Буордахского разлома и в южных частях Западного, Параллельного-Центрального и Восточного разломов. В северных частях этих разломных зон на первом этапе наблюдаются условия сдвига. На втором этапе парагенезы разрывов в зонах Буордахского разлома и южных сегментов других разломов формируются в условиях транспрессии. В северных частях разломов наблюдаются условия типичного сдвига по модели Риделя [5].

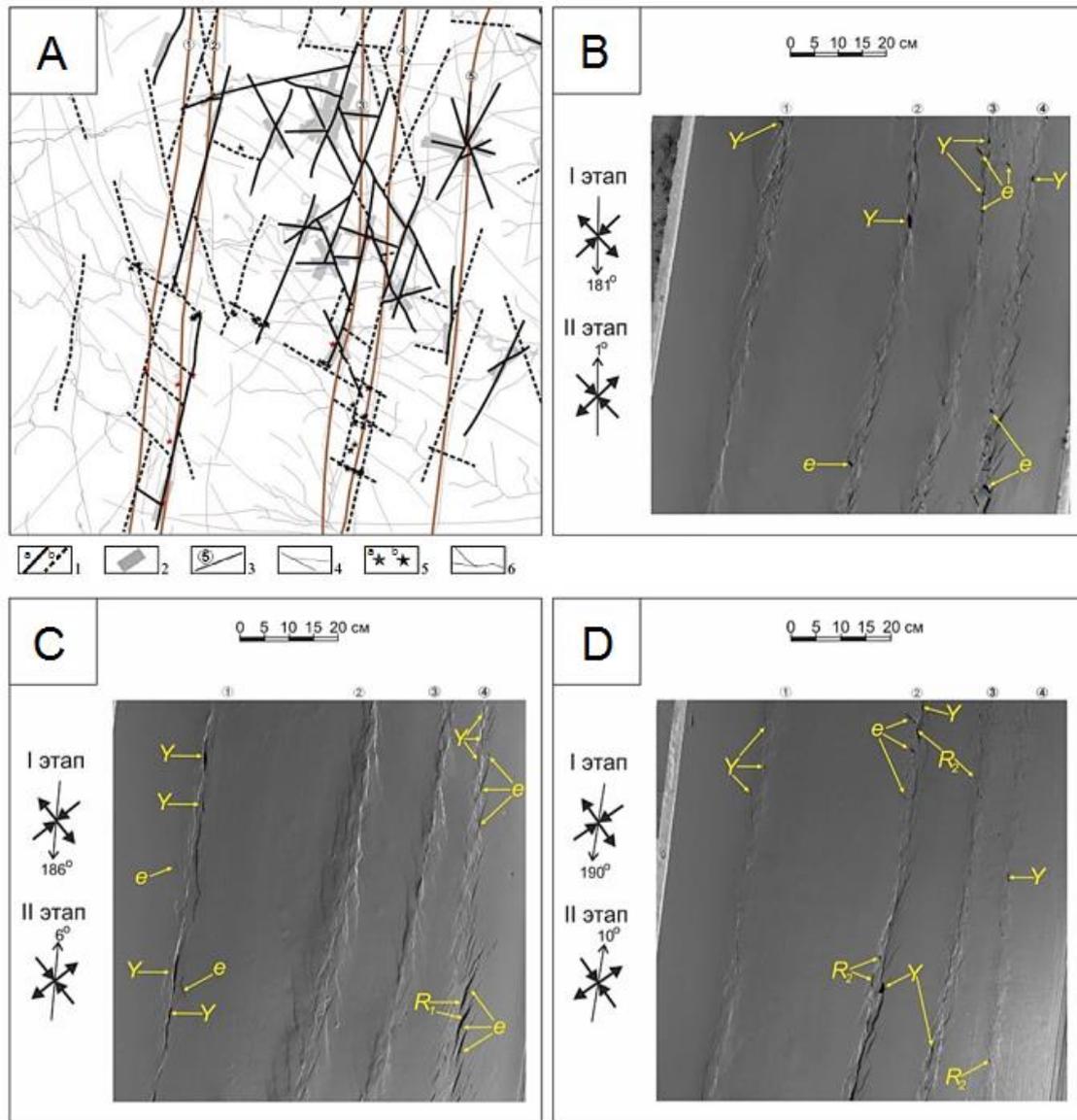


Рис. 4. Разломно-блоковая структура Мало-Ботубинского района и результаты моделирования разрывообразования в чехле платформы над разломами фундамента:
A – схема разломно-блокового строения Мирнинского кимберлитового поля³: 1 – разломы в верхних слоях платформенного чехла: а – установленные, б – предполагаемые; 2 – участки прямых наблюдений зон разрывных нарушений; 3 – разломы фундамента, выделенные по геофизическим данным: 1 – Кюеляхский, 2 – Западный, 3 – Параллельный, 4 – Центральный, 5 – Восточный; 4 – разломы чехла, выделенные по геофизическим данным; 5 – трубки: а – кимберлитов, б – туфов; 6 – речная сеть
B, C, D – разрывная сеть на завершающем этапе экспериментов в моделях с различным генеральным простиранием вектора смещения штампов экспериментальной установки при медленной скорости
 Цифры в кружках – модельные аналоги разломов фундамента:
 1 – Буордахский, 2 – Западный, 3 – Параллельный и Центральный, 4 – Восточный
 Y, e, R₁ и R₂ – элементы структурного парагенеза сдвиговой зоны (пояснения в тексте)

³Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с. / Gladkov A.S., Borneyakov S.A., Manakov A.V., Matrosov V.A. Tectonic-physical studies in diamond exploration: learning manual. Moscow: Nauchnyi mir Publ., 2008. 175 p.

Fig. 4. Fault-block structure of the Malo-Botuobinsky region and faulting modeling results for the platform cover above the basement faults:

A – fault-block structure of the Mirny kimberlitic field³: 1 – faults in the upper layers of the platform cover: a – established, b – assumed; 2 – areas of the fault zones direct observation; 3 – basement faults obtained by geophysical data: 1 – Kyuyelyakhskiy, 2 – Western, 3 – Parallel, 4 – Central, 5 – Eastern; 4 – cover faults by geophysical data; 5 – pipes: a – kimberlites, b – tuffs; 6 – river network
B, C, D – fault network at the final stage of experiments in models with different general strike of the experimental setup parts displacement vector at a slow speed
The figures in circles denote model's analogues of the basement faults:
1 – Buordakhsky, 2 – Western, 3 – Parallel and Central, 4 – East
Y, e, R₁ и R₂ – elements of structural paragenesis of the slide zone (see explanations in the text)

Благоприятные для внедрения кимберлитов структуры при данных граничных условиях формируются в пределах разломных зон. Это дислокации, образование которых связано с извилистостью магистрального сместителя разлома – У. Кроме того, в зоне Восточного разлома и в северной части объединенной зоны Параллельного и Центрального дизъюнктивов наблюдаются структуры растяжения е-типа (см. рис. 4, В).

При генеральном смещении штампов экспериментальной установки, равном 6°, зафиксированы следующие особенности структурообразования. На первом этапе практически все зоны развиваются в условиях правостороннего сдвига. Исключение составляют южные части разломных зон, в пределах которых наблюдается трансенсия. На втором этапе в зонах также преобладают сдвиговые перемещения, к которым в результате изменения направления движения штампов (левый сдвиг) в южных частях разломов добавляется транспрессия. Наиболее близкую ориентировку к направлению скольжения имеет Восточный разлом, поэтому его зона испытывает сдвиговые деформации, типичные для модели Риделя. С этой особенностью, вероятно, связано формирование структур растяжения именно в зоне Восточного дизъюнктива, а также в центральной части Буордахского разлома (см. рис. 4, С).

Отличительной особенностью разрывообразования при данных граничных условиях является практически

полное сосредоточение благоприятных для рудоотложения структур в пределах Буордахской и Восточной разломных зон и отсутствие таковых в зонах влияния других дизъюнктивов. При этом в зоне Буордахского разлома структуры растяжения связаны с формированием магистрального шва или представляют собой единичные раздвиги е-типа. А в зоне Восточного дизъюнктива наиболее крупные структуры растяжения наблюдаются в южных частях зоны. Их пространственная ориентировка соответствует простиранию сколов первого этапа – R₁. Кроме того, в пределах зоны этого дизъюнктива зафиксированы отрывы е-типа и структуры растяжения у изгибов магистрального шва – У.

При направлении смещения штампов экспериментальной установки, равном 10°, у различных дизъюнктивов наблюдается отличающаяся картина структурообразования в пределах зон. Так, для зоны Буордахского разлома на первом этапе экспериментов характерна обстановка транспрессии. В модельных аналогах северных сегментов зон Западного, Параллельного и Центрального разломов на первом этапе опытов также наблюдается транспрессия, а для их южных сегментов характерны условия трансенсии. Центральные же сегменты моделируемых разломных зон развиваются в обстановке сдвига с правосторонним перемещением крыльев. Несколько отличаются условия формирования зоны Восточного разлома, для которого характерны обстановки транс-

прессии в северном сегменте и сдвига в южном. При смене направления смещения штампов на противоположное соответственно изменяется положение областей трансенсии и транспрессии. В результате на втором этапе экспериментов северные сегменты всех разломов развиваются в обстановке трансенсии, что способствует образованию структур растяжения. Наиболее «зрелые» структуры растяжения е-типа наблюдаются в зоне модельного аналога Западного дизъюнктива (см. рис. 4, D). Кроме того, в зонах разломов формируются структуры растяжения в окрестностях магистрального шва – У и разрывы сдвиго-раздвигового характера – R₂. Таким образом, при данных граничных условиях формируется три типа структур, благоприятных для рудоотложения – е, У и R₂.

Обсуждение полученных результатов

Проведенное исследование позволило уточнить условия формирования разрывов чехла Сибирской платформы в пределах Мало-Ботуобинского района Якутской алмазонасной провинции. Во введении отмечено, что известные алмазонасные трубки тяготеют к узлам сочленения разломов фундамента Вилюйско-Мархинской зоны, имеющих север-северо-восточное простирание, и значительно менее протяженных разрывов запад-северо-западной ориентировки. Последние являются разломами чехла платформы и по своей ориентировке, составляющей 295–325° (рис. 5), соответствуют структурам растяжения е-типа известного парагенеза зоны скалывания, которые образуются на втором этапе проведенных нами экспериментов (см. рис. 4).

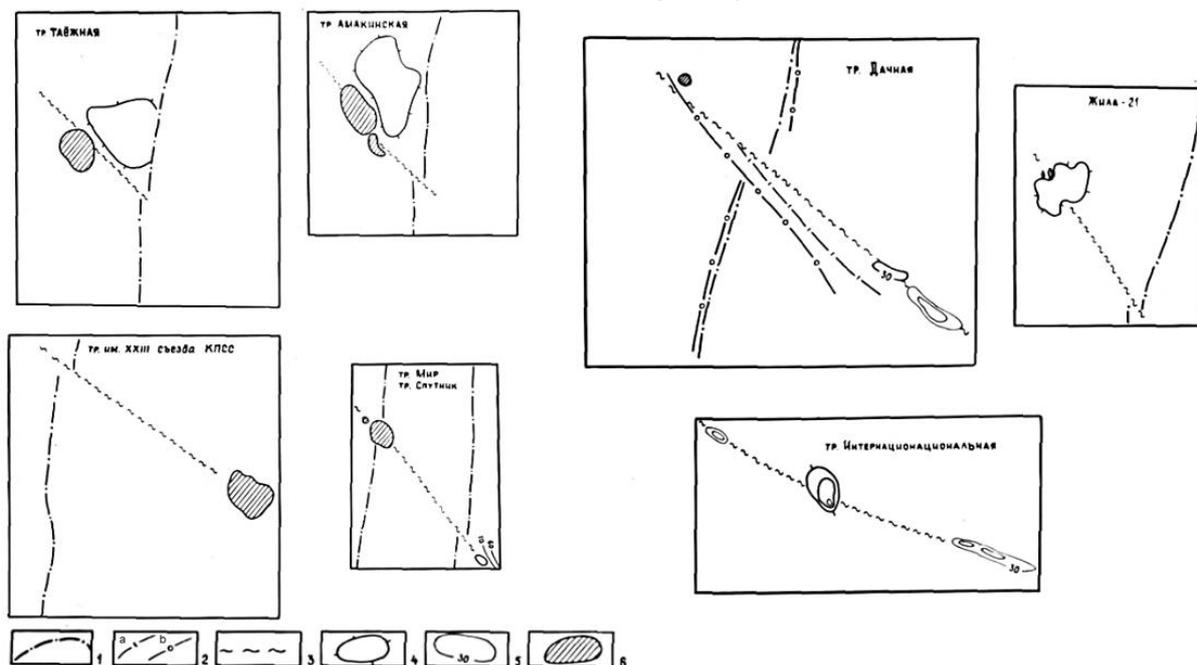


Рис. 5. Элементы гравимагнитных полей на участках внедрения кимберлитовых тел Мало-Ботуобинского района [4]:

- 1 – оси положительных аномалий магнитного поля; 2 – оси отрицательных (а) и положительных (b) аномалий поля силы тяжести; 3 – рудовмещающие трещины по данным магниторазведки; 4 – гравитационные максимумы; 5 – изолинии магнитного поля, нТл; 6 – кимберлитовые тела

Fig. 5. Elements of gravimagnetic fields in the kimberlite bodies intrusion zone, Malo-Botuobinsky region [4]:

- 1 – axes of positive magnetic field anomalies; 2 – axes of negative (a) and positive (b) gravity field anomalies; 3 – ore-bearing cracks by magnetic survey data; 4 – gravitational maximums; 5 – magnetic field isolines, nT; 6 – kimberlite bodies

Эксперименты подтвердили эволюцию регионального напряженно-деформированного состояния района исследования, при которой по субмеридиональным разломам фундамента платформы реализовались сначала правосторонние, а затем левосторонние сдвиговые перемещения блоков. В результате в модельном аналоге чехла платформы сформировались широкие полосы разрывов различной ориентировки и морфолого-кинематического типа – сколов и отрывов, отражающие области динамического влияния разломов [7]. Эти области имеют строение, характерное для зон крупных разломов земной коры с дискретными деструктивными полями и сегментами магистрального шва [19]. Внутренняя структура изученных в моделях разломных зон состоит из элементов наложенных парагенезов разрывов зон правостороннего и левостороннего сдвигов, специфика образования и развития которых зависит от скорости деформирования и вектора движения блоков фундамента.

Сравнение природной сети разломов и разрывов на поверхностях моделей, деформированных при различных граничных условиях, которое возможно благодаря теории подобия, позволило установить, что разрывы в чехле Сибирской платформы в пределах района исследования сформировались в результате медленного перемещения блоков фундамента. Этот вывод весьма важен, так как именно медленная скорость деформирования модельного материала является необходимым условием образования структур растяжения е-типа, которые являются разрывами осадочного чехла, весьма благоприятными для локализации кимберлитовых тел.

Кроме того, моделирование показало, что количество структур растяжения и их типовое разнообразие в разломных зонах преобладает при ориентировке вектора смещения блоков фунда-

мента, равной 10° . В моделях с такими граничными условиями структуры растяжения е-типа широко распространены в пределах деструктивных полей экспериментальных аналогов Западного и Параллельного-Центрального разломов. Также в пределах модельных аналогов зон динамического влияния разломов наблюдаются структуры растяжения, генетически связанные с сегментами магистрального сместителя (Y) или сдвигами (R_2). Последние, как правило, наблюдаются на участках зон, формирующихся в условиях трансенсии. Вероятно, что именно такие граничные условия существовали на момент формирования алмазоносных кимберлитовых тел.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. При толщине модели, аналогичной мощности чехла Сибирской платформы в пределах района исследований, сближенные в пространстве моделируемые Параллельный и Центральный разломы формируют единую разломную зону.

2. Структуры растяжения е-типа образуются только при медленной скорости перемещения штампов экспериментальной установки. Кроме того, они формируются в разломных зонах при знакопеременных смещениях крыльев лишь на втором этапе деформирования моделей (после смены направления перемещения крыльев) в обстановках сдвига или трансенсии. В обстановке трансенсии второго этапа раздвижки этого типа не наблюдаются, а при трансенсии растяжение осуществляется не только у раздвигов е-типа, но и у плоскостей разрывов R_2 .

3. Наиболее амплитудные структуры растяжения описанных выше типов тяготеют к центральным частям разломных зон.

В целом проведенное моделирование подтвердило предложенную геодинамическую модель многоэтапного формирования основных систем разрывных нарушений осадочного чехла в пределах Вилюйско-Мархинской зоны разломов фундамента, а также намеченную ранее последовательность в смене кинематики сдвиговых движений по ним с право- на левосторонние [1]. Были уточнены условия формирования разломов района исследования и изуче-

ны разрывы, перспективные для локализации кимберлитовых тел. Согласно полученным результатам, наиболее благоприятными элементами разрывной сети для формирования структур локального растяжения и внедрения кимберлитовых тел являются нарушения запад-северо-западной и северо-западной ориентировок и особенно участки их примыкания к зонам Буордахского и Западного разломов.

Библиографический список

1. Гладков А.С., Зинчук Н.Н., Борняков С.А., Шерман С.И., Манаков А.В., Матросов В.А., Гарат М.Н., Дзюба И.А. Новые данные о внутреннем строении и механизме образования зон кимберлитовмещающих разломов Мало-Ботуобинского района (Якутская алмазоносная провинция) // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 366–369.
2. Харьков А.Д., Борис Е.И., Иванов И.Н., Щукин В.Н. К характеристике трубок взрыва Мало-Ботуобинского района // Советская геология. 1972. № 8. С. 51–65.
3. Борис Е.И., Францессон Е.В. О закономерностях размещения кимберлитовых тел в Мало-Ботуобинском районе (Западная Якутия) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1992. № 5. С. 68–75.
4. Ваганов В.И., Варламов В.А., Фельдман А.А., Голубев Ю.К., Прусакова Н.А., Олофинский Л.Н., Бойко А.Н. Прогнозно-поисковые системы для месторождений алмазов // Отечественная геология. 1995. № 3. С. 42–53.
5. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen // Centralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Abt. B: Geologie und Paläontologie. Stuttgart: Schweizerbart, 1929. P. 354–368.
6. Гзовский М.В. Моделирование тектонических полей напряжений и разрывов // Известия Академии наук СССР. Серия геофизическая. 1954. № 6. С. 527–545.
7. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов. Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.
8. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation // Geology. 1994. Vol. 22. P. 567–570.
9. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results // Tectonophysics. 2012. Vol. 574-575. P. 1–71.
10. Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments // Journal of Geodynamics. 2016. Vol. 100. P. 7–32.
11. Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. Т. 24. № 10. С. 10–19.
12. Шерман С.И. Физический эксперимент в тектонике и теории подобия // Геология и геофизика. 1984. Т. 25. № 3. С. 8–18.
13. Семинский К.Ж. Структурно-механические свойства глинистых паст как модельного материала в тектонических экспериментах. Иркутск: Изд-во ВИНТИ РАН, 1986. 131 с.
14. Семинский К.Ж., Семинский Ж.В. Спецкартирование разломных зон земной коры и его возможности в исследовании структурного контроля кимберлитов в Алаakit-Мархинском поле Якутской алмазоносной провинции. Иркутск: Изд-во ИРНИИТУ, 2016. 204 с.
15. Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. Экспериментальное исследование разрывообразования в чехле платформы при активизации разломов фундамента (Накынское кимберлитовое поле Якутской алмазоносной провинции) // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: материалы докл. Всерос. конф. Т. 2. М., 2016. С. 188–195.
16. Черемных А.В. Структурообразующая роль знакопеременных движений в зонах сдвига // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: материалы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2018: актуальные проблемы изучения недр». Вып. 18. Иркутск, 2018. С. 242–249.

17. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // *Journal of Structural Geology*. 1985. Vol. 7. № 3/4. P. 437–457.
18. Sylvester A.G. Strike-slip faults // *Geological Society of America Bulletin*. 1988. Vol. 100. P. 1666–1703.

19. Лобацкая Р.М. Структурная зональность разломов. М.: Недра, 1987. 128 с.

References

1. Gladkov A.S., Zinchuk N.N., Bornyakov S.A., Sherman S.I., Manakov A.V., Matrosova V.A., Garat M.N., Dzyuba I.A. New data on the internal structure and the mechanism of formation of kimberlite-bearing fault zones in the Malo-Botuobinskii region (the Yakut diamond-bearing province). *Doklady Akademii nauk* [Doklady Earth Sciences], 2005, vol. 402, no. 3, pp. 366–369. (In Russ.).

2. Khar'kiv A.D., Boris E.I., Ivanov I.N., Shchukin V.N. On the character of Malo-Botuobinsky pipes. *Sovetskaya geologiya*, 1972, no. 8, pp. 51–65. (In Russ.).

3. Boris E.I., Frantsesson E.V. On distribution of kimberlite bodies in Malo-Botuobinsky region, Western Yakutia. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration], 1992, no. 5, pp. 68–75. (In Russ.).

4. Vaganov V.I., Varlamov V.A., Fel'dman A.A., Golubev Yu.K., Prusakova N.A., Olofinskii L.N., Boiko A.N. Prospecting systems for diamond fields. *Otechestvennaya geologiya*, 1995, no. 3, pp. 42–53. (In Russ.).

5. Riedel W. Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Centralblatt fur Mineralogie, Geologie und Palaontologie. Abt. B: Geologie und Palaontologie*. Stuttgart: Schweizerbart, 1929, pp. 354–368.

6. Gzovskii M.V. Modeling of tectonic stress-and-fault fields. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geofizicheskaya* [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR. Geophysics Series], 1954, no. 6, pp. 527–545. (In Russ.).

7. Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu. *Oblasti dinamicheskogo vliyaniya razlomov* [Areas of fault dynamic influence]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1983, 112 p. (In Russ.).

8. Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation. *Geology*, 1994, vol. 22, pp. 567–570.

9. Dooley T.P., Schreurs G. Analogue modeling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results. *Tectonophysics*, 2012, vol. 574-575, pp. 1–71.

10. Schellart W.P., Strak V. A review of analogue modelling of geodynamic processes: approaches, scaling, materials and quantification, with an application to subduction experiments. *Journal of Geodynamics*, 2016, vol. 100, pp. 7–32.

11. Shemenda A.I. Similarity criteria in mechanical modeling of tectonic processes. *Geologiya i*

geofizika [Russian Geology and Geophysics], 1983, vol. 24, no. 10, pp. 10–19. (In Russ.).

12. Sherman S.I. Physical experiment in tectonics and similarity theory. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1984, vol. 25, no. 3, pp. 8–18. (In Russ.).

13. Seminskii K.Zh. *Strukturno-mekhanicheskie svoystva glinistykh past kak model'nogo materiala v tektonicheskikh eksperimentakh* [Structural and mechanical properties of clayey pastes as model material in tectonic experiments]. Irkutsk: All-Russian Institute of Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences Publ., 1986, 131 p. (In Russ.).

14. Seminskii K.Zh., Seminskii Zh.V. *Spetskartirovanie razlomnykh zon zemnoi kory i ego vozmozhnosti v issledovanii strukturnogo kontrolya kimberlitov v Alakit-Markhinskom pole Yakutskoi almazonosnoi provintsii* [Special mapping of fault zones of the Earth's crust and its potential for the study of kimberlite structure control in the Alakit-Markha field, Yakutian diamond-bearing province]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2016, 204 p. (In Russ.).

15. Cheremnykh A.V., Gladkov A.S., Cheremnykh A.S. *Ekspperimental'noe issledovanie razryvoobrazovaniya v chekhle platformy pri aktivizatsii razlomov fundamenta (Nakynskoe kimberlitovoe pole Yakutskoi almazonosnoi provintsii)* [Experimental study of the platform cover faulting in the conditions of active basement fault formation (Nakynsky kimberlite field, Yakutian diamond province)]. *Materialy dokl. Vseros. konf. s mezhdunar. uch. "Tektonofizika i aktual'nye voprosy nauk o Zemle"* [Proceedings of the All-Russian conference "Tectonophysics and topical issues of Earth Sciences"]. Vol. 2. Moscow, 2016, pp. 188–195. (In Russ.).

16. Cheremnykh A.V. *Strukturoobrazuyushchaya rol' znakoperemennykh dvizhenii v zonakh sdviga* [Structure-forming role of alternating movements in the shear zones]. *Materialy Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch. "Geonauki-2018: aktual'nye problemy izucheniya nedr"* "Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovaniy" [Proceedings of the All-Russian Research-and-technical Conference with Int. participation "Geosciences-2018: topical issues of subsoil study" "Geology, survey and exploration of mineral resources and methods of geological research"]. Ed. 18. Irkutsk, 2018, pp. 242–249. (In Russ.).

17. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice. *Journal of Structural Geology*, 1985, vol. 7, no. 3/4, pp. 437–457.

18. Sylvester A.G. Strike-slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, vol. 100,

pp. 1666–1703.

19. Lobatskaya R.M. *Strukturnaya zonal'nost' razlomov* [Structural zonality of faults]. Moscow: Nedra Publ., 1987, 128 p. (In Russ).

Критерии авторства / Authorship criteria

Черемных А.В., Гладков А.С., Черемных А.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Aleksandr V. Cheremnykh, Andrei S. Gladkov, Aleksei S. Cheremnykh are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Черемных Александр Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: cherem@crust.irk.ru

Aleksandr V. Cheremnykh,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Associate Professor,
Senior Researcher, Tectonic Physics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: cherem@crust.irk.ru



Гладков Андрей Станиславович,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: gladkov@crust.irk.ru

Andrei S. Gladkov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Tectonic Physics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: gladkov@crust.irk.ru



Черемных Алексей Сергеевич,

ведущий инженер лаборатории тектонофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: acherem@crust.irk.ru

Aleksei S. Cheremnykh,

Leading Engineer, Tectonic Physics Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: acherem@crust.irk.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 502.37

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-144-150>

Разработка модели миграции мышьяка по почвенному профилю из накопленных отходов горно-перерабатывающей промышленности

© О.Л. Качор

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: В связи со сложившейся в последние годы в стране сложной ситуацией, касающейся накопленного экологического ущерба, в том числе и от мышьяковистых отходов горно-перерабатывающей промышленности, стоит острая необходимость в разработке методологии ликвидации социально-экологических последствий этого негативного воздействия. В статье представлены исследования сорбционных свойств грунтов, залегающих на территории муниципального образования «г. Свирск» (МО «г. Свирск»), подверженной длительному загрязнению мышьяковистыми отходами. В ходе проведенных экспериментов были установлены сорбционные емкости различных грунтов, типичных для территории МО «г. Свирск». Определено, что среди изученных типов грунтов наибольшей сорбционной емкостью обладают суглинки плотные листоватые буровато-коричневые. Выявлено, что грунт мощностью от 2 до 9 м на различных участках МО «г. Свирск» является значимым геоэкологическим барьером для проникновения мышьяка и тяжелых металлов в нижележащие водоносные горизонты. На основании полученных данных написана компьютерная модель на языке Delphi, позволяющая прогнозировать распространение мышьяка в почвах. Полученные в ходе исследований результаты послужили основой для разработки технологии ремедиации земель МО «г. Свирск», загрязненных мышьяком и тяжелыми металлами. На основании установленных сорбционных емкостей различных типов грунтов, а также мощности их слоя можно выявить участки на территории МО «г. Свирск», обладающие наибольшей тенденцией к самоконсервации, то есть иммобилизации подвижных форм мышьяка на природном геохимическом барьере. Разработанная модель миграции мышьяка может быть использована для прогнозирования распространения токсиканта и на других территориях, загрязненных мышьяковистыми отходами горно-перерабатывающей промышленности.

Ключевые слова: мышьяк, отходы, загрязнение, сорбция, геохимический барьер

Информация о статье: Дата поступления 29 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 5 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Качор О.Л. Разработка модели миграции мышьяка по почвенному профилю из накопленных отходов горно-перерабатывающей промышленности. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 144–150. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-144-150.

Modeling of arsenic migration from the accumulated mining industrial waste along the soil profile

© Olga L. Kachor

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: In view of the difficult situation in the country in recent years regarding the accumulated environmental damage, including that caused by arsenic-containing waste of mining and processing industry, there is an urgent need to develop a methodology to eliminate the social and environmental consequences of this negative impact. The article presents a study of the soil sorption properties for the Svirsk municipal district that has been long subject to the arsenic waste pollution. In the course of the experiments, the sorption capacity of various soils typical of the examined territory has been defined. The study has shown that among the studied soil types, the dense scaly brownish loamy soils are distinguished as having the highest sorption capacity. The soil with the capacity of 2 to 9 m has proved to be an important geo-ecological barrier prohibiting penetration of arsenic and heavy metals into the underlying aquifers. Using the obtained data, a computer model has been developed with the purpose to predict the arsenic spread in the soil. Based on the research results, the remediation technology for the Svirsk municipal

district has been developed. Using the data on various soil types' sorption capacity and the layer thickness, it is possible to identify the territory zones that have the highest potential for self-conservation i.e. immobilization of mobile arsenic forms in the natural geochemical barrier. The developed model of arsenic migration can be used for predicting the toxicant spread in other regions contaminated with arsenic-containing waste of mining and processing industries.

Keywords: arsenic, waste, pollution, sorption, geochemical barrier

Information about the article: Received April 29, 2019; accepted for publication June 5, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Kachor O.L. Modeling of arsenic migration from the accumulated mining industrial waste along the soil profile. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 144–150. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-144-150.

Введение

В последние годы в нашей стране особое внимание уделяется проблеме накопленного экологического ущерба хозяйственной деятельности прошлых лет. Значительный вклад в общий объем накопленных отходов вносят отходы горно-перерабатывающей промышленности, в том числе и содержащие мышьяк. В настоящее время территорий с еще не ликвидированными очагами загрязнения прошлых лет по добыче арсенинитных руд и производству мышьяка в стране остается по-прежнему много, наиболее представительными территориями являются г. Свирск, п. Вершино-Дарасунский, п. Запокровский, г. Карабаш, г. Пласт, г. Ревда с превышением предельно допустимой концентрации по мышьяку и тяжелым металлам в почвах в десятки и сотни раз, а частота онкологических и иных мышьякопосредованных заболеваний местного населения этих территорий всегда превышает среднюю по региону [1–4]. Также необходимо отметить, что проблема загрязнения объектов окружающей среды мышьяком является крайне актуальной не только для нашей страны, но и для многих стран мира [5–7].

В рамках Федеральной целевой программы «Национальная система химической и биологической безопасности Российской Федерации (2009–2014)», а также областной программы «Защита окружающей среды в Иркутской области»

на 2006–2015 гг. Иркутским национальным исследовательским техническим университетом в 2015 г. были завершены работы по ликвидации накопленного экологического ущерба – мышьяковистых отходов промплощадки бывшего Ангарского мышьяковистого завода (АМЗ) по переработке арсенинитных руд муниципального образования «г. Свирск» (МО «г. Свирск») Иркутской области, который в период с 1934 по 1949 г. осуществлял выпуск триоксида мышьяка для нужд военной промышленности [8].

Накопленный экологический ущерб окружающей среде был представлен крупнотоннажными мышьяковистыми отходами АМЗ, которые на начало работ по ликвидации источника негативного воздействия в 2009 г. включали в себя: огарков – 157 тыс. т., строительных конструкций – 16 тыс. т., загрязненного почвогрунта – 48 тыс. т.

Ликвидация очага мышьяковистого загрязнения – промплощадки АМЗ – была произведена в 2015 г. посредством обезвреживания и захоронения всех отходов в отработанных горных выработках (карьер Северный 5), находящихся в 20 км от МО «г. Свирск», а территория бывшей промплощадки АМЗ была рекультивирована.

Однако ликвидация источника загрязнения не решила проблему почти 80-летнего периода загрязнения мышьяком и тяжелыми металлами всей территории г. Свирска. Из полученных нами

мониторинговых данных количественного химического анализа следует, что максимальные валовые концентрации в поверхностном слое почвы по территории МО «г. Свирск» превышают нормативы по мышьяку в 9 раз, по меди – в 2,7 раза, по цинку – в 2 раза, а по свинцу – в 3 раза [9, 10].

Целью исследований являлось установление степени миграции и механизма поступления водорастворимых подвижных форм мышьяка вглубь почвенного профиля в разные типы почв, а также разработка модели миграции мышьяка по почвенному профилю. Для этого нами были проведены соответствующие исследования сорбционных характеристик разных типов почв, присущих данной территории.

Методы исследования

Все анализы проводились в аккредитованной лаборатории экологического мониторинга природных и техногенных сред Иркутского национального исследовательского технического университета» № РОСС RU.0001.518897. Для получения результатов исследования были использованы следующие аттестованные методики: ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 «Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой»; ПНД Ф 16.1:2.3:3.50-08 «Методика выполнения измерений массовых долей подвижных форм металлов в почвах, отходах, компостах, кеках, осадках сточных вод атомно-эмиссионным методом с атомизацией в индуктивно-связанной аргоновой плазме».

Результаты исследования и их анализ

Геологическими исследованиями, проведенными в рамках выполнения государственного контракта по ликвидации отходов промплощадки АМЗ, установлено, что мощность глиняного слоя территории МО «г. Свирск» колеблется от 2 до 9 м. Под суглинками залегают

супеси светло-серого цвета с линзами песков мелкозернистых глинистых коричневых, иногда зеленовато-серых. С появлением в разрезе песков связано поступление в колонковые скважины грунтовых вод – это водоносные отложения [11]. Мощный глиняный слой имеет малую водопроницаемость, за счет чего десятилетиями он играл роль природного барьера для проникновения токсичных элементов с бывшей промплощадки АМЗ через толщу почвенного профиля в подземные воды вплоть до времени проведения работ по ликвидации мышьяковистых отходов [12].

Нами были проведены исследования сорбционных характеристик разных типов грунтов с целью установления степени миграции и механизма поступления в них водорастворимых подвижных форм мышьяка. Сорбционная емкость почвы – это свойство грунта удерживать в себе питательные вещества, воду и в том числе токсичные соединения, например мышьяковистые. Сорбционная емкость почвы обуславливается присутствием в ней глинистых минералов. Это объясняется тем, что они имеют развитую удельную поверхность в связи со своей слоистой и пористой структурой. Основным природным сорбентом для трех- и пятивалентного мышьяка являются соединения трехвалентного железа. Глинистая почва содержит больше соединений трехвалентного железа по сравнению с песчаной почвой, и, следовательно, глинистые почвы менее токсичны, чем песчаные, потому что в них мышьяк сильно адсорбируется [13, 14].

Для проведения исследований нами были подобраны типы почв, которые присущи территории МО «г. Свирск». С целью удобства представления существующие на исследуемой территории грунты были разбиты на четыре типа: 1 – современные суглинки черного цвета с большим содержанием органических веществ; 2 – суглинки плотные листовая-

тые буровато-коричневые; 3 – суглинки плотные слабослоистые с редкой галькой; 4 – супеси плотные слабослоистые коричневые с редкой галькой. Для оценки воздействия различных природных факторов на процесс миграции мышьяка в различных типах грунтов были проведены исследования по решению задач на условный экстремум для минимального и максимального проникновения мышьяка в толщу почвенного профиля. Для этого использовался метод центрального ротатбельного планирования в четырехфакторном эксперименте: с разными показателями pH, температурой, концентрацией мышьяка в исходном растворе, а также различной степенью перемешивания. В качестве источника токсиканта использовался отход АМЗ – триоксид мышьяка из бункера цеха рафинирования АМЗ. Исходная концентрация мышьяка в приготовленном фильтрате составила 543 мг/дм^3 , из нее готовили рабочие растворы. Соотношение грунта и рабочего раствора составило 1:10. Суспензии взбалтывали один час, затем оставляли на сутки. Суспензии фильтровали, в фильтрате определяли количество мышьяка по стандартной методике спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (рис. 1).

Как видно из рис. 1, наибольшим сродством к соединениям мышьяка обладают глинистые типы грунтов (1, 2, 3

типы). По изотермам сорбции были рассчитаны сорбционные емкости различных типов грунтов. Сорбционная емкость 1–4 типов грунтов соответственно составила: 2,65; 3,3; 1,85; 0,3 мг/г. Было изучено влияние изменения температурного режима на протекание процесса сорбции (рис. 2).

Увеличение температуры (от 4 до $30 \text{ }^\circ\text{C}$) приводит к увеличению скорости физического, а также в некоторой степени химического взаимодействия соединений мышьяка с активными центрами грунта. Как видно из графика (см. рис. 2), выраженный максимум концентрации мышьяка на сорбенте достигается при наибольших температурных режимах $23\text{--}30 \text{ }^\circ\text{C}$. С применением уравнения Аррениуса $K = K_0 \cdot e^{-E/R \cdot T}$ и изобары сорбции в координатах $\ln C / f(1/t)$ по тангенсу угла наклона прямой были определены значения энергии активации. Рассчитанная энергия активации для четырех типов грунтов соответственно составила: 18,2; 23,6; 15,3; 3,4 кДж/моль. Данные значения энергий активации присущи для образования физических типов связей, что относится к природе физической адсорбции.

Изменение скорости перемешивания и pH среды не ведет к существенным изменениям процесса сорбции в грунте, что говорит о его сродстве к соединениям мышьяка.

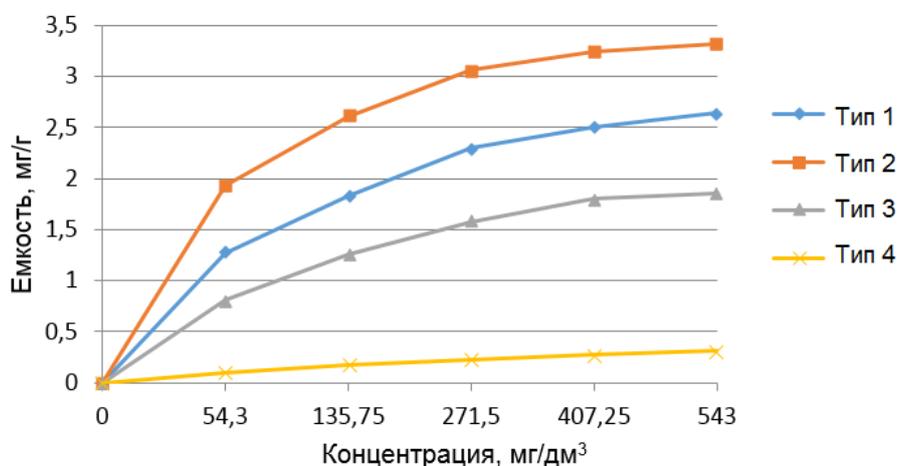


Рис. 1. Изотерма сорбции мышьяка на разных типах грунтов в статическом режиме
Fig. 1. Arsenic adsorption isotherm for different soil types, static mode

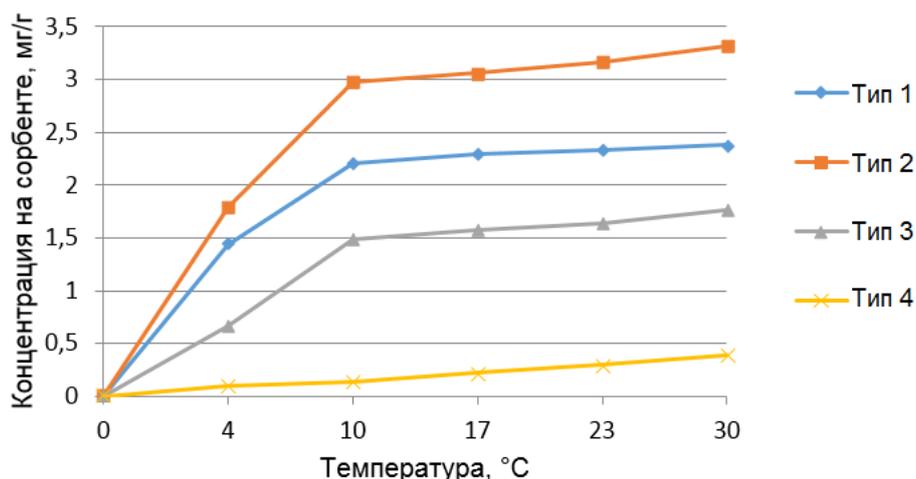


Рис. 2. Изобара процесса сорбции для разных типов грунтов в статическом режиме
Fig. 2. Sorption process isobar for different soil types, static mode

Обсуждение результатов

В ходе проведенных экспериментальных исследований установлено, что наибольшей сорбционной емкостью по отношению к мышьяку обладают суглинки плотные листоватые буровато-коричневые. Так, сорбционная емкость у суглинков плотных листоватых, суглинков плотных слабослоистых и супесей плотных слабослоистых больше, чем у покровных суглинков с большим содержанием органики, на 20, 44 и 91 % соответственно.

В связи с тем, что мощность глиняного слоя на всей территории МО «г. Свирск», как было сказано ранее, достигает от 2 до 9 м, он является сильным геологическим затвором от проникновения загрязняющих веществ в нижележащие водоносные горизонты.

На основании полученных данных о сорбционной емкости каждого почвенного слоя, концентрации мышьяка в этом слое, глубине отбора проб и мощности слоя была написана компьютерная модель на языке Delphi, позволяющая прогнозировать распространение мышьяка в почвах (рис. 3).

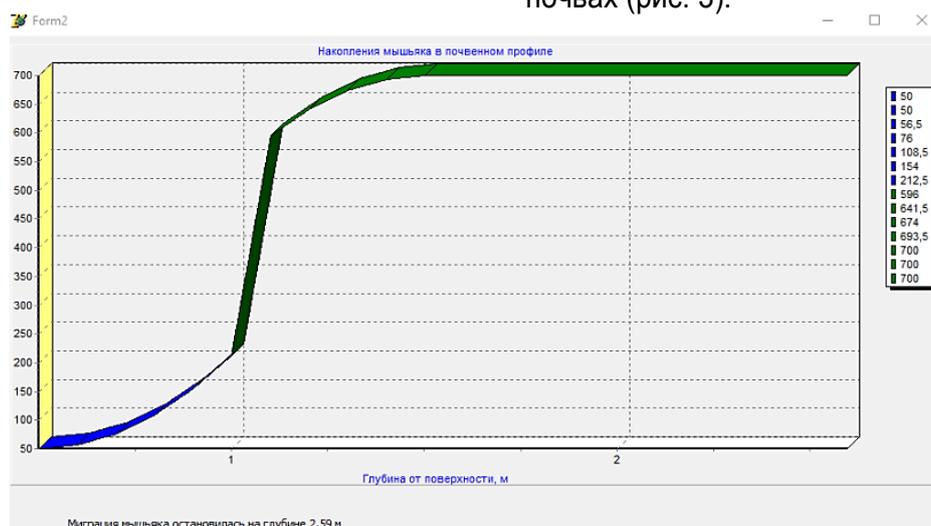


Рис. 3. Форма отображения результатов расчета миграции мышьяка в почвенном профиле МО «г. Свирск», выполненная с помощью разработанной модели
Fig. 3. Form representing the calculation results for arsenic migration in the soil profile of the Svirsk municipal district, created using the developed model

Разработанная модель по своим характеристикам в большей степени применима для прогноза миграции мышьяка на грунтах с низким коэффициентом фильтрации.

Заключение

Полученные в ходе исследований результаты послужили основой для разработки технологии ремедиации земель МО «г. Свирск», загрязненных мышьяком и тяжелыми металлами. На основании установленных сорбционных емкостей различных типов грунтов, а также мощно-

сти их слоя можно выявить участки на территории МО «г. Свирск», обладающие наибольшей тенденцией к самоконсервации, то есть иммобилизации подвижных форм мышьяка на природном геохимическом барьере. Разработанная модель миграции мышьяка может быть использована для прогнозирования распространения токсиканта и на других территориях, загрязненных мышьяковистыми отходами горно-перерабатывающей промышленности.

Библиографический список

1. Петров И.М., Вольфсон И.Ф., Петрова А.И. Выбросы мышьяка металлургическими заводами России и их влияния на состояние окружающей среды и здоровье населения // Экологический вестник России. 2014. № 12. С. 34–39.
2. Водяницкий Ю.Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // Почвоведение. 2013. № 7. С. 793–801.
3. Solntseva N.P. Trends in soil evolution under technogenic impacts // Eurasian Soil Science. 2002. Т. 35. № 1. С. 6–16.
4. Водяницкий Ю.Н. Современные тенденции загрязнения почв тяжелыми металлами // Агрехимия. 2013. № 9. С. 88–96.
5. Tóth G., Hermann T., Szatmári G., Pásztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment // Science of the total environment. 2016. Vol. 565. P. 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.115>.
6. McCarty K.M., Hanh H.T., Kim K.W. Arsenic geochemistry and human health in South East Asia // Reviews on Environmental Health. 2011. Vol. 26. № 1. P. 71–78.
7. Harvey C.F., Swartz C.H., Badruzaman A.B.M., Keon-Blute N., Winston Yu, Ashraf Ali M., Jay J., Beckie R., Niedan V., Brabander D., Oates P.M., Ashfaque K.N., Shafiqul Islam, Hemond H.F., Feroze Ahmed M. Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh Charles // Science. 2002. Vol. 298. Iss. 5598. P. 1602–1606. <https://doi.org/10.1126/science.1076978>.
8. Богданов А.В., Качор О.Л., Федотов К.В., Чайка Н.В. Ликвидация последствий деятельности мышьякового производства горно-перерабатывающей промышленности // Экология и промышленность России. 2014. № 5. С. 31–35.
9. Гребенщикова В.И., Лустенберг Э.Е., Китаев Н.А. Геохимия окружающей среды Прибайкалья. Байкальский геоэкологический полигон. Новосибирск: Гео, 2008. 235 с.
10. Grebenschikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaikal'e) // Environmental Earth Sciences. 2017. Vol. 76. P. 712. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7056-0>.
11. Богданов А.В., Федотов К.В., Качор О.Л. Разработка научных и практических основ рекуперативной технологии экобетонирования мышьяксодержащих отходов горно-перерабатывающей промышленности: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. 187 с.
12. Shen'kman B.M. Svirsky dump of arsenopyrite concentrate and its impact on water bodies // Water Resources. 2017. Vol. 44. № 7. P. 914–923. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070120>.
13. Shrivastava A., Ghosh D., Dash A., Bose S. Arsenic contamination in soil and sediment in India: sources, effects, and remediation // Current Pollution Reports. 2015. Vol. 1. Iss. 1. P. 35–46. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0004-2>.
14. Smith E., Naidu R., Alston A.M. Arsenic in the soil environment: a review // Advances in Agronomy. 1998. Vol. 64. P. 149–195.

References

1. Petrov I.M., Vol'fson I.F., Petrova A.I. Arsenic emissions from metallurgical plants in Russia and their impact on the environment and public health. *Ekologicheskii vestnik Rossii*, 2014, no. 12, pp. 34–39. (In Russ.)
2. Vodyanitskii Yu.N. Contamination of soils with heavy metals and metalloids and its ecological hazard (analytic review). *Pochvovedenie* [Eurasian Soil Science], 2013, no. 7, pp. 793–801. (In Russ.)
3. Solntseva N.P. Trends in soil evolution under technogenic impacts. *Eurasian Soil Science*, 2002, vol. 35, no. 1, pp. 6–16.

4. Vodyanitskii Yu.N. Current tendencies in soil contamination with heavy metals. *Agrokhimiya* [Agricultural Chemistry], 2013, no. 9, pp. 88–96. (In Russ.)

5. Tóth G., Hermann T., Szatmári G. Pásztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the total environment*, 2016, vol. 565, pp. 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.115>.

6. McCarty K.M., Hanh H.T., Kim K.W. Arsenic geochemistry and human health in South East Asia. *Reviews on Environmental Health*, 2011, vol. 26, no. 1, pp. 71–78.

7. Harvey C.F., Swartz C.H., Badruzzaman A.B.M., Keon-Blute N., Winston Yu, Ashraf Ali M., Jay J., Beckie R., Niedan V., Brabander D., Oates P.M., Ashfaq K.N., Shafiqul Islam, Hemond H.F., Feroze Ahmed M. Arsenic mobility and groundwater extraction in Bangladesh Charles. *Science*, 2002, vol. 298, iss. 5598, pp. 1602–1606. <https://doi.org/10.1126/science.1076978>.

8. Bogdanov A.V., Kachor O.L., Fedotov K.V., Chaika N.V. Elimination of the arsenic production consequences of mining and processing industry. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2014, no. 5, pp. 31–35. (In Russ.)

9. Grebenshchikova V.I., Lustenberg E.E., Kitaev N.A. *Geokhimiya okruzhayushchei sredy Pribaikal'ya. Baikalskii geoeologicheskii polygon*

[Geochemistry of the Baikal region environment. Baikal geo-ecological test site]. Novosibirsk: Geo Publ., 2008, 235 p. (In Russ.)

10. Grebenshchikova V.I., Efimova N.V., Doroshkov A.A. Chemical composition of snow and soil in Svirsk city (Irkutsk Region, Pribaikal'e). *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, p. 712. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7056-0>.

11. Bogdanov A.V., Fedotov K.V., Kachor O.L. *Razrabotka nauchnykh i prakticheskikh os-nov rekuperativnoi tekhnologii ekobetonirovaniya mysh'yaksoderzhashchikh otkhodov gorno-pererabatyvayushchei promyshlennosti* [Development of scientific and practical foundations of the regenerative technology for eco-concreting of arsenic-containing waste of mining and processing industry]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2014, 187 p. (In Russ.)

12. Shen'kman B.M. Svirsky dump of arsenopyrite concentrate and its impact on water bodies. *Water Resources*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 914–923. <https://doi.org/10.1134/S0097807817070120>.

13. Shrivastava A., Ghosh D., Dash A., Bose S. Arsenic contamination in soil and sediment in India: sources, effects, and remediation. *Current Pollution Reports*, 2015, vol. 1, iss. 1, pp. 35–46. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0004-2>.

14. Smith E., Naidu R., Alston A.M. Arsenic in the soil environment: a review. *Advances in Agronomy*, 1998, vol. 64, pp. 149–195.

Критерии авторства / Authorship criteria

Качор О.Л. написала статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Olga L. Kachor is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Сведения об авторе / Information about the author



Качор Ольга Леонидовна,
кандидат технических наук,
доцент кафедры обогащения полезных ископаемых и охраны окружающей среды им. С.Б. Леонова,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: olgakachor@gmail.com

Olga L. Kachor,
Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Department of Mineral Processing and Environmental Protection,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: olgakachor@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 550. 83

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164>

Интерпретация данных зондирования методом становления поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисследовательских исследованиях на юге Сибирской платформы

© С.В. Компаниец^а, Н.О. Кожевников^б, Е.В. Мурзина^с, В.С. Емельянов^д

^{а,с}Иркутское электроразведочное предприятие, г. Иркутск, Россия

^бИнститут нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

^бНовосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

^сИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^дИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: При изучении геологического разреза осадочного чехла Сибирской платформы метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) является основным электроразведочным методом, применяемым для решения нефтегазопроисследовательских задач в комплексе с сейсморазведкой. В последние годы при проведении работ стали массово регистрировать сигналы, осложненные влиянием индукционно-вызванной поляризации (ВПИ). Интерпретация таких сигналов в рамках горизонтально-слоистых проводящих моделей приводит к ошибочному определению удельного электрического сопротивления горизонтов осадочного чехла, расположенных в целевом интервале разреза. Данное исследование направлено на изучение переходных индукционных характеристик, осложненных влиянием ВПИ, зарегистрированных при проведении площадных работ, а также на разработку методических рекомендаций по интерпретации данных ЗСБ с учетом вызванной поляризации (ВП). Путем математического моделирования оценено влияние ВП на переходные характеристики, рассчитанные от модели, в которой поляризующийся горизонт расположен на различных глубинах. На основе результатов инверсии данных ЗСБ с учетом ВПИ по предложенной методике показана ее эффективность. Согласно результатам инверсии, проявления ВПИ связаны с породами верхней части разреза. Природа ВП связывается с присутствием пирита в отложениях юры и верхнего кембрия. Распределение удельного электрического сопротивления в целевых горизонтах, найденное с учетом ВП, приобретает логнормальный вид. Применение на этапе качественного анализа параметра, характеризующего расхождение ветвей кривых ЗСБ, позволяет районировать площадь по степени проявления ВПИ. При интерпретации данных ЗСБ с учетом ВПИ увеличивается точность инверсии данных и удается получить модели, согласующиеся с геологическим строением изучаемой территории, выполнить детальный прогноз коллекторских свойств подсолевых отложений.

Ключевые слова: метод зондирования становлением поля в ближней зоне, индукционно-вызванная поляризация, Сибирская платформа

Информация о статье: Дата поступления 29 марта 2019 г.; дата принятия к печати 30 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. Интерпретация данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации при площадных нефтегазопроисследовательских исследованиях на юге Сибирской платформы. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 151–164. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164.

Interpretation of near-field transient electromagnetic sounding data with the account of induction-induced polarization in areal exploration for oil and gas in the south of the Siberian craton

© Sofia V. Kompaniets^a, Nikolai O. Kozhevnikov^b,
Ekaterina V. Murzina^c, Vyacheslav S. Emelyanov^d

^{a,c}Irkutsk Electrical Prospecting Company, Irkutsk, Russia

^bInstitute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

^bNovosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^dInstitute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The main electrical prospecting technique in the study of the geological section of the Siberian platform sedimentary cover is a near-field transient electromagnetic method (TEM) used for oil and gas exploration along with seismic prospecting. In recent years more and more signals complicated by the effect of induction-induced polarization (IIP) are registered. Interpretation of such signals in the horizontally stratified conductive models leads to errors when defining the resistivity of the sedimentary cover horizons located in the target interval of the section. The aim of the study has been to define the IIP-complicated transient response registered during the areal exploration for oil and gas, as well as to develop guidelines for interpreting the TEM data with the account of the induced polarization (IP). Using mathematical modeling, the IP effect has been evaluated for the transient characteristics calculated by the model in which the polarized horizon is located at different depths. Based on the TEM data inversion results considering the IP, the effectiveness of methodology has been validated. According to the inversion results, the IP manifestation is associated with the rocks in the upper part of the section. The nature of IP is explained by the presence of pyrite in the Jurassic and Upper Cambrian sediments. The resistivity distribution for the target horizons with the account of IP is lognormal. Applying the parameter characterizing the TEM curve divergence at the qualitative analysis stage allows the area zoning by the degree of IIP manifestation. Interpretation of the TEM data with the account of IP enhances the accuracy of the TEM data inversion and allows to obtain the models that are consistent with the geological structure of the survey area. Thus, it enables a detailed forecast of the reservoir properties of the subsalt sediments.

Keywords: TEM, induced polarization, Siberian craton

Information about the article: Received March 29, 2019; accepted for publication April 30, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Murzina E.V., Emelyanov V.S. Interpretation of near-field transient electromagnetic sounding data with the account of induction-induced polarization in areal exploration for oil and gas in the south of the Siberian craton. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 151–164. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-151-164.

Введение

Изучение геоэлектрического строения разреза осадочного чехла юга Сибирской платформы в производственных масштабах началось в конце 50-х гг. прошлого века, когда были выполнены первые работы методами дипольного электрического зондирования, вертикального электрического зондирования, теллурических токов и магнитотеллурического зондирования.

На начальных этапах этих исследований широко использовались зондирования на постоянном токе (вертикальное электрическое зондирование, дипольное электрическое зондирование), которые сыграли важную роль в становлении структурной электроразведки. Однако недостатки, присущие этим методам, ограничили сферу их применения¹.

¹ Рабинович Б.И. Основы метода зондирования становлением поля в ближней зоне: конспект лекций. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1987. 52 с. / Rabinovich B.I. TEM Fundamentals: lecture notes. Irkutsk: Irkutsk Polytechnic Institute Publ., 1983. 52 p.

Наличие мощных высокоомных пластов солей в разрезе, являющихся экраном, и необходимость увеличения разноса установки для изучения глубокозалегающих слоев предопределили использование методов переменного поля. Применение этих методов позволило за более чем 50 лет исследований на юге Сибирской платформы изучить распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) в земной коре и верхней мантии [1].

В настоящее время для решения нефтегазопроисловых задач в Восточной Сибири широко применяются зондирования методом становления поля в ближней зоне (ЗСБ).

При проведении работ методом ЗСБ используются многоканальные установки с источником в виде генераторной петли, длина стороны которой составляет 500–600 м. Применение таких установок позволяет идентифицировать эффект индукционно-вызванной поляризации (ВПИ) и проводить инверсию данных ЗСБ с его учетом. Влияние вызванной поляризации (ВП) проявляется в виде расхождения переходных характеристик и их трансформант, таких как кривые кажущегося удельного сопротивления ($\rho_t(t)$) и кажущейся проводимости ($S_t(H_t)$), измеренных соосными и разнесенными установками. Эти расхождения особенно значительны на поздних временах [2–4]. Анализ около 70000 кривых ЗСБ, зарегистрированных на юге Сибирской платформы, показал, что влиянию ВПИ подвержено более 60 % из общего числа индукционных переходных характеристик.

Интерпретация данных ЗСБ основана на инверсии, то есть подборе оптимальной геоэлектрической модели, объясняющей экспериментальные переходные характеристики. Инверсия проводится в ручном и автоматическом режимах. Инверсия в ручном режиме используется для подбора моделей на опорных точках, в этом случае опыт и знания

интерпретатора позволяют наиболее полно учесть априорные данные о геологическом строении района работ. Однако объем данных, получаемых в ходе площадных съемок, настолько велик, что для интерпретации этих данных с приемлемыми трудозатратами в разумные сроки необходимо использовать инверсию в автоматическом режиме. Геоэлектрические модели, полученные с помощью ручной инверсии, используются в качестве стартовых на этапе автоматической инверсии. Как при ручной, так и при автоматической инверсии данных ЗСБ, полученных на Сибирской платформе, неотъемлемым этапом является анализ и учет влияния ВПИ.

В данной статье мы на примере одного из участков в пределах Непско-Ботубинской антеклизы иллюстрируем подход к интерпретации площадных данных ЗСБ с учетом ВПИ.

Методика площадных работ

Для возбуждения и регистрации сигналов становления применяется многоканальная установка ЗСБ, которая включает генераторную петлю (источник) и несколько приемных петель (рис. 1). При площадной съемке методом ЗСБ, результаты которой рассматриваются в данной статье, размер источника составлял 600×600 м. Шесть приемных петель располагались на разносах 140 м (внутри петли), 510 и 900 м. Такая геометрия установки определяется необходимой глубиной исследований (2–3 км) в сочетании с имеющейся сетью сейсмических профилей для 3D-метода общей глубиной точки (200×200 м), которая используется для привязки и размещения источников и приемников поля. При интерпретации и представлении результатов принималось, что каждая точка ЗСБ пространственно совпадает с центром соответствующей приемной петли.

При площадных наблюдениях методом ЗСБ источники и приемники поля располагаются на участке работ по

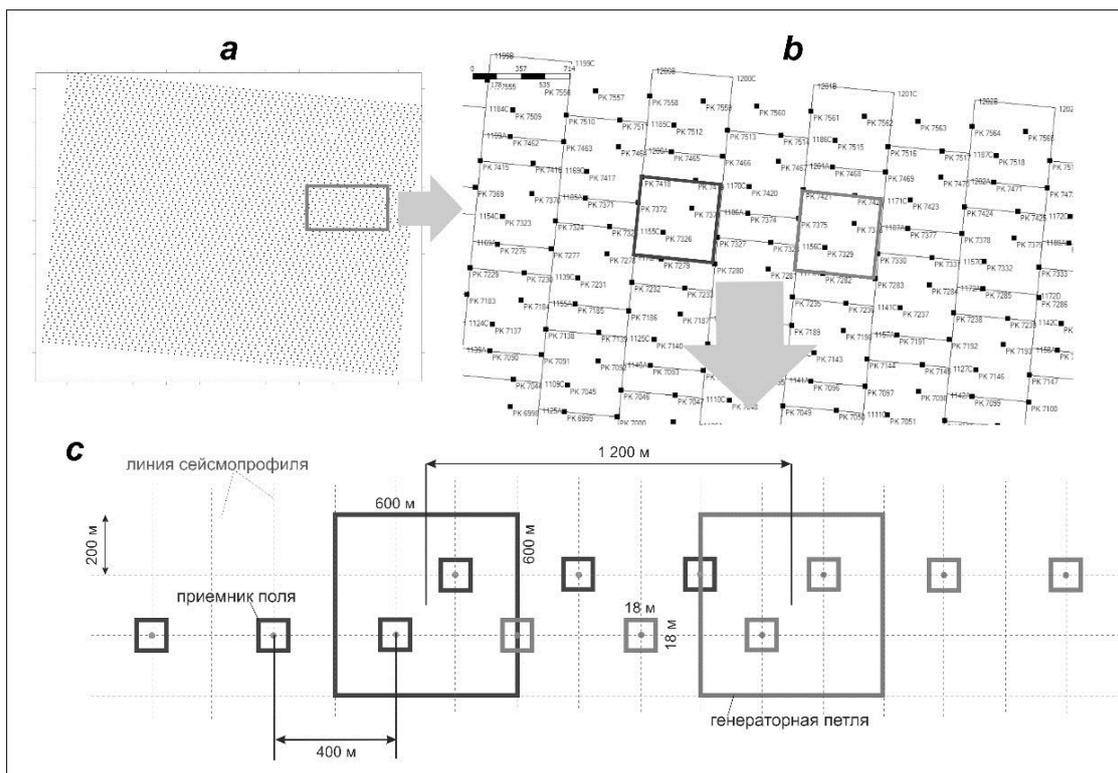


Рис. 1. Схема установок зондирования становлением поля в ближней зоне:
 а – схема точек зондирования становлением поля в ближней зоне; б – фрагмент сети источников и приемников поля, с – схема двух установок зондирования становлением поля в ближней зоне

Fig. 1. TEM array:

a – general view of survey area; b – network of field sources and receivers;
 c – combined in-loop/off-loop TEM configuration

равномерной сети. В рассматриваемом случае расстояние между профилями, на которых располагались приемники, составляло 200 м, расстояние между приемниками на профиле – 400 м. Максимальный ток в генераторной петле составлял 170 А, сигналы становления (переходные характеристики) регистрировались в диапазоне 0,03–500 мс [5].

Моделирование переходных индукционных характеристик с учетом вызванной поляризации

При расчете индукционных переходных характеристик с учетом ВПИ для математического описания процессов ВП наиболее часто используется формула Cole-Cole [6]:

$$\rho \cdot (\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[1 - \frac{1}{1 + (j\omega\tau)^c} \right] \right\},$$

где $j = \sqrt{-1}$; ω – круговая частота, рад/с; ρ_0 – удельное сопротивление на постоянном токе, Ом-м; η – поляризуемость, с – показатель степени ($0 < c \leq 1$); τ – время релаксации, с. Диапазон возможных значений параметра η – от нуля до единицы, τ – от нуля до бесконечности.

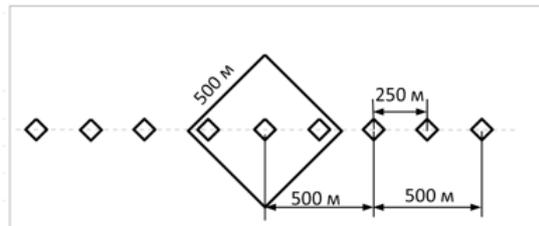
Математическое моделирование и практика интерпретации данных ЗСБ показывают, что эффект ВПИ сильнее всего проявляется, когда приемная располагается внутри генераторной. Когда приемная петля находится снаружи генераторной, увеличение разноса приводит к уменьшению относительного вклада ВПИ в суммарную переходную характеристику. Снижение влияния ВПИ при увеличении разноса тем заметнее, чем ближе к поверхности расположен поляризующийся слой.

Проиллюстрируем сказанное результатами математического моделирования применительно к геоэлектрической модели осадочного чехла Непско-Ботубинской антеклизы (рис. 2). Сигналы становления рассчитаны для установки ЗСБ с разносами 0, 250, 500, 750 и 1000 м. Сначала были рассчитаны переходные характеристики для модели с неполяризуемыми слоями, которая в дальнейшем использовалась в качестве референтной. Затем были рассчитаны переходные характеристики для моделей, в которых один из слоев (первый, третий, пятый, восьмой) был поляризуемым. Горизонты находятся на различной глубине и обладают одинаковым сопротивлением 40 Ом·м. Расчеты были выполнены для $\tau = 0,1$ с, $c = 0,4$ и двух

значений поляризуемости η (0,03 и 0,1). Согласно статистике результатов инверсии данных ЗСБ, на юге Сибирской платформы такие параметры модели Cole-Cole являются наиболее часто встречающимися.

При анализе результатов моделирования мы использовали так называемые нормированные переходные характеристики. Нормированная переходная характеристика $Y(t)$ отражает относительный вклад ВПИ в суммарный сигнал становления и рассчитывается как отношение электродвижущей силы (ЭДС) $\Delta U_{ВП}$ для поляризующейся модели к ЭДС ΔU для неполяризующейся (референтной) модели: $Y(t) = \Delta U_{ВП}(t) / \Delta U(t)$. Референтная модель идентична поляризующейся за исключением того, что

Номер слоя	ρ , Ом·м	h , м	Относит. отм. кровли, м	η	τ , мс	c
1	40	80	0	0.03, 0.1	0.1	0.4
2	100	80	80			
3	40	110	160	0.03, 0.1	0.1	0.4
4	320	385	270			
5	40	285	655	0.03, 0.1	0.1	0.4
6	80	280	940			
7	150	220	1220			
8	40	130	1440	0.03, 0.1	0.1	0.4
9	45	140	1570			
10	20	95	1710			
11	2000	500	1805			



Шифр графиков:

- 1 – поляризующийся слой на глубине 40 м;
- 2 – поляризующийся слой на глубине 160 м;
- 3 – поляризующийся слой на глубине 655 м;
- 4 – поляризующийся слой на глубине 1440 м.

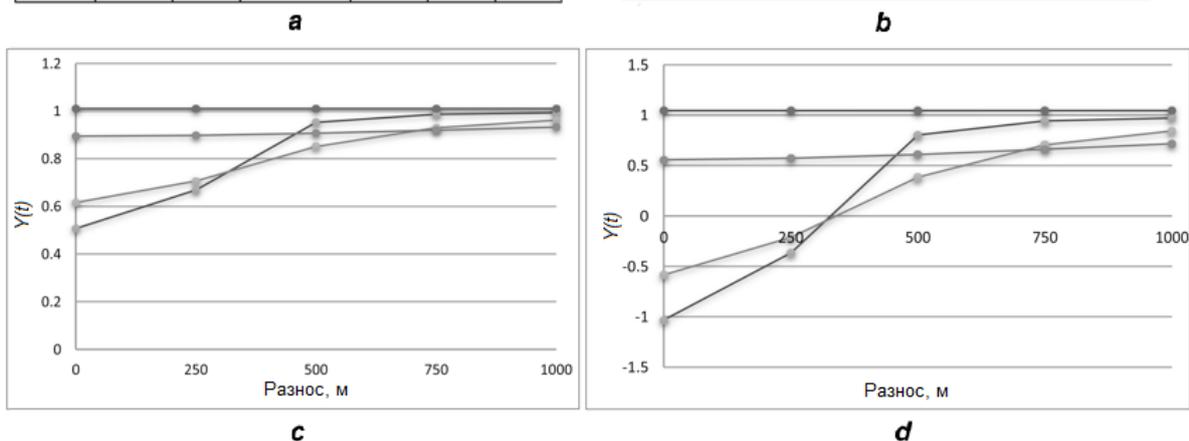


Рис. 2. Графики $Y(t)$ на времени $t = 0,4$ с в зависимости от разноса:

a – геоэлектрическая модель; b – схема установки зондирования становлением поля в ближней зоне; c – при поляризации слоя 0,1; d – при поляризации слоя 0,03

Шифр графиков – номер поляризующегося слоя на рис. 2, a

Fig. 2. $Y(t)$ plots, $t = 0.4$ s according to the offset:

a – geoelectric model; b – TEM array;

c – layer polarization of 0.1; d – layer polarization of 0.03

The number of graphs stands for the number of the polarized layer in Fig. 2, a

поляризуемость всех ее слоев равна нулю. Очевидно, чем больше отношение $\Delta U_{ВП}(t) / \Delta U(t)$ отличается от единицы, тем сильнее выражен эффект ВПИ на времени t [7].

На рис. 2 показано, как значения нормированной переходной характеристики на времени $t = 0,4$ с изменяются в зависимости от разноса и глубины залегания поляризующегося слоя. Выбор временной задержки при построении графиков основывается на том, что на данном значении t вклад ВПИ в результирующую переходную характеристику становится преобладающим.

По результатам математического моделирования наиболее чувствительной к ВП является приемная петля, расположенная внутри контура генераторной петли – отношение ЭДС, рассчитанной от модели с параметрами ВП к ЭДС без ВП, максимально.

Увеличение расстояния между источником и приемником поля приводит к ослаблению вклада ВПИ в суммарную переходную характеристику, и он тем больше, чем ближе к поверхности расположен поляризованный объект. Когда поляризующимся является первый горизонт, с ростом разноса от 0 до 1000 м для данной геоэлектрической модели влияние ВПИ убывает более чем в два раза.

Математическое моделирование и инверсия проводились с помощью программ MODEL 3 и 4 (Л.В. Суров, В.С. Емельянов, А.В. Поспеев), математическую основу которых образуют программные модули для решения прямой и обратной задач метода ЗСБ с учетом ВПИ («Зонд-Гео», А.Е. Каминский).

Интерпретация данных зондирования становлением поля в ближней зоне с учетом индукционно-вызванной поляризации

При площадных исследованиях объем данных значительно увеличивается по сравнению с тем, который

получают при профильных работах. Высокая плотность наблюдений при площадных работах (около 12 точек на 1 км²) является благоприятной предпосылкой для проведения трехмерной инверсии данных ЗСБ. Однако на практике возможности 3D-инверсии, особенно с учетом ВПИ, пока ограничены. Поэтому нами предложен и используется способ интерпретации данных массовых съемок ЗСБ на основе модели горизонтально-слоистой поляризуемой среды.

Алгоритм интерпретации включает в себя несколько этапов.

1. *Оценка расхождения ветвей кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$.* На первом этапе оценивается влияние ВПИ на индукционные переходные характеристики. Используются трансформанта $S_{\tau}(H_{\tau})$ и параметр ΔS , характеризующий расхождение ветвей кривых ЗСБ, записанных на соосной и разнесенной установках на определенной кажущейся глубине [8]. Трансформанта кажущейся проводимости показывает изменение проводимости с кажущейся глубиной. Выбор глубины для оценки ΔS производится на отметке, на которой по статистике ВПИ уверенно проявляется расхождением ветвей кривых – более 2000 м (рис. 3).

$$\Delta S = \frac{S(H) - S_p}{S_p} \cdot 100 \%,$$

где $S(H)$ – суммарная кажущаяся проводимость на кажущейся глубине H , полученная на соосных кривых; S_p – среднее значение проводимости, полученное на разнесенных пикетах.

Чем сильнее проявлены эффекты ВПИ, тем меньше величина параметра ΔS , поскольку происходит отрицательный прирост на кривых $S_{\tau}(H_{\tau})$, зарегистрированных на соосном пикете.

На основе полученных значений строится карта ΔS , с помощью которой оценивается распространение влияния ВП по площади.

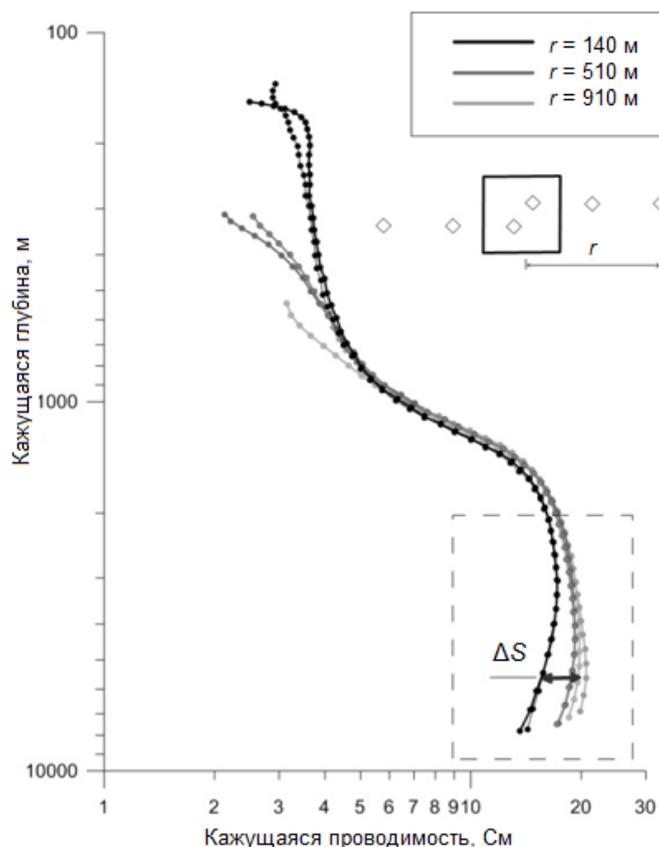


Рис. 3. Оценка ΔS по кривым кажущейся проводимости
Fig. 3. Estimate of ΔS by apparent conductivity curves

В геологических условиях Сибирской платформы кроме ВП на кривые становления могут оказывать влияние эффекты суперпарамагнетизма. В отличие от ВП влияние магнитовязких пород наблюдается на кривых ЗСБ в виде медленно убывающей ЭДС, однако знак различен для соосного пикета и разнесенных. При этом наименьшему влиянию подвержены кривые, зарегистрированные на разnose 1000 м. С увеличением временной задержки расхождение кривых увеличивается.

2. *Подбор геоэлектрических моделей на опорных точках.* На данном этапе среди всех точек, на которых кривые ЗСБ подвержены влиянию ВПИ, выбираются опорные точки и/или профили.

Для интерпретации кривых на опорных точках формируется априорная геоэлектрическая модель с учетом информации (геологическое строение, результаты бурения, геофизических исследований скважин (ГИС) и сейсморазведки). Данные сейсморазведки используются для задания мощностей геоэлектрических горизонтов (солевого и подсолевого комплексов), то есть для формирования структурного каркаса геоэлектрической модели. Учет априорной информации позволяет уменьшить область проявления эквивалентности при подборе геоэлектрической модели² [9, 10]. На основе данных ГИС, а также кажущейся проводимости горизонтов создается априорная модель УЭС.

² Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / под ред. И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. Т. 1. Тверь: Поли-ПРЕСС, 2018. 274 с. / Electrical prospecting: manual on electrical survey practice for students of geophysical specialties / edited by I.N. Modin, A.G. Yakovlev. Vol. 1. Tver: Poli-PRESS Publ., 2018. 274 p.

Для каждой многоразностной установки сначала выполняется инверсия переходных характеристик, измеренных на разнесенных установках. Полученные значения УЭС используются в качестве стартовых при инверсии переходных характеристик, зарегистрированных на соосных установках. Геоэлектрическая модель дополняется параметрами ВП и подбирается до достижения оптимальной невязки между практической и теоретической кривыми (на опорных точках).

3. Определение зависимости ΔS от поляризуемости η . Определение зависимости необходимо для получения стартового значения поляризуемости на всех точках ЗСБ с зафиксированным влиянием ВПИ на кривые. Для расчета зависимости используются опорные геоэлектрические модели, сформированные на этапе 2. Для каждой модели изменяются значения η с заданным шагом и рассчитываются кривые $S_{\tau}(H_{\tau})$ и расхождение кривых ΔS . Время релаксации τ и параметр s закрепляются.

4. Оценка поляризуемости (для площадных данных ЗСБ). С использованием полученной на этапе 3 зависимости $\Delta S(\eta)$ и фактического значения ΔS оценивается поляризуемость для всех точек зондирования, на которых выявлено влияние ВП.

5. Инверсия (для площадных данных ЗСБ). На данном этапе выполняется подбор геоэлектрических моделей для всех точек ЗСБ. В качестве стартовых используются модели, полученные на опорных точках или профилях. Если мощности можно определить по структурному каркасу, то они закрепляются.

На данном этапе обратная задача решается с помощью модуля автоматической инверсии с выбором графа, в котором задаются ограничения и условия подбора [11].

Подбор моделей проводится в соответствии с основными критериями: оптимальной невязкой и гладкостью

получаемых разрезов.

Оптимальная невязка между теоретической и практической кривыми обеспечивает не только приемлемое расхождение между ними, но и соответствие полученной геоэлектрической модели всей имеющейся априорной информации о геологическом строении изучаемого разреза.

Невязка представляет собой процентное расхождение практической и теоретической кривых δ и определяется по формуле:

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho_{\text{пр}}(t_i) - \rho_{\text{теор}}(t_i)}{\rho_{\text{пр}}(t_i)(n-1)} \right)^2},$$

где δ – относительная погрешность (расхождение, невязка); $\rho_{\text{пр}}(t)$, $\rho_{\text{теор}}(t)$ – значения кажущегося сопротивления на практической и на теоретической кривых соответственно на одном временном отсчете.

Гладкость получаемых разрезов – приемлемые (согласно данным геологии) различия моделей соседних точек, если это не диктуется априорными данными и самими кривыми зондирования.

Так, циклы инверсии повторяются для каждой точки до достижения оптимальной невязки, гладкости разрезов и карт, в виде которых представляются результаты интерпретации. Проиллюстрируем возможности этого подхода на примере одного из участков, расположенных в пределах Непского свода.

Геологическое строение участка работ

Участок работ, о котором идет речь, находится на юге Сибирской платформы, в восточной части Непско-Ботуобинской антеклизы, на Непском своде.

Геологическое строение осадочного чехла на участке работ типично для юга Сибирской платформы. Осадочный чехол сложен в большей части нижнепалеозойскими отложениями, зачастую осложненными последствиями пермотриасовой фазы магматизма [12]. Разрез

по литологическим и структурным признакам делится на три комплекса:

– надсолевой терригенный, сложенный преимущественно песчаниками, аргиллитами и алевролитами;

– карбонатно-галогенный, представленный известняками и доломитами, перемежающимися с пластами каменной соли;

– подсолевой, в свою очередь разделяющийся на карбонатную часть, состоящую преимущественно из известняков и доломитов, и терригенную часть, представленную песчаниками и алевролитами.

Геологический разрез в районе исследований осложнен тектоническими нарушениями различного возраста – от древних до современных. По данным скважин глубокого бурения в ангарской свите присутствует трапповая интрузия мощностью до 110 м.

Нижнекембрийские отложения осадочного чехла залегают на разновозрастных метаморфизованных и кристаллических породах фундамента с угловым или стратиграфическим несогласием.

На поверхности около 70 % территории присутствуют юрские отложения. Они покрывают водораздельные пространства и представлены песчаниками, песками, галечниками, глинами, алевролитами, аргиллитами, местами с маломощными линзовидными прослоями углей.

Метод ЗСБ применялся здесь для картирования перспективных в нефтегазоносном отношении коллекторов в подсолевой части разреза, оценки их фильтрационно-емкостных свойств и насыщения, картирования траппов и тектонических нарушений.

Результаты работ

Кривые кажущегося сопротивления, зарегистрированные на участке, свидетельствуют о влиянии ВПИ. Расхождения между кривыми, полученными на разносах 140, 500 и 900 м на поздних (более

40 мс) временах, отмечаются для 80 % общего объема данных (4482 точки ЗСБ). При одинаковых разносах кривые ρ_{τ} совпадают (рис. 4).

После обработки данных ЗСБ, включавшей фильтрацию, осреднение и суммирование сигналов, была проведена интерпретация данных ЗСБ в соответствии с описанным выше подходом.

Распространение ВПИ на участке работ иллюстрирует карта параметра ΔS на кажущейся глубине 3000 м (рис. 5, а). Отрицательный знак параметра свидетельствует о влиянии ВП. Согласно карте ΔS , влияние ВП сильнее всего выражено на юго-востоке участка; по мере продвижения в северо-западном направлении это влияние уменьшается.

Для точек ЗСБ, расположенных на опорных профилях, выполнен подбор моделей и определены зависимости $\Delta S(\eta)$, на основе которых рассчитаны значения поляризуемости и проведена автоматическая инверсия данных по всей площади.

По результатам автоматической инверсии значения η составляют 0,01–0,15 (рис. 5, б). Время релаксации τ и показатель степени c закрепились на уровне, обеспечивающем оптимальную невязку всего массива данных в зонах с проявлением эффекта ВПИ ($\tau = 0,1$ с, $c = 0,6$). Кроме того, поскольку литологический состав юрских отложений не меняется по площади, есть основание предполагать, что свойства пород, которые характеризуются данными параметрами (структурно-текстурные особенности пород, состав), малоизменчивы.

По данным описания керна водозаборных скважин, находящихся южнее изучаемого участка, в породах усть-кутской свиты юры и верхней части верхоленской и илгинской свит кембрия (в интервале глубин от 0 до 150 м), отмечены агрегаты пирита [13]. Кроме этого, имеются пропластки каменного угля и углестых аргиллитов, с которыми могут быть

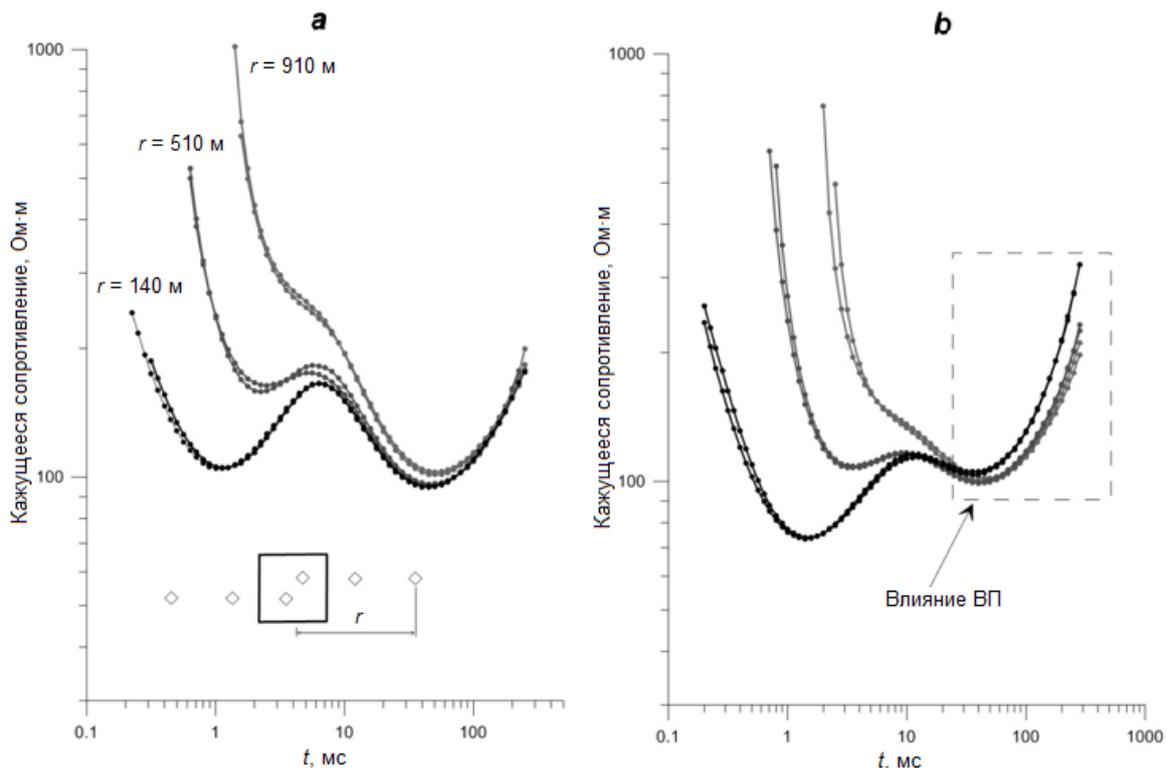


Рис. 4. Типичные кривые кажущегося удельного сопротивления на участке работ:
 а – без влияния вызванной поляризации; б – с влиянием вызванной поляризации
Fig. 4. Typical curves of apparent resistivity at the working site:
 а – without IP influence; б – with IP influence

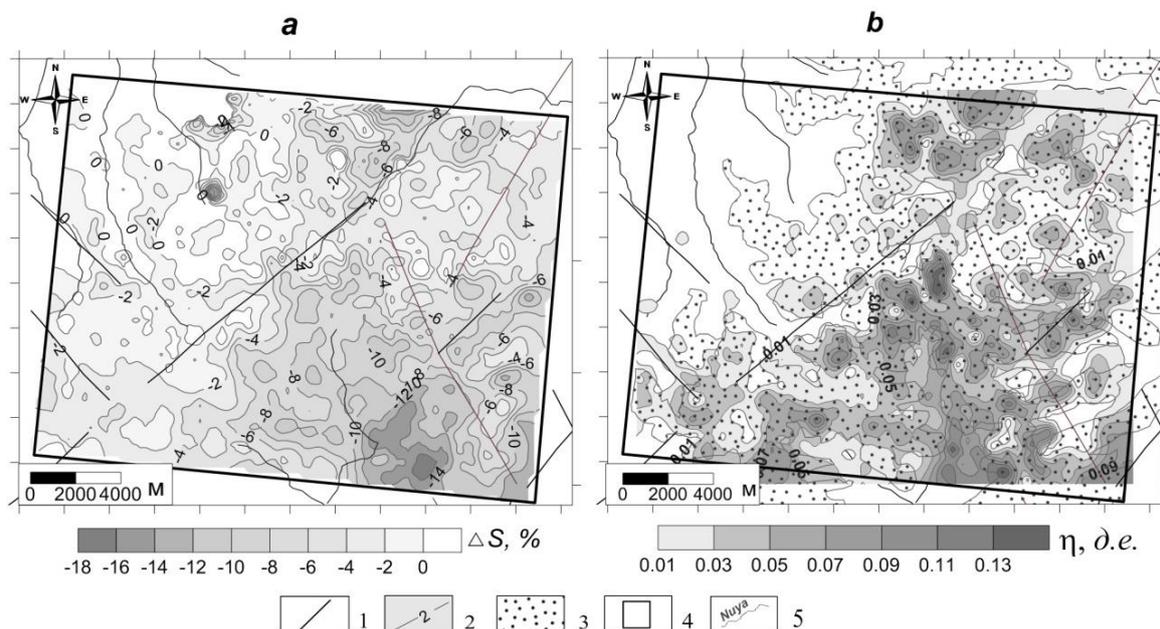


Рис. 5. Карты расхождения кривых кажущейся проводимости ΔS (а) и поляризуемости (б):
 1 – тектонические нарушения по данным геологической карты; 2 – изолиния параметра ΔS для рис. а, изолинии поляризуемости для рис. б; 3 – распространение юрских пород по данным геологической карты 1:200000; 4 – контур участка работ; 5 – гидросеть
Fig. 5. Divergence maps for apparent conductivity ΔS curves (а) and polarizability (б):
 1 – tectonic disturbances according to the geological map data; 2 – ΔS parameter isoline for fig. а, polarization isolines for fig. б; 3 – distribution of Jurassic rocks according to the geological map 1:200000; 4 – contour of the working site; 5 – rivers

связаны проявления ВП. Согласно источнику [6], значения $\tau = 0,1$ с и $\eta = 0,1-0,3$ характерны для осадочных пород с объемным содержанием сульфидов 0,5–5%. Сопоставление карт поляризуемости и геологической карты, на которой видно распространение юрских пород, позволяет предполагать связь повышенной поляризуемости и юрских отложений (см. рис. 5, b).

Как упоминалось, основной геологической задачей работ ЗСБ является картирование и определение параметров нефтегазоперспективных коллекторов в подсолевом комплексе, и при ее решении отсутствие учета ВПИ приводит к ошибкам прогноза параметров целевых объектов. В ходе интерпретации подсолевой комплекс на исследуемом участке был разделен на три подгоризонта; перспективными являются верхний (карбонатный) и нижний (преимущественно терригенного состава). На гистограммах (рис. 6) представлены распределения продольного сопротивления верхнего подгоризонта подсолевой части осадочного чехла, найденные с учетом и без учета ВП. Без учета ВП пик распределения сдвигается в сторону высоких значений УЭС и более трети от числа всех значений УЭС превышают 80 Ом·м. При

учете параметров ВП сопротивления изменяются в пределах 35–57 Ом·м. Данный диапазон УЭС, согласно статистике, свидетельствует о наличии коллектора, что подтверждено результатами бурения скважин.

Выводы

С помощью применения многообразных регистрирующих систем возможно выявлять и диагностировать ВПИ. Анализ проявления ВПИ и расчет параметра ΔS , который характеризует расхождение кривых кажущейся проводимости, измеренных на различных разносах, позволяют оконтурить поляризующиеся породы на площади и сформировать априорную модель, используемую в качестве стартовой для инверсии кривых ЗСБ, полученных в ходе площадных съемок. Данный подход сокращает время, необходимое для инверсии площадных данных ЗСБ.

Учет ВПИ при проведении инверсии данных ЗСБ приводит к уменьшению невязки, лучшему соответствию моделей геологическим данным и, соответственно, к повышению точности прогноза параметров и свойств коллекторов. В большинстве случаев прогноз подтвержден бурением.

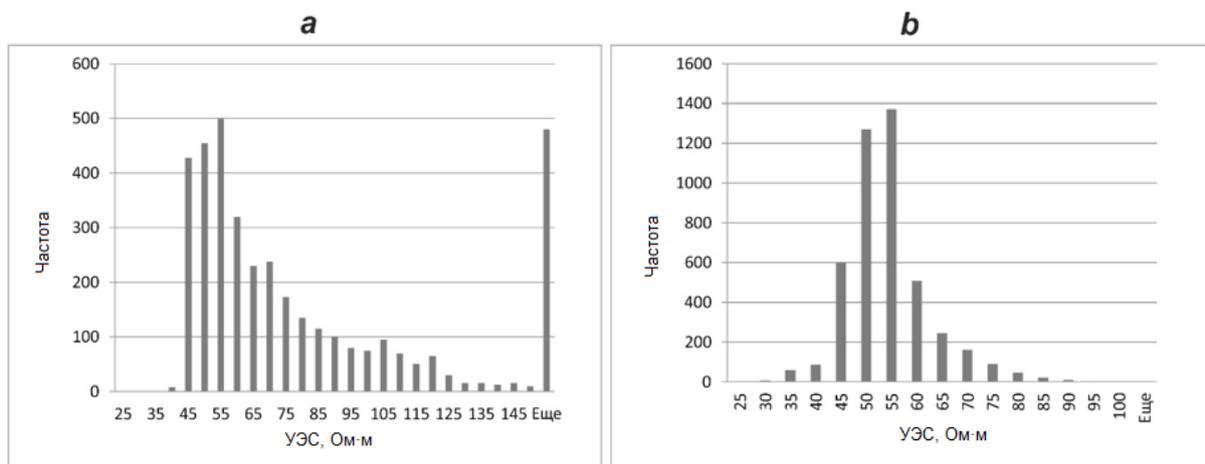


Рис. 6. Гистограммы удельного электрического сопротивления целевого горизонта, построенные по результатам инверсии кривых зондирования становлением поля в ближней зоне на участке без учета (а) и с учетом (б) вызванной поляризации
Fig. 6. Target horizon resistivity histograms plotted at the site by the TEM curve inversion results, with no account of IP (a) and with the account of IP (b)

Согласно результатам инверсии, проявления ВПИ связаны с породами верхней части разреза с параметрами: $\rho = 25\text{--}80 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $\eta = 0,01\text{--}0,15$; $\tau = 0,1 \text{ мс}$;

$c = 0,6$. Природа ВП связывается нами с присутствием пирита в отложениях юры и верхнего кембрия.

Библиографический список

1. Поспеева Е.В., Поспеев В.И. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в Якутской алмазаносной провинции // Обеспечение научно-технического прогресса при геофизических исследованиях в Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск; Новосибирск: Изд-во СНИИГ-ГИМС, 1987. С. 107–116.
2. Антонов Е.Ю., Кожевников Н.О., Компаниец С.В. Проявления и учет индукционно-вызванной поляризации верхней части разреза Восточной Сибири // ГЕО-Сибирь. 2011. Т. 2. № 2. С. 185–191.
3. Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Проявление и учет индукционно-вызванной поляризации при изучении осадочного чехла юга Сибирской платформы методом ЗСБ // Геофизика. 2013. № 1. С. 35–40.
4. Стогний В.В., Коротков Ю.В. Поиск кимберлитовых тел методом переходных процессов. Новосибирск: Малотиражная типография 2D, 2010. 121 с.
5. Шарлов М.В., Агафонов Ю.А., Стефаненко С.М. Современные телеметрические электроразведочные станции SGS-TEM и FastSnap. Эффективность и опыт использования // Приборы и системы разведочной геофизики. 2010. № 1 (31). С. 20–24.
6. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP // Geophysics. 1978. Vol. 43. P. 588–609.
7. Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю. Импульсная индуктивная электроразведка поляризующихся сред // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 4. С. 104–118.
8. Гусейнов Р.Г., Петров А.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Буддо И.В., Гомульский В.В. Система оценки качества сигналов нестационарных электромагнитных зондирований // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). С. 53–60.
9. Поспеев А.В., Буддо И.В., Агафонов Ю.А., Шарлов М.В., Компаниец С.В., Токарева О.В., Мисюреева Н.В., Гомульский В.В., Суворов Л.В., Ильин А.И., Емельянов В.С., Мурзина Е.В., Гусейнов Р.Г., Семинский И.К., Шарлов Р.В., Вахромеев А.Г., Сень Е.А. Современная практическая электроразведка. Новосибирск: Гео, 2018. 231 с.
10. Компаниец С.В., Токарева О.В., Поспеев А.В., Семинский И.К. К вопросу о возможности использования данных бокового каротажа при формировании геоэлектрической модели осадочного чехла юга Сибирской платформы // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 53–57.
11. Мурзина Е.В., Емельянов В.С., Поспеев А.В., Агафонов Ю.А. Подход к оценке качества автоматической инверсии данных высокоплотных электромагнитных зондирований // Стрoение литосферы и геодинамика: тез. докл. XXVII Всерос. молодежн. конф. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. С. 159–161.
12. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.
13. Шкиря М.С., Давыденко Ю.А. О связи наличия углеводородов и эпигенетических сульфидов на юге Якутии // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 523–529. <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.523>.

References

1. Pospeeva E.V., Pospeev V.I. *Rezultaty glubinnyykh magnitotelluricheskikh issledovaniy v Yakutskoi almazanosnoi provintsii* [The results of deep magnetotelluric investigations in the Yakutsk diamond-bearing province]. *Obespechenie nauchno-tekhnicheskogo progressa pri geofizicheskikh issledovaniyakh v Vostochnoi Sibiri* [Digest of articles. Support of scientific and technical progress in geophysical research in Eastern Siberia]. Irkutsk; Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics and Mineral Resources Publ., 1987, pp. 107–116. (In Russ.).
2. Antonov E.Yu., Kozhevnikov N.O., Kompaniets S.V. The manifestation of and allowing for the inductively induced polarization of the near-surface in Eastern Siberia. *GEO-Sibir'* [GEO-Siberia], 2011, vol. 2, no. 2, pp. 185–191. (In Russ.).
3. Kompaniets S.V., Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. The manifestation of and allowing for the inductively induced polarization in TEM sounding studies of sedimentary cover in the south of Siberian platform. *Geofizika* [Russian Geophysics], 2013, no. 1, pp. 35–40. (In Russ.).

4. Stognii V.V., Korotkov Yu.V. *Poisk kimberlitovykh tel metodom perekhodnykh protsessov* [Exploration for kimberlite bodies by TEM]. Novosibirsk: Malotirazhnaya tipografiya 2D Publ., 2010, 121 p. (In Russ.).
5. Sharlov M.V., Agafonov Yu.A., Stefanenko S.M. Modern telemetric electromagnetic prospecting systems *SGS-TEM* and *FastSnap*. Efficiency and usage expertise. *Pribory i sistemy razvedochnoi geofiziki* [Devices and Systems of Exploration Geophysics], 2010, no. 1 (31), pp. 20–24. (In Russ.).
6. Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R., Nelson P.H. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 1978, vol. 43, pp. 588–609.
7. Kozhevnikov N.O., Antonov E.Yu. Impulse-inductive electrical survey of polarizable medium. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical Journal], 2009, vol. 31, no. 4, pp. 104–118. (In Russ.).
8. Guseinov R.G., Petrov A.V., Agafonov Yu.A., Sharlov M.V., Buddo I.V., Gomul'skii V.V. Quality control system for transient electromagnetic soundings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 5 (100), pp. 53–60. (In Russ.).
9. Pospeev A.V., Buddo I.V., Agafonov Yu.A., Sharlov M.V., Kompaniets S.V., Tokareva O.V., Misyurkeeva N.V., Gomul'skii V.V., Surov L.V., Il'in A.I., Emel'yanov V.S., Murzina E.V., Guseinov R.G., Seminskii I.K., Sharlov R.V., Vakhromeev A.G., Sen' E.A. *Sovremennaya prakticheskaya elektrorazvedka* [Modern electrical survey practice]. Novosibirsk: Geo Publ., 2018, 231 p. (In Russ.).
10. Kompaniets S.V., Tokareva O.V., Pospeev A.V., Seminskii I.K. To possibility of using lateral logging data when building geoelectric models of Southern Siberian platform sedimentary cover. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 5 (88), pp. 53–57. (In Russ.).
11. Murzina E.V., Emel'yanov V.S., Pospeev A.V., Agafonov Yu.A. *Podkhod k otsenke kachestva avtomaticheskoi inversii dannykh vysokoplotnykh elektromagnitnykh zondirovaniy* [Approach to assessing the quality of automatic inversion of high-density electromagnetic sounding data]. *Tez. dokl. XXVII Vseros. molodezhn. konf. "Stroenie litosfery i geodinamika"* [Heads of reports, 27th All-Russian youth' conference "Lithosphere structure and geodynamics"]: Irkutsk: Institute of the Earth's crust, SB RAS Publ., 2017, pp. 159–161. (In Russ.).
12. Kontorovich A.E., Surkov B.C., Trofimuk A.A. *Geologiya nefi i gaza Sibirskoi platformy* [Geology of oil and gas of the Siberian craton]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 552 p. (In Russ.).
13. Shkirya M.S., Davydenko Yu.A. On the relationship between the presence of hydrocarbons and epigenetic sulfides in the south of Yakutia. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute], 2017, vol. 227, pp. 523–529. (In Russ.) <https://doi.org/10.25515/PMI.2017.5.523>.

Критерии авторства / Authorship criteria

Компаниец С.В., Кожевников Н.О., Мурзина Е.В., Емельянов В.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Sofia V. Kompaniets, Nikolai O. Kozhevnikov, Ekaterina V. Murzina, Vyacheslav S. Emelyanov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Компаниец Софья Викторовна,
ведущий геофизик,
Иркутское электроразведочное предприятие,
664011, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, Россия,
e-mail: ksv@ierp.ru
Sofia V. Kompaniets,
Senior geophysicist,
Irkutsk Electrical Prospecting Company,
2a, Rabochaya St., Irkutsk, 664011, Russia,
e-mail: ksv@ierp.ru



Кожевников Николай Олегович,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
главный научный сотрудник лаборатории геоэлектрики,
Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Коптюга, 3, Россия,
профессор кафедры геофизики,
Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru

Nikolai O. Kozhevnikov,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Chief Researcher at the Laboratory of Geoelectrics,
Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Prospekt Koptuga, Novosibirsk, 630090, Russia,
Professor at Geophysics Department,
Novosibirsk State University,
1, Pirogova St., Novosibirsk, 630090, Russia,
e-mail: KozhevnikovNO@ipgg.sbras.ru



Мурзина Екатерина Викторовна,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
геофизик,
Иркутское электроразведочное предприятие,
664011, г. Иркутск, ул. Рабочая, 2а, Россия,
e-mail: bkv@ierp.ru

Ekaterina V. Murzina,
Post-graduate student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
Geophysicist,
Irkutsk Electrical Prospecting Company,
2a, Rabochaya St., Irkutsk, 664011, Russia,
e-mail: bkv@ierp.ru



Емельянов Вячеслав Сергеевич,
геофизик,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: evs@ierp.ru

Vyacheslav S. Emelyanov,
Geophysicist,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664054, Russia,
e-mail: evs@ierp.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.379

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-165-175>

Методика интерпретации электромагнитных зондирований в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (электрофациальный анализ)

© В.А. Кочукова^а, А.М. Пашевин^б

^аИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^{а,б}Иркутское геофизическое подразделение, обособленное подразделение АО «Росгеология», г. Иркутск, Россия

Резюме: В работе представлены инновационные подходы к интерпретации данных электромагнитных исследований (метод зондирования становлением поля в ближней зоне), позволяющие оперативно получать информацию по изучаемой площади. Электрофациальный анализ данных является инновационной методикой электромагнитных исследований, в ходе него на этапе качественного анализа данных электромагнитных исследований исходные кривые интегрируются в сейсмический пакет обработки GeoDepth Paradigm посредством специализированных программ. Авторами в среде Stratimagic с привлечением стратиграфических отметок по данным сейсморазведки построены карты электрофаций по основным перспективным геоэлектрическим комплексам. Результатом электрофациального анализа являются карты электрофаций, построенные по основным геоэлектрическим комплексам. При сопоставлении карт электрофаций и карт продольной проводимости прослеживается соответствие в аномальных полях, что говорит о корректности инновационной технологии. Впоследствии классы электрофаций сопоставляются с данными результатов испытаний скважин глубоко бурения, расположенными на изучаемой территории. Выполнение электрофациального анализа существенно повышает уровень и информативность качественного анализа данных зондирования становлением поля в ближней зоне. Интегрирование электромагнитных данных в сейсмические пакеты программ облегчает проведение комплексирования на всех этапах интерпретации геофизических данных, что позволяет увеличить достоверность комплексного прогнозного параметра, а также повышает надежность картирования перспективных в нефтегазоносном отношении участков.

Ключевые слова: электромагнитные исследования, зондирование становлением поля в ближней зоне, трансформация кривой становления поля, электрофация, Сибирская платформа, нефтегазоперспективные участки, проводящие и высокоомные горизонты

Информация о статье: Дата поступления 12 марта 2019 г.; дата принятия к печати 30 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Кочукова В.А., Пашевин А.М. Методика интерпретации электромагнитных зондирований в геоэлектрических условиях юга Сибирской платформы (электрофациальный анализ). *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 165–175. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-165-175.

Procedure of electromagnetic sounding interpretation for geoelectric conditions of Siberian craton south (electric facies analysis)

© Veronika A. Kochukova^а, Alexander M. Pashevin^б

^аIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^{а,б}Irkutsk Geophysical Division, separate division of Rosgeologiya joint-stock company, Irkutsk, Russia

Abstract: The article considers advanced approaches to interpreting electromagnetic data i.e. near-field transient electromagnetic sounding (TEM) that provide prompt information on the area under study. The electric facies analysis is an innovative technique of electromagnetic survey in which at the stage of the qualitative analysis of the electromagnetic survey data, the initial curves are integrated into the *GeoDepth Paradigm* seismic processing

package by means of specialized software. As a result of the study, electric facies for the main geoelectric complexes have been mapped in the *Stratimagic* environment. The maps are based on the stratigraphic marks obtained by the seismic survey. The comparison of the electric facies maps and longitudinal conductivity maps shows the anomalous field match which confirms the method correctness. The electric facies classes are thereafter compared with the test data on the deep-hole wells located in the studied area. The electric facies analysis significantly increases the level and enhanced the informational content of the qualitative analysis of the TEM data. The integration of the electromagnetic data in seismic software packages facilitates integration at all stages of the geophysical data interpretation, thus increasing the validity of the complex predictive parameter and the reliability of mapping for the promising oil-and-gas sites.

Keywords: electromagnetic survey, near-field electromagnetic sounding in the near zone, TEM curve transformation, electric facies, Siberian craton, promising oil-and-gas areas, conductive oil-reservoir horizon

Information about the article: Received March 12, 2019; accepted for publication April 30, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Kochukova V.A., Pashevin A.M. Procedure of electromagnetic sounding interpretation for geoelectric conditions of Siberian craton south (electric facies analysis). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sektiis nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopayemykh* = *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. 2, pp. 165–175. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-165-175.

Введение

Изучение геоэлектрического строения осадочного чехла нефтегазоперспективных бассейнов является неотъемлемой частью комплекса геофизических исследований в современном мире при поисках месторождений углеводородного сырья. Изучение геоэлектрических характеристик, то есть изменения удельного электрического сопротивления горных пород, слагающих разрез осадочного чехла, позволяет производить вероятностную оценку перспективных в нефтегазоносном отношении участков на основе картирования зон улучшенных коллекторов нефтегазоперспективных горизонтов.

В настоящее время основным геофизическим методом для изучения геоэлектрического строения перспективных территорий является метод зондирования в модификации зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) [1]. Электромагнитные зондирования используются в геофизике более полувека. Основной направленностью метода является обнаружение нефтегазоперспективных участков. Метод основан на изучении поля переходных процессов, которое возбуждается в земле при изменении тока в источнике. Поведение этого поля

определяется продольной проводимостью проводящих горизонтов разреза.

Характеристика объекта исследования

Разработка инновационных методических подходов к интерпретации электромагнитных исследований методом ЗСБ на Сибирской платформе основана на материалах ЗСБ, полученных на Нукутской площади (Аларский, Нукутский и Черемховский районы Иркутской области) (рис. 1). В геологическом строении территории принимают участие архей-протерозойские метаморфические и интрузивные образования кристаллического фундамента, а также породы вендской, кембрийской, юрской систем, рыхлые четвертичные отложения, слагающие осадочный чехол [2].

В составе осадочного чехла по структурным и литологическим признакам выделяется три комплекса: подсолевой – пониженного сопротивления, охватывающий терригенные, карбонатные породы чорской свиты с включением нижней части усольской свиты по осинский горизонт; карбонатно-галогенный – повышенного сопротивления, к которому относятся усольская, бельская, булайская, ангарская и литвинцевская свиты. Надсолевой – объединяет карбонатно-

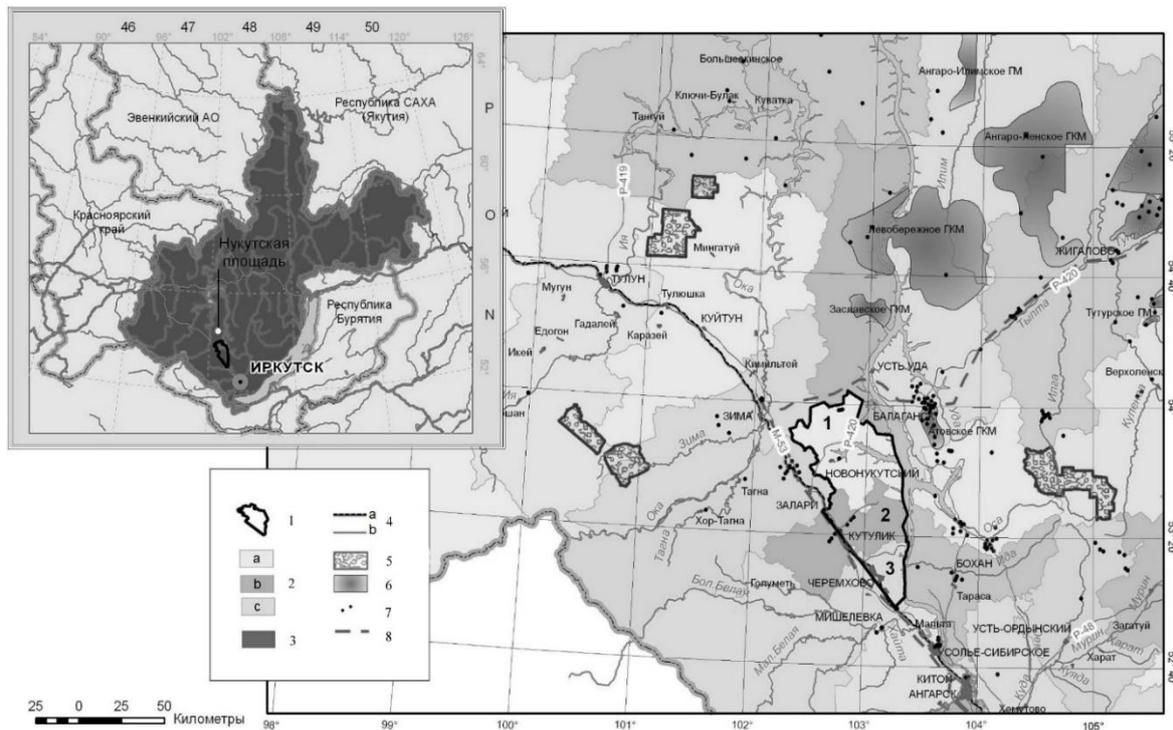


Рис. 1. Обзорная схема района работ:

1 – Контур Нукутской площади; 2 – территории районов: а – Нукутский, б – Аларский, с – Черемховский; 3 – населенные пункты; 4 – пути сообщения: а – железнодорожные, б – главные магистральные и республиканские дороги; 5 – заказники; 6 – месторождения углеводородов; 7 – скважины глубокого бурения; 8 – строящийся газопровод

Fig. 1. Overview scheme of the working site:

1 – Nukut area boundaries; 2 – region territories: a – Nukut, b – Alar, c – Cherekhovo; 3 – settlements; 4 – transport routes: a – railway, b – arterial highways and main regional roads; 5 – preserves; 6 – hydrocarbon deposits; 7 – deep-hole wells; 8 – gas pipeline under construction

терригенные отложения выше подошвы верхоленской свиты, обладает пониженным сопротивлением. Отметим, что на площади исследований верхний структурный комплекс в значительной степени размыт. В отличие от внутренних областей Сибирской платформы ангарские отложения не содержат солей, а соли в бельской свите маломощны и местами отсутствуют. Наиболее простая геоэлектрическая модель осадочного чехла представляется четырехслойной – КН, однако с проявлением региональных пластов-коллекторов в различных комплексах осадочного чехла разрез аппроксимируется более сложной многослой-

ной моделью. В разрезе в целом выделяется восемь геоэлектрических горизонтов, дифференцированных по сопротивлению.

Материалы и методы исследования

В настоящее время в практику нефтегазопроисковых работ активно внедряются передовые геофизические программные комплексы, одним из которых является программа Stratimagic. Программный комплекс Stratimagic используется для сейсмофациального анализа, в котором применяется технология искусственных нейронных сетей (ИНС)¹. Применение ИНС при интерпретации

¹Руководство по Stratimagic. Основной учебный курс. Paradigm Geophysical Ltd. Май, 2002. / Guide to Stratimagic. Basic training course. Paradigm Geophysical Ltd. May, 2002.

материалов ЗСБ позволяет определять и анализировать детальные характеристики коллекторов, не выявляемые другими способами [3, 4]. В основе ИНС лежит алгоритм самоорганизующейся нейронной сети для распознавания и оценки изменения формы сейсмического сигнала на изучаемом интервале (например, в коллекторе).

Для выражения изменения состава отложений определенного стратиграфического отрезка на площади его распространения было введено в геологию понятие «фация». Ученые трактуют это понятие по-разному². Наиболее содержательное понятие фации было предложено Н.В. Логвиненко: «Фация – это обстановка осадконакопления, современная или древняя, овегцествленная в осадке или породе». В настоящее время многие ученые занимаются исследованием фациального состава отдельных пластов-коллекторов нефтеносных месторождений методами сейсморазведки и электроразведки [5, 6].

В Stratimagic, SeisFacies (Paradigm) используется понятие «сейсмофация» – это зона с одинаковыми параметрами сейсмической записи (например, форма сигнала) в определенном интервале, которая может быть сопоставлена с какой-либо геологической фацией (русло, бар, заполнение канала, береговая отмель и т. д.).

В данной статье авторами выполнен анализ формы записи сигнала ЗСБ (в виде трансформации кривых $St(Ht)$) с позиции фациального насыщения геоэлектрического комплекса в программе Stratimagic – электрофациальный анализ. Он направлен на изучение коллекторских свойств геоэлектрических комплексов в районе скважин глубокого бурения и распространен по всей территории исследования. Впоследствии построенные карты классов электрофаций

сопоставлены с данными сейсмофациального и полеотектонического анализов и с определенной геологической обстановкой.

Понятие «электрофация» введено В.С. Муромцевым (1984 г.) и означает интерпретацию каротажной кривой $ПС$ различной формы для выяснения обстановок осадконакопления [7]. Это так называемый прямой метод определения фациального состава пород в определенной скважине [8]. Условия осадконакопления на территории Сибирской платформы не позволяют выявить особенности фациального строения в связи с сильной засоленностью разреза. Поэтому, как правило, в скважинах глубокого бурения метод каротажа $ПС$ не выполняется. Однако если применить электрофациальный анализ к данным ЗСБ на территории, где возможен прямой метод определения осадконакопления по методике В.С. Муромцева, появляется возможность территориально по площади оценить фациальные особенности с однозначной привязкой к скважинам. На территории юга Сибирской платформы электрофациальный анализ данных ЗСБ предпочтительно выполнять в комплексе с сейсмофациальным анализом, результатами ГИС, а также палеотектоническим анализом [9].

Результаты электромагнитных исследований ЗСБ представляются в виде кривых становления поля $St(Ht)$ [1], где кажущаяся продольная проводимость отражает распределение продольной проводимости разреза St до глубины Ht .

Электрофациальный анализ данных ЗСБ позволяет анализировать исходный полевой материал ЗСБ в различных трансформациях с использованием алгоритмов автоматической классификации. Он включает в себя построение карт распределения классов электрофаций по исследуемой площади в программе Stratimagic (Paradigm Geophysical) в

² Крашенинников Г.Ф. Учение о фациях: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 1971. 368 с. / Krashennnikov G.F. Facies Theory. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1971. 368 p.

различных интервалах. Интервалы исследования задаются по результатам интерпретации данных сейсморазведки методом общей глубинной точки и/или скважин глубокого бурения. При этом исходный полевой материал ЗСБ интегрируется в программный комплекс Stratimagic с помощью специализированных программ, разработанных обособленным подразделением АО «Росгеология» «Иркутское геофизическое подразделение».

Интерпретация данных ЗСБ, как правило, проводится в два этапа: этап качественного анализа и этап количественной интерпретации. Электрофациальный анализ выполняется на этапе качественного анализа для получения большей

информации из полевых данных и не зависит от субъективного взгляда интерпретатора.

На начальном этапе качественного анализа проводится районирование площади по форме кривой становление поля и оценивается распределение типов кривых по изучаемой. Данная операция выполняется в пакете Stratimagic, где распределяются типы кривых $St(Ht)$ в соответствии с определенными типами – НКН, КН и др. (рис. 2). Таким образом, на основе районирования по типам кривых $St(Ht)$ в интервале 400–3000 м на Нукутской площади было получено три основных типа кривых. Первый тип (1–4) отражает слабо проводящий разрез, не имеющий интенсивных проводящих

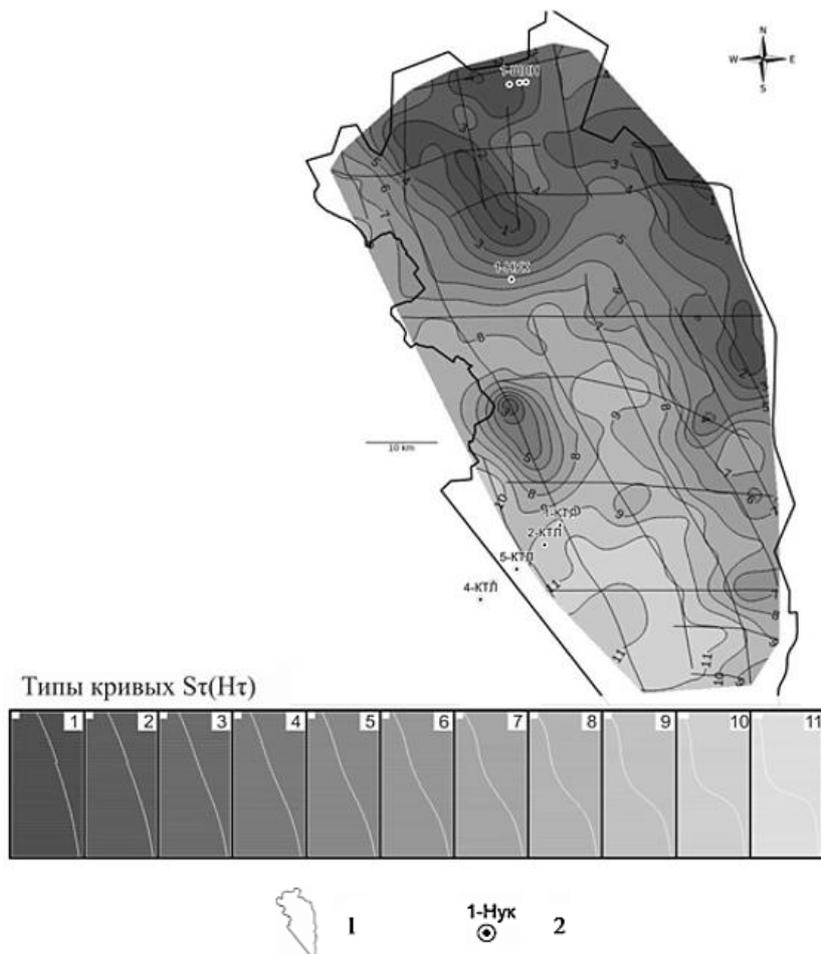


Рис. 2. Карта распределения типов кривых $St(Ht)$ на Нукутской площади:
1 – Контур Нукутской площади; 2 – скважины глубокого бурения

Fig. 2. Distribution map of $St(Ht)$ curve types in Nukut area:
1 – Nukut area boundaries; 2 – deep-hole wells

горизонтов. Кривые второго типа (5–8) обладают слабо выраженными проводниками в верхней и нижней частях разреза. Третий тип кривых (9–11) приурочен к разрезу с интенсивными проводящими горизонтами в верхней и нижней частях разреза.

При выполнении электрофациального анализа отдельных интервалов разреза, например перспективных с точки зрения нефтегазонакопления, визуализируются проводящие и высокоомные слои, приуроченные к стратиграфическим комплексам, выделенным по данным каротажа и/или сейсморазведки (метод общей глубинной точки 2D). При этом оценивается характер изменения кривых, проводится их корреляция, выполняется районирование площади по типам формы записи кривых $St(Ht)$, выявляются закономерности процесса становления на различных участках территории, определяется тип геоэлектрического разреза (рис. 3).

На данном этапе формируются стартовые геоэлектрические модели, которые затем используются при количественной интерпретации.

После детального проведения качественного анализа мы имеем достаточную для моделирования (инверсии) информацию, что позволяет достоверно выполнять количественную интерпретацию (второй этап интерпретации данных ЗСБ). Количественная интерпретация заключается в численном моделировании (1D-инверсии) каждой точки ЗСБ в классе горизонтально-слоистой среды, параметры которой увязываются с данными ГИС, бурения и сейсморазведки с использованием специализированных программных комплексов. При 1D-инверсии осуществляется подбор геоэлектрической модели теоретической кривой (кривая становления поля $St(Ht)$) с минимальной невязкой относительно практической кривой. При этом геоэлектрическая модель не должна противоречить

Скважина 1-НУК
 Альтитуда скважины
 Глубина скважины

403.36 м
 2552 м

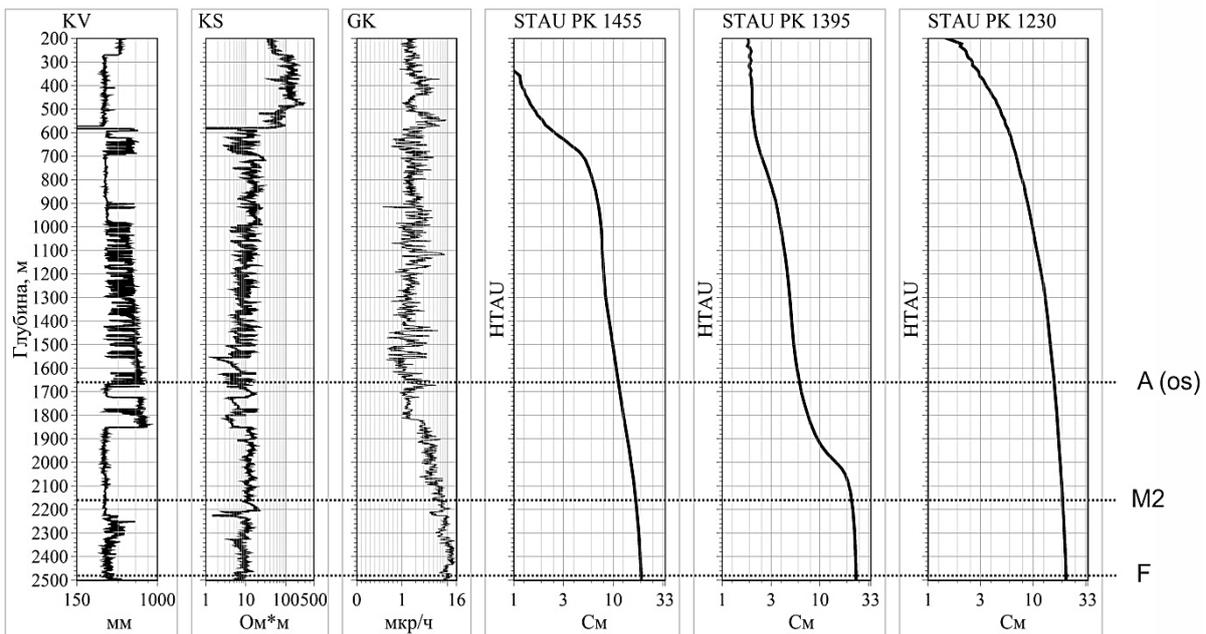


Рис. 3. Интервал исследования подсолевого комплекса на каротажных кривых и кривых зондирования становлением поля в ближней зоне в трансформации $St(Ht)$
Fig. 3. Survey interval for the subsalt complex on log curves and $St(Ht)$ -transformed TEM curves

априорной геологической информации. После проведения количественной интерпретации материалов ЗСБ выполняется построение карт и разрезов целевых геоэлектрических горизонтов. На заключительном этапе проводится комплексная интерпретация результатов геофизических методов с целью выделения перспективных в нефтегазопроисловом отношении участков.

Полученные результаты и их обсуждение

В связи с тем, что основные перспективы в нефтегазопроисловом отношении юга Сибирской платформы связаны с продуктивными коллекторами подсолевого комплекса (осинский, парфеновский, боханский горизонты) [10], электрофациальный анализ на Нукутской площади

был направлен на изучение данного интервала.

В результате была сконструирована карта классов электрофаций в интервале А-Е, которая для сравнения сопоставлена с картой электропроводности осадочного чехла и построена в том же интервале в результате количественной интерпретации (рис. 4). Впоследствии классы электрофаций сопоставлены с результатами испытаний в скважинках глубокого бурения, данными ГИС и петрофизическими исследованиями [11, 12].

При сопоставлении карты классов электрофаций с картой электропроводности прослеживается соответствие в морфологии аномальных полей.

На севере площади зона ухудшения коллекторов соответствует электро-

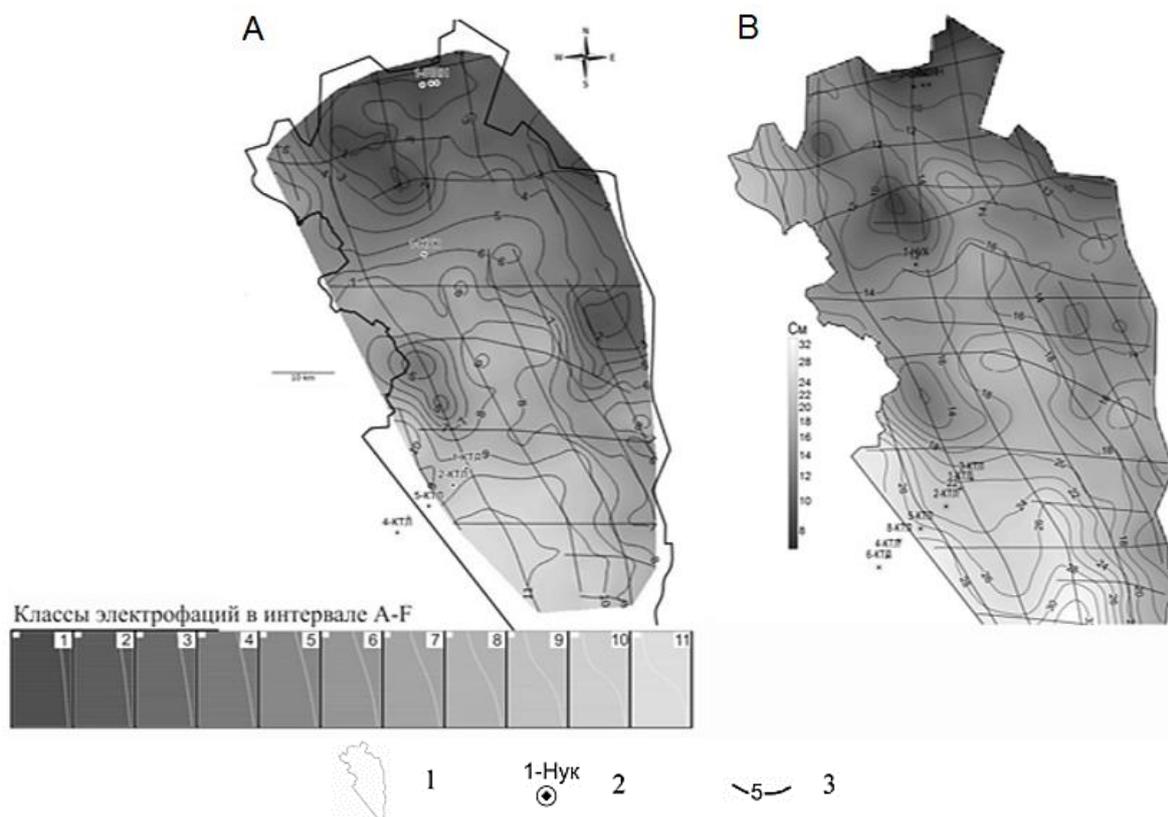


Рис. 4. Сопоставление карты классов электрофаций (А) и карты электропроводности (В) отложений подсолевого комплекса в интервале отражений А-Е:

1 – контур Нукутской площади; 2 – скважины глубокого бурения;

3 – изолинии классов электрофаций (А), изолинии электропроводности (В), См

Fig. 4. Comparison of electric facies classes maps (A) and electrical conductivity maps (B) for subsalt complex deposits in the reflection range A-F:

1 – Nukut area boundaries; 2 – deep-hole wells;

3 – electric facies classes isolines (A), electric conductivity isolines (B), Cm

фациям с 1 по 4 класс (темно-серый цвет). В данной области расположены три скважины глубокого бурения (Шелонинская-1, 2, 3). По результатам испытаний все продуктивные горизонты в интервале А-Е оказались сухими, что подтверждается низкими значениями электропроводности. В литологическом плане интервал представлен карбонатными и терригенными породами с чередованием продуктивных пластов-коллекторов. За счет улучшения их коллекторских свойств (фациального состава) изменяется и форма кривой $St(Ht)$, и можно судить о примерном насыщении этих пластов-коллекторов. В данной области пласты-коллекторы не имеют нефтегазового насыщения и являются неперспективными. Их фациальный состав неблагоприятен для аккумуляции и генерации углеводородов.

В центральной части Нукутской площади распределение электрофаций и электропроводности отражает более сложную структуру геоэлектрического поля, здесь фиксируются электрофации с 4 по 8 класс. В данной области расположена скважина глубокого бурения Нукутская-1. По результатам испытаний в скважине из продуктивных горизонтов получено смешанное флюидонасыщение. Так, из осинского пласта коллектора получен приток воды с растворимым горючим газом. В терригенной части разреза из парфеновского горизонта притока не получено, а из непского и ушаковского пластов-коллекторов получены незначительные притоки газа. Таким образом, область электрофаций с 4 по 8 класс

можно считать перспективной областью с газовым и смешанным насыщением и улучшенными коллекторскими свойствами.

В южной части Нукутской площади хорошо выраженная аномалия, соответствующая проводящим отложениям (светло-серый цвет), соответствует электрофациям с 8 по 11 класс. Здесь расположены скважины глубокого бурения Кутуликская-1, 2, 3. По результатам испытаний в данных скважинах из перспективных пластов-коллекторов получены притоки сильно минерализованной воды с незначительным выделением газа. Эту область можно приурочить к области с улучшенными коллекторскими свойствами.

Заключение

На основе всего вышесказанного можно сделать следующие выводы:

– выполнение электрофациального анализа существенно повышает уровень и информативность качественного анализа данных ЗСБ;

– интегрирование электромагнитных данных в сейсмические пакеты программ облегчает проведение комплексирования на всех этапах интерпретации геофизических данных, что позволяет увеличить достоверность комплексного прогнозного параметра, а также повышает надежность картирования перспективных в нефтегазоносном отношении участков;

– использование специализированных программных продуктов позволяет оперативно выполнять поставленные геофизические задачи.

Библиографический список

1. Сидоров В.А. Тикшаев В.В. Электроразведка зондированиями становлением поля в ближней зоне. Саратов: Изд-во НВНИИГГ, 1969. 68 с.
2. Анциферов А.С., Бакин В.Е., Варламов И.П. [и др.]. Геология нефти и газа Сибирской платформы / под ред. А.Э. Конторовича, В.С. Суркова, А.А. Трофимука. М.: Недра, 1981. 552 с.

3. Латыпова Э.С., Нестерова Т.А., Конова Т.А. Сейсмофациальный анализ как основной метод прогноза развития коллекторов в условиях ограниченной изученности бурением // Геомодель-2016: материалы XVIII Междунар. геолог. науч.-практ. конф. EAGE. Геленджик, 2016. С. 57–61.
4. Малярова Т.Н., Птецов С.Н., Иванова Н.А. Методика изучения и прогноза

коллекторских свойств резервуаров руслового генезиса по данным сейсморазведки 3D и ГИС в условиях широтного Приобья // Выделение коллекторов, оценка их ФЕС и нефтенасыщенности по данным полевой и промысловой геофизики Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции: материалы геофиз. науч.-практич. конф. Тюмень-ОЕАГО. Тюмень, 2004. С. 21–25.

5. Александров В.М., Мазаев В.В. Палеофациальное районирование осадочных отложений пласта ЮС₁ Фаинского месторождения // Вестник Тюменского государственного университета. 2005. № 4. С. 142–148.

6. Меркулова Т.В., Развожаева Е.П. Анализ фаций в кайнозойских грабенах среднеамурского осадочного бассейна методами сейсмо- и электроразведки // Тихоокеанская геология. 2007. Т. 26. № 4. С. 34–52.

7. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел – литологических ловушек нефти и газа. М.: Недра, 1984. 260 с.

8. Белозёров В.Б. Роль седиментационных моделей в электрофациальном анализе терригенных отложений // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 319. № 1. С. 116–123.

9. Ухлова Г.Д., Соломатин В.В., Штифанова Л.И., Чернышова Т.И. Сейсмофациальный

анализ и возможности прогнозирования литотипов пород по данным сейсморазведки // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории: материалы VII Всерос. литолог. совещ. Новосибирск, 2013. С. 227–230.

10. Самсонов В.В., Ларичев А.И., Чеканов В.И., Соловьев В.В. Особенности геологического строения нефтегазовых комплексов и оценка перспектив нефтегазоносности южной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 11. С. 1545–1564.

11. Окс Л.С. Выделение электрофаций с целью повышения качества определения петрофизических параметров по данным ГИС на примере Чокракских отложений сладковско-морозовской группы месторождений // Проблемы геологии и освоения недр: труды XVI Междунар. симпозиума им. акад. М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвящ. 110-летию со дня основания горно-геологического образования в Сибири. Краснодар, 2012. С. 399–401.

12. Мусин К.М., Шарифуллина Г.Р., Кандурова Г.Ф., Нафиков А.З. Интерпретация данных ГИС сложных карбонатных коллекторов старого фонда скважин – нестандартные решения // Георесурсы. 2005. № 1 (16). С. 40–42.

References

1. Sidorov V.A., Tikshaev V.V. *Elektrorazvedka zondirovaniyami stanovleniem polya v blizhnei zone* [New-field TEM sounding]. Saratov: Nizhnevolzhsk Research Institute of Geology and Geophysics Publ., 1969, 68 p. (In Russ.).

2. Antsiferov A.S., Bakin V.E., Varlamov I.P. *Geologiya nefti i gaza Sibirskoi platformy* [Oil and gas geology of Siberian craton]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 552 p. (In Russ.).

3. Latypova E.S., Nesterova T.A., Kononova T.A. *Seismofatsial'nyi analiz kak osnovnoi metod prognoza razvitiya kollektorov v usloviyakh ogranichennoi izuchennosti bureniem* [Seismic facies analysis as the main method for reservoir development prediction in the conditions of limited exploration state]. *Materialy XVIII Mezhdunar. geolog. nauch.-prakt. konf. EAGE. "Geomodel'-2016"* [Materials of the 18th International Geological Research-to-practice Conference "Geomodel-2016"]. Gelendzhik, 2016, pp. 57–61. (In Russ.).

4. Malyarova T.N., Ptetsov S.N., Ivanova N.A. *Metodika izucheniya i prognoza kollektorskikh svoystv rezervuarov ruslovogo genezisa po dannym seismorazvedki 3D i GIS v usloviyakh shirotnogo Priob'ya* [Technique of prospecting and predicting the properties of reservoirs of a channel genesis based on GIS and 3D seismic survey data in the conditions of latitudinal Priobye strike]. *Materialy geofiz. nauch.-*

praktich. konf. Tyumen'OEAGO "Vydelenie kollektorov, otsenka ikh FES i nefte-nasyshchennosti po dannym polevoi i promyslovoi geofiziki Zapadno-Sibirskoi neftegazonosnoi provintsi" [Materials of geophysical research-to-practice conference of the Tyumen Branch of EAGS "Allocation of reservoirs, estimation of their FCP and oil saturation based on the field and development geophysics of the West Siberian oil-and-gas province"]. Tyumen, 2004, pp. 21–25. (In Russ.).

5. Aleksandrov V.M., Mazaev V.V. Paleofacies zoning of the Fain oil field stratums deposits. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Tyumen State University Herald], 2005, no. 4, pp. 142–148. (In Russ.).

6. Merkulova T.V., Razvozhayeva E.P. Cenozoic graben facies in the Middle Amur sedimentary basin as inferred from seismic and electrical exploration. *Tikhookeanskaya geologiya* [Russian Journal of Pacific Geology], 2007, vol. 26, no. 4, pp. 34–52. (In Russ.).

7. Muromtsev V.S. *Elektrometricheskaya geologiya peschanykh tel – litologicheskikh lovushek nefti i gaza* [Electrometric geology of sand solids: lithologic oils and gas traps]. Moscow: Nedra Publ., 1984, 260 p. (In Russ.).

8. Belozherov V.B. Role of sedimentation models in electric facies analysis of terrigenous deposits.

Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2011, vol. 319, no. 1, pp. 116–123. (In Russ.).

9. Ukhlova G.D., Solomatin V.V., Shtifanova L.I., Chernyshova T.I. *Seismofatsial'nyi analiz i vozmozhnosti prognozirovaniya litotipov porod po dannym seismorazvedki* [Seismic facies analysis and possibilities of forecasting the rock lithotypes by seismic survey data]. *Materialy VII Vseros. litolog. soveshch. "Osadochnye basseiny, sedimentatsionnye i postsedimentatsionnye protsessy v geologicheskoi istorii"* [Materials of the 7th All-Russian lithologic meeting "Sedimentation tanks, sedimentation and post-sedimentation processes in geological history"]. Novosibirsk, 2013, pp. 227–230. (In Russ.).

10. Samsonov V.V., Larichev A.I., Chekanov V.I., Solov'ev V.V. Geological structure of the oil-and-gas plays and oil-and-gas potential of the southern Siberian Platform. *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2010, vol. 51, no. 11, pp. 1545–1564. (In Russ.).

11. Oks L.S. *Vydelenie elektrofatsii s tsel'yu*

povysheniya kachestva opredeleniya petrofizicheskikh parametrov po dannym GIS na primere Chokraskikh otlozhenii sladkovsko-morozovskoi gruppy mestorozhdenii [Defining electric facies for the purpose of improving the quality of petrophysical parameters measurements by GIS data: Chokrasky deposits case, sladkov-morozov field group]. *Trudy XVI Mezhdunar. simpoz. im. akad. M.A. Usova studentov i molodykh uchenykh, posvyashch. 110-letiyu so dnya osnovaniya gorno-geologicheskogo obrazovaniya v Sibiri "Problemy geologii i osvoeniya nedr"* [Proceedings of the 16th International Students' and Young Scientists' Symposium n. a. M.A. Usov dedicated to the 110th anniversary of mining-and-geological education in Siberia "Geology and subsoil development issues"]. Krasnodar, 2012, pp. 399–401. (In Russ.).

12. Musin K.M., Sharifullina G.R., Kandaurova G.F., Nafikov A.Z. Interpretation of GIS data on complex carbonate reservoirs of the old well stock: non-standard decisions. *Georesursy* [Georesources], 2005, no. 1 (16), pp. 40–42. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Кочукова В.А., Пашевин А.М. написали статью, имеют на нее авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Veronika A. Kochukova and Alexander M. Pashevin are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Кочукова Вероника Алексеевна,

аспирант,

Институт недропользования,

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,

ведущий геофизик,

Иркутское геофизическое подразделение, обособленное подразделение
АО «Росгеология»,

664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а, Россия,

e-mail: nikamop@mail.ru

Veronika A. Kochukova,

Post-graduate student,

Institute of Subsoil Use,

Irkutsk National Research Technical University,

83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,

Senior Geophysicist,

Irkutsk Geophysical Division, separate division of *Rosgeologiya* joint-stock
company,

9a, Clara Zetkin St., Irkutsk, 664039, Russia,

e-mail: nikamop@mail.ru



Пашевин Александр Михайлович,
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий геофизик,
Иркутское геофизическое подразделение, обособленное подразделение
АО «Росгеология»,
664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а, Россия,
e-mail: ampashev@yandex.ru
Alexander M. Pashev,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Geophysicist,
Irkutsk Geophysical Division, separate division of *Rosgeologiya* joint-stock
company,
9a, Clara Zetkin St., Irkutsk, 664039, Russia,
e-mail: ampashev@yandex.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 550.83; 553.632

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-176-184>

Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений

© А.М. Пригара

ВНИИ Галургии, г. Пермь, Россия

Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь, Россия

Резюме: Цель данной статьи заключается в исследовании характера искажения отраженных сигналов, входящих из разных полупространств при применении процедуры разделения отражений. Зная характер искажений и параметры, от которых они зависят, можно подбирать оптимальную методику полевых работ и обработки. В статье рассматриваются результаты, получаемые при выполнении шахтных сейсморазведочных работ методом отраженных волн по методике общей глубинной точки. В рамках данного метода при участии автора разработан способ шахтной сейсморазведки с использованием поперечных волн с разделением отражений, прошедший апробацию на Верхнекамском месторождении калийных солей. При разделении отражений возникает искажение сигнала, зависящее в основном от расстояния между линиями пунктов возбуждения. Путем решения прямой задачи сейсморазведки выполнено моделирование сигналов с различным расстоянием между линиями приема. В результате исследования выявлены закономерности влияния расстояния между линиями пунктов возбуждения на характеристики разделяемых отраженных сигналов. Качество подавления сигнала практически не зависит от расстояния между линиями пунктов возбуждения. Обратная ситуация наблюдается с выделяемым сигналом. При различном расстоянии между линиями пунктов возбуждения наблюдаются различные искажения, как амплитуды, так и фазы сигнала. Кроме того, изменяется и его длина, причем при выделении сигнала, приходящего снизу, удлинение происходит в направлении начала записи, а при выделении сигнала, приходящего сверху – в направлении конца записи. Качество подавления сигнала практически ни от чего не зависит. Выделяемый же сигнал при любом расстоянии между линиями пунктов возбуждения будет претерпевать те или иные искажения. Зная их характер и опираясь на результаты настоящего исследования, можно выбирать такое расстояние, которое обеспечит наилучший результат по разделению отражений в зависимости от решаемой задачи.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение калийных солей, шахтная сейсморазведка, поперечные волны, метод отраженных волн по методике общей глубинной точки, разделение отражений

Информация о статье: Дата поступления 30 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 7 июня 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Пригара А.М. Особенности применения способа шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 176–184. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-176-184.

Specifics of the underground seismics method using shear waves with reflection separation

© А.М. Prigara

ARRIH (All-Russian Research Institute of Hallurgy), Perm, Russia

Perm State University, Perm, Russia

Abstract: The purpose of the study has been to investigate the character of distortion of the reflected signals from different semispaces using the reflection separation procedure. The knowledge of the distortion character and influencing parameters makes it possible to select an effective method of field works and processing. The article presents the underground seismic survey results obtained using the reflected wave method, i.e. common depth point procedure. In the frames of the method, with the participation of the author, an underground seismics method

using shear waves with reflection separation has been developed and tested at the Verkhnekamskoye potash salt deposit. With the reflection separation, the signal distortion depends mainly on the distance between the source points lines. Following the direct task of seismic survey, the signals have been modeled for different distances between the reception lines. The study has shown clear regularities in the effect of the distance between the source point lines on the characteristics of the separated reflected signals. The quality of the signal suppression virtually independent on the distance between the source points lines. For an enhanced signal, it is the opposite: depending on the distance between the source point lines, both the signal amplitude and phase get distorted. The signal length also changes: when enhancing the signal coming from below, the elongation happens in the direction of the record beginning, and for a signal coming from above, in the direction of the record end, the quality of signal suppression being almost in no dependence to anything. Vice versa, an enhanced signal is subject to any kind of distortion when the distance between the source point lines changes. Based on the research results, it is possible to choose a distance that provides optimum reflection separation corresponding to a research task.

Keywords: Verkhnekamskoye potash salt deposit, underground seismics, shear waves, reflection method by a common depth point seismic procedure, reflection separation

Information about the article: Received April 30, 2019; accepted for publication June 7, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Prigara A.M. Specifics of the underground seismics method using shear waves with reflection separation. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sektiia 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. 2, pp. 176–184. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-176-184.

Введение

Верхнекамское месторождение солей (ВКМС) расположено в пределах Пермского края на левом берегу р. Кама. Месторождение комплексное, в его пределах ведется добыча сырья для производства калийных удобрений, карналлита (источник магния для титаномагневых сплавов), каменной соли (технической, кормовой, пищевой) [1].

Активная добыча солей вызывает необходимость во всестороннем изучении строения соляной толщи ВКМС и в частности внутрисоляных деформаций [2]. Внутрисоляные деформации – это в основном складчатые деформации, которые зачастую характеризуются сложностью и интенсивностью, что затрудняет ведение подземных горных работ и ведет к значительным потерям и разубоживанию ископаемых солей. Поэтому без знания характера, особенностей строения и закономерностей пространственного распространения внутрисоляных деформаций невозможно успешно решать вопросы по рациональному планированию и проведению горных работ и выбору новых шахтных полей. Всестороннее изучение внутрисоляных деформаций имеет и

весомое теоретическое значение. Из-за отсутствия объективных сведений о строении и закономерностях распространения данных деформаций среди геологов нет единства взглядов на формирование соляных структур ВКМС.

На сегодняшний день особенности строения месторождений солей изучаются как прямыми методами – проходкой горных выработок, так и косвенными – с помощью геофизики [3–9]. Очевидно, что прямые методы дороги и ограничены в применении, и поэтому дают недостаточно информации для решения очерченных выше задач. Геофизические же методы, с одной стороны, обладают возможностью квазинепрерывного исследования земной толщи, с другой стороны, характеризуются целым рядом физических ограничений и особенностей, свойственных для работы в условиях шахт. Так, в ряде работ [10–13] показана сложность структуры волнового поля, образующегося при выполнении сейсморазведочных работ в подземных выработках, что сильно осложняет получение объективной информации о строении месторождения и характеристиках внутрисоляных деформаций. Данная ситуация

приводит к тому, что подходы к выполнению геофизических методов, характерные для поверхностных условий, неприменимы в условиях шахт и требуют значительных изменений и доработок.

Для целей детального и объективного изучения геологического строения ВКМС и встречающихся в его пределах внутрисоляных деформаций в АО «ВНИИ Галургии» разработан способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ВНИИ Галургии [14]. Способ апробирован на ВКМС, где устойчиво показывает объективные результаты при изучении особенностей геологического строения и внутрисоляных деформаций. Поскольку способ разработан буквально полгода назад, он находится в стадии становления и в ходе его апробации возникает масса вопросов, требующих ответа. К таким вопросам относятся: особенности разделения отраженных сигналов, приходящих к линии приема из разных полупространств, в том числе влияние разделения на форму сигнала; «дальность действия» метода отраженных волн при использовании предлагаемого способа; особенности скоростного анализа в условиях интенсивной складчатости; связь скоростей поперечных волн и физических свойств пород; возможности по определению наклона границ вкрест профилей; возможности по обнаружению и изучению различных геологических неоднородностей и так далее. В данной работе подробно рассмотрен вопрос разделения отраженных сигналов, приходящих из разных полупространств.

Материалы и методы исследования

Способ шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ВНИИ Галургии учитывает особенности возбуждения и приема упругих колебаний в шахтных условиях, когда регистрируемое волновое поле является результатом интерференции отражений,

пришедших к линии приема с разных сторон. В частности, для исследований в вертикальной плоскости предлагается устанавливать в стену горизонтально ориентированные сейсмоприемники и возбуждать поперечные волны горизонтальными же ударами в стену (рис. 1). При этом поперечные волны будут распространяться в направлении, радиальном (перпендикулярном) относительно оси удара. В результате в случае субгоризонтального залегания геологических слоев основная часть отраженных поперечных волн будет приходить к линии приема сверху и снизу.

Для разделения отражений, приходящих к линии приема сверху и снизу (или с других сторон в случае исследований в плоскости, отличной от вертикальной), авторами предлагается [14] на этапе выполнения полевых работ отрабатывать две линии пунктов возбуждения. В случае исследований в вертикальной плоскости эти линии должны быть разнесены на определенное расстояние друг от друга в вертикальном направлении (см. рис. 1).

Благодаря такому подходу на этапе камеральной обработки получают два разреза, относящихся к разным линиям возбуждения (рис. 2, *A*, *B*). Отражения, пришедшие сверху и снизу, на этих разрезах будут сдвинуты относительно друг друга за счет расстояния между линиями возбуждения. В случае соляных шахт при работах в одноходовых выработках удастся разнести линии возбуждения по высоте на расстояние примерно до 2,5 м, что при скорости поперечных волн 2500 м/с дает разницу во времени прихода отражений порядка 1 мс. Этого вполне достаточно для успешного разделения отражений, приходящих из разных полупространств.

Окончательно разделять отражения сверху и снизу авторы предлагают на камеральном этапе и разработали для этого три способа. Первый из них

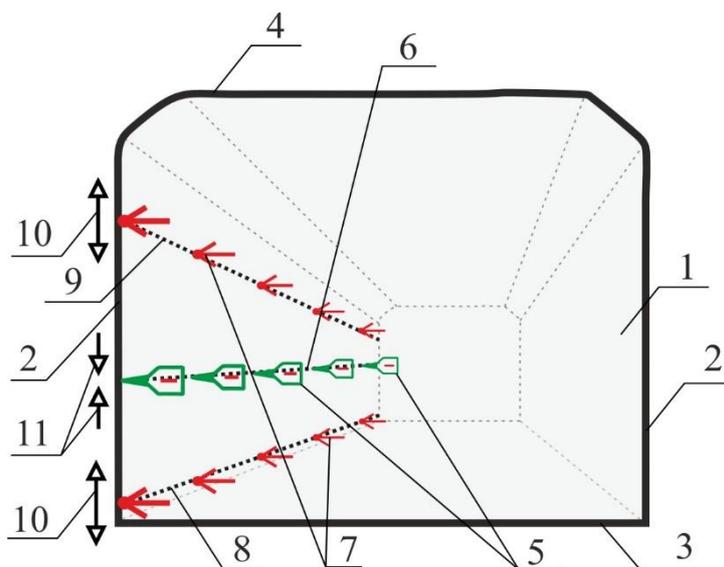


Рис. 1. Схема выполнения полевых сейсморазведочных работ способом шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ВНИИ Галургии при исследованиях в вертикальной плоскости:

1 – выработка (штрек); 2 – стенка выработки; 3 – подошва выработки; 4 – кровля выработки; 5 – горизонтально-ориентированные сейсмоприемники на штырях; 6 – линия пунктов приема; 7 – пункты возбуждения (удары в горизонтальной плоскости); 8, 9 – соответственно нижняя и верхняя линии пунктов возбуждения; 10 – направление распространения поперечных волн (показано упрощенно, фактически поперечные волны распространяются радиально по отношению к оси направленности источника); 11 – направление прихода отраженных поперечных волн к линии приема (для случая субгоризонтального геологического строения)

Fig. 1. Scheme of performing field seismic survey works using a method of shear waves with reflection separation (ARRIH), vertical plane study:

1 – working (bord); 2 – workings' wall; 3 – working's floor; 4 – working's roof; 5 – horizontally-oriented seismic pin receivers; 6 – line of reception points; 7 – source points (shocks in horizontal plane); 8, 9 – lower and upper lines of source points; 10 – direction of shear-wave propagation (shown schematically, as the shear waves propagate radially in relation to the source direction axis); 11 – direction of the reflected shear waves arrival at the reception line (sub-horizontal geological structure case)

предполагает ввод поправок в первичные разрезы и вычитание их друг из друга, в результате чего получается два разреза, один из которых содержит в основном отражения, пришедшие сверху, второй – снизу. Второй способ основан на использовании функции взаимной корреляции и определении направления прихода сигнала по ее сдвигу. Третий способ базируется на пикировании горизонтов и сравнении сдвига пикировок. Основным способом разделения можно считать первый, когда два разреза, полученные для различных линий пунктов возбуждения, вычитаются друг из друга со сдвигом (рис. 2, C, D).

Результаты исследования и их анализ

Еще до выполнения детального анализа влияния вычитания на форму сигнала можно было предположить, что отражения, которые необходимо подавить, будут вычитаться качественно практически независимо от расстояния между линиями пунктов возбуждения. И совершенно иная ситуация будет наблюдаться с выделяемым сигналом: в зависимости от выбранного расстояния между линиями пунктов возбуждения сигнал может быть выделен неудовлетворительно, удовлетворительно, а может быть продублирован, то есть возникнет ложное

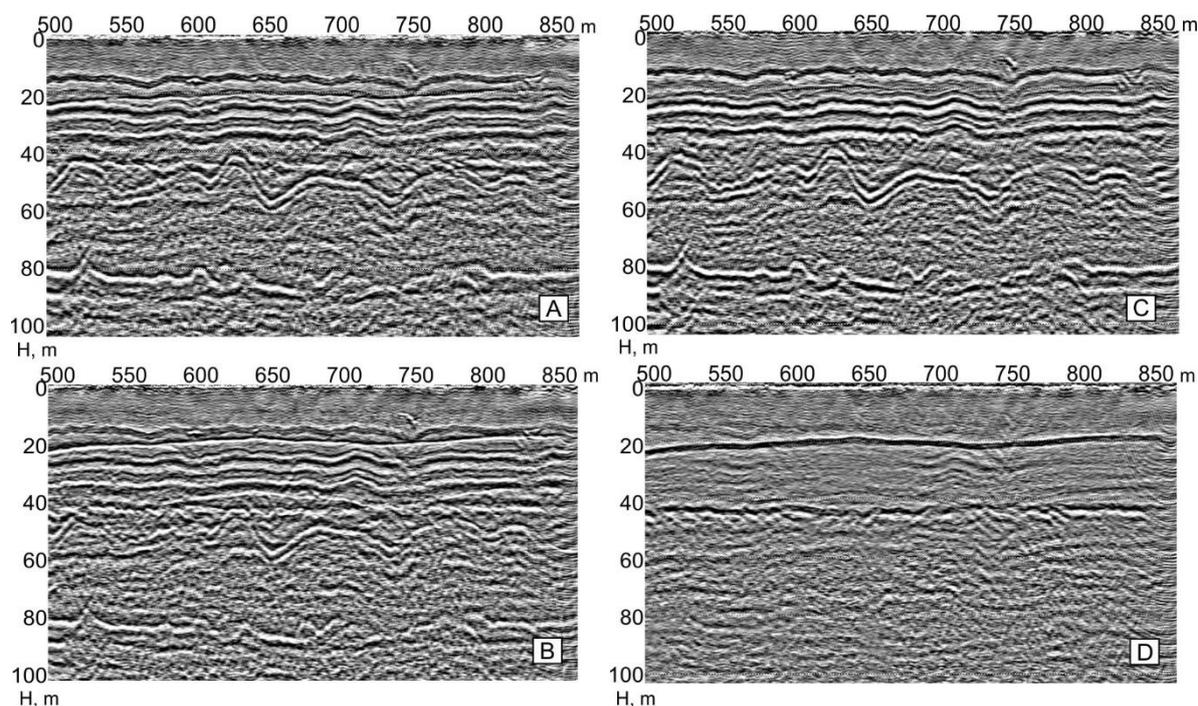


Рис. 2. Получение глубинного разреза способом шахтной сейсморазведки на поперечных волнах с разделением отражений ВНИИ Галургии:

*A, B – глубинные разрезы соответственно для верхней и нижней линий пунктов возбуждения;
C, D – глубинные разрезы соответственно для верхнего и нижнего полупространства*

Fig. 2. Obtaining depth profile by underground seismics method using shear waves with reflection separation (ARRIH method):

*A, B – depth profiles for upper and lower source point lines;
C, D – depth profiles for upper and lower semispace*

отражение с противоположной фазой. Таким образом, в любом случае ожидается искажение выделяемого сигнала.

Для получения полного представления об изменениях формы записи при вычитании двух разрезов друг из друга, а также о принципах выбора расстояния между линиями пунктов возбуждения автором смоделировано несколько ситуаций, в которых используется синтетический отраженный сигнал в виде затухающей синусоиды. Он приходит к линии приема из верхнего и нижнего полупространств, при этом используются различные расстояния между линиями пунктов возбуждения, в результате чего вычитание записей выполняется с тем или иным результатом.

В качестве примера можно привести результаты разделения отражений для модели среды, содержащей пять

отражающих границ выше выработки на расстоянии 4, 10, 14, 21 и 25 м от линии приема и одну границу ниже выработки на расстоянии 9 м от линии приема (рис. 3). Частота затухающей синусоиды для примера, приведенного на рис. 3, равна 500 Гц, расстояние между линиями возбуждения – 1,25 м (что составляет четверть длины волны), скорость распространения поперечных волн – 2500 м/с.

Как и ожидалось, на рис. 3 видно, что подавление сигнала происходит полностью. Так, на рис. 3, C полностью отсутствует отражение, пришедшее снизу, а на рис. 3, D полностью отсутствуют отражения, пришедшие сверху. По-другому обстоят дела с выделяемым сигналом: на рис. 3, C, где выделяется отраженный сигнал сверху, видно, что первый полупериод выделяемого сигнала, приходящего сверху, сохраняется практически без

изменений, а у остальной части сохраняется фаза, но значительно изменяется амплитуда, таким образом, можно говорить об удлинении сигнала после первого вступления. При выделении же отражения, приходящего снизу (см. рис. 3, D),

добавляется полпериода перед первым вступлением отражения, а остальная часть сигнала почти не изменяется, таким образом, можно говорить об удлинении сигнала до первого вступления.

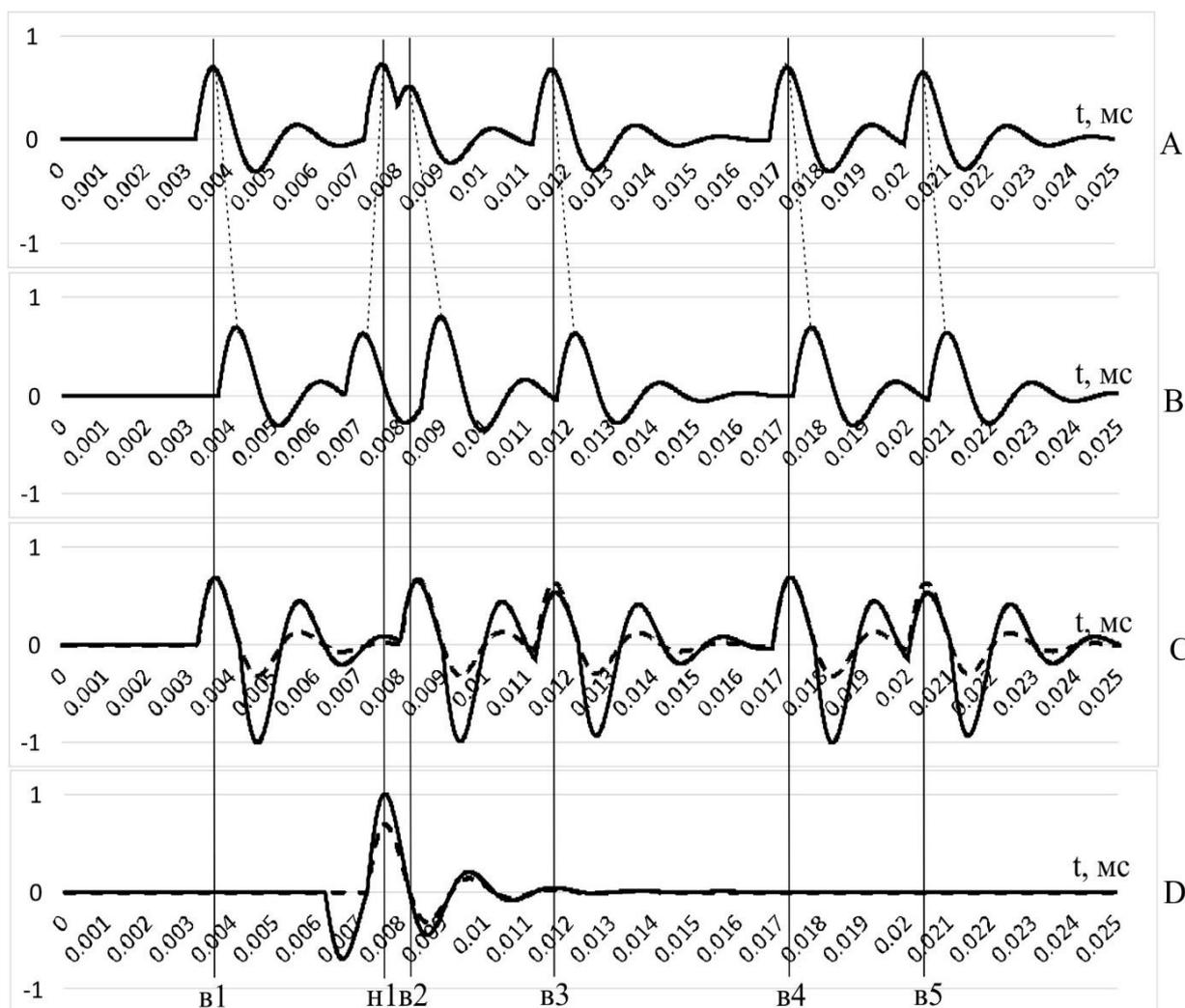


Рис. 3. Результаты разделения отражений, пришедших из разных полупространств на модельном примере для затухающей синусоиды 500 Гц и расстояния между линиями пунктов возбуждения, равного 1,25 м:

A, B – суммарный отраженный сигнал: A – для верхних линий пунктов возбуждения, B – для нижних линий пунктов возбуждения;

C, D – совмещение «идеального» отраженного сигнала (пунктирная линия) и сигнала, получаемого с помощью разделения отражений (сплошная линия):

C – для верхнего полупространства, D – для нижнего полупространства;

v1...v5 – отражения от вышележащих границ и их номер; n1 – отражение от нижележащей границы

Fig. 3. Results of separating the reflections arriving from different semispaces as a model example for damped sinusoid 500 Hz, the distance between the source point lines being 1.25 m:

A, B – composite reflected signal: A – for the upper source point lines; B – for the lower source point lines;

C, D – combination of the "ideal" reflected signal (dash line), and the signal obtained using reflections separation (solid line): C – for the upper semispaces; D – for the lower semispaces;

v1...v5 – reflections from overlying borders, and their numbers, n1 – reflection from the underlying border

Аналогичные расчеты выполнены для других расстояний между линиями пунктов возбуждения – 0,16, 0,32, 0,625 и 5 м, что составляет соответственно 1/32, 1/16, 1/8 и 1 длину волны моделируемого сигнала. По результатам расчетов можно сделать следующие выводы. При расстоянии между линиями пунктов возбуждения меньше 1/4 длины волны неизбежно возникает фазовое и амплитудное искажение сигнала, однако чем меньше это расстояние, тем ближе общая длина сигнала к исходной, или «идеальной». Причем данный эффект может возникнуть только за счет увеличения частоты сигнала, что мы и наблюдаем на рис. 4, А, В, С. Минимальный фазовый сдвиг достигается при расстоянии между линиями пунктов возбуждения, равном 1/4 длины волны, которое в данных условиях равно 1,25 м. При расстоянии же между линиями пунктов возбуждения, равном длине волны, отраженные сигналы дублиру-

ются со сдвигом и в противофазе с исходным сигналом (рис. 4, D).

Обсуждение результатов

По итогам моделирования можно сделать следующие выводы. Если при разделении отражений, приходящих из разных полупространств, необходимо сохранить фазу отраженных сигналов, то нужно выбирать расстояние между линиями пунктов возбуждения, равное 1/4 длине волны. Если необходимо сохранить длину отраженного сигнала, то нужно выбирать расстояние между линиями пунктов возбуждения от 1/16 до 1/8 длины волны, меньшее расстояние приводит к значительному уменьшению амплитуды выделяемого сигнала, большее – к увеличению длины сигнала. Расстояние между линиями пунктов возбуждения больше 1/4 длины волны выбирать крайне не рекомендуется, поскольку разделение отражений в таком случае приводит к дальнейшему удлинению

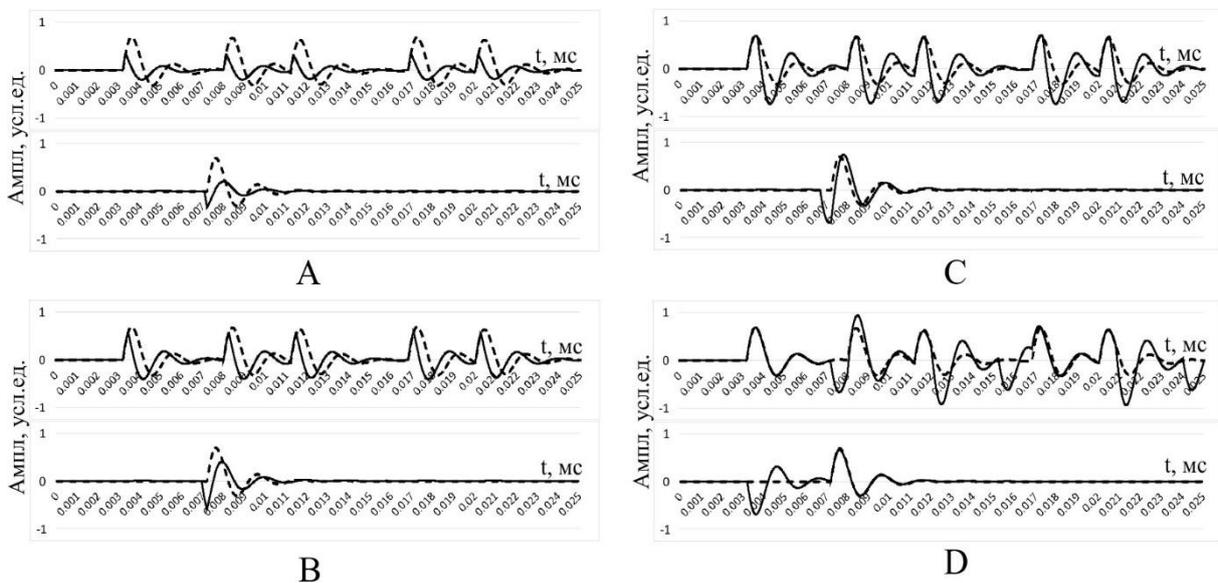


Рис. 4. Результаты разделения отражений, пришедших из разных полупространств на модельном примере для затухающей синусоиды 500 Гц и расстояния между линиями пунктов возбуждения, равного 0,16 м (А), 0,32 м (В), 0,625 м (С) и 5 м (D)
Верхние графики – отражения сверху, нижние – отражения снизу; пунктирная линия – «идеальное» отражение, сплошная – отражение, полученное с помощью разделения сигналов
Fig. 4. Results of separating the reflections arriving from different semispaces as a model example for damped sinusoid 500 Hz and the distance between the lines of source points being 0.16 m (A), 0.32 m (C), 0.625 m (C) and 5 m (D)
Upper graphs – reflections for the upper semispace, lower graphs – reflections for the lower semispace; dash line – “ideal” reflected signal, solid line – signal obtained using reflections separation

выделяемого сигнала вплоть до дублирования, что может привести к грубым ошибкам при интерпретации получаемых разрезов. Спектр сигнала после вычитания изменяется слабо, однако изменения все же есть. Наименьшие изменения происходят при расстоянии между линиями пунктов возбуждения, равном $1/4$ длины волны, а при уменьшении расстояния происходит сдвиг спектра в высокочастотную область, что хорошо связывается с увеличением видимой частоты сигнала.

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что при любом расстоянии между линиями пунктов возбуждения выделяемый сигнал будет претерпевать те или иные искажения. При этом, зная их характер и опираясь на результаты настоящего исследования, можно выбирать такое расстояние, которое обеспечит наилучший результат по разделению отражений в зависимости от решаемой задачи. Полученные результаты планируется подтвердить в ходе специально запланированных для этого опытных работ.

Библиографический список

1. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. 2-е изд., перераб. М.: Эpsilon Плюс, 2013. 368 с.
2. Голубев Б.М. Морфологические особенности складок внутри калийной толщи Верхнекамского месторождения и условия их формирования // Доклады Академии наук СССР. 1972. Т. 204. № 3. С. 671–674.
3. Вагин В.Б. Шахтные сейсмические методы изучения строения массивов соляных пород. Минск: БелНИЦ «Экология», 2010. 188 с.
4. Вагин В.Б., Ефимов А.М., Кулагов Е.В. Исследование и оценка состояния водозащитной толщи над калийными горизонтами геофизическими методами // Горный журнал. 2014. № 2. С. 11–15.
5. Zhou B., Hatherly P., Peters T. Cola seismic surveying over near-surface basalts: experience from Central Queensland, Australia // Geophysics. 2014. Vol. 79. № 2. P. B109–B122.
6. Barthwal H., Van der Baan M. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: application to mining-induced seismicity // Geophysics. 2019. Vol. 84. № 1. P. B41–B57.
7. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: a case history from China // Geophysics. 2016. Vol. 81. № 5. P. B149–B165.
8. Greenhalgh S.A., Masonz I.M., Sinadi-

- novski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure // Geophysics. 2016. Vol. 65. № 6. P. 1908–1919.
9. Бабкин А.И. Пространственные интерференционные системы сейсмоакустических наблюдений в условиях горных выработок калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 1. С. 261–267.
10. Савич А.И., Коптев В.И., Никитин В.Н., Ященко З.Г. Сейсмоакустические методы изучения массивов скальных пород. М.: Недра, 1969. 239 с.
11. Кулагов Е.В. Особенности сейсмических волн, возбуждаемых в массиве соляных пород на Старобинском месторождении // Литасфера. 2012. № 2 (37). С. 105–111.
12. Gendzwill D.J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine // Geophysics. 1993. Vol. 58. № 5. P. 741–748.
13. Tsarev R., Prigara A., Zhukov A. The possibilities of mine seismic survey on shear waves // Engineering and Mining Geophysics 2019: 15th Conference and Exhibition. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901765>.
14. Жуков А.А., Пригара А.М., Царев Р.И., Шусткина И.Ю. Способ шахтной сейсморазведки для изучения особенностей геологического строения ВКМС // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 4. С. 121–136.

References

1. Kudryashov A.I. *Verkhnekamskoe mestorozhdenie solei* [Verkhnekamskoye salt deposit]. Moscow: Epsilon Plyus Publ., 2013, 368 p. (In Russ.).
2. Golubev B.M. Morphological features of the folds within the potash strata of the Verkhnekamskoe deposit, and the conditions of their formation. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1972, vol. 204, no. 3, pp. 671–674. (In Russ.).

3. Vagin V.B. *Shakhtnye seismicheskie metody izucheniya stroeniya massivov solyanykh porod* [Underground seismics methods of studying salt mass structure]. Minsk: BelNITs “Ekologiya” Publ., 2010, 188 p. (In Russ.).
4. Vagin V.B., Efimov A.M., Kulagov E.V. Research and assessment of status of waterproof strata over potassium horizons by geophysical methods.

Gornyi zhurnal [Mining journal], 2014, no. 2, pp. 11–15. (In Russ.).

5. Zhou B., Hatherly P., Peters T. Cola seismic surveying over near-surface basalts: experience from Central Queensland, Australia. *Geophysics*, 2014, vol. 79, no. 2, pp. B109–B122.

6. Barthwal H., Van der Baan M. Passive seismic tomography using recorded microseismicity: application to mining-induced seismicity. *Geophysics*, 2019, vol. 84, no. 1, pp. B41–B57.

7. Jun Lu, Xinghun Meng, Yun Wang. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: a case history from China. *Geophysics*, 2016, vol. 81, no. 5, pp. B149–B165.

8. Greenhalgh S.A., Masonz I.M., Sinadinovski C. In-mine seismic delineation of mineralization and rock structure. *Geophysics*, 2016, vol. 65, no. 6, pp. 1908–1919.

9. Babkin A.I. Space interference systems of seismic-acoustic monitoring in the conditions of potash mine workings. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2010, no. 1, pp. 261–267. (In Russ.).

10. Savich A.I., Koptev V.I., Nikitin V.N.,

Yashchenko Z.G. *Seismoakusticheskie metody izucheniya massivov skal'nykh porod* [Acoustic methods of studying hard rock masses]. Moscow: Nedra Publ., 1969, 239 p. (In Russ.).

11. Kulagov E.V. *Osobennosti seismicheskikh voln, vzbuzhdaemykh v massive solyanykh porod na Starobinskom mestorozhdenii* [Features of seismic waves generated in Starobinskoye deposit salt rock mass]. *Litasfera*, 2012, no. 2 (37), pp. 105–111. (In Russ.).

12. Gendzwill D.J., Brehm R. High-resolution seismic reflections in a potash mine. *Geophysics*, 1993, vol. 58, no. 5, pp. 741–748.

13. Tsarev R., Prigara A., Zhukov A. The possibilities of mine seismic survey on shear waves. 15th Conference and Exhibition “Engineering and Mining Geophysics 2019”. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201901765>.

14. Zhukov A.A., Prigara A.M., Tsarev R.I., Shustkina I.Yu. Method of mine seismic survey for studying geological structure features of Verkhnekamskoye salt deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2019, no. 4, pp. 121–136. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Пригара А.М. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Andrey M. Prigara is the author of the article, holds the copyright and bears responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

Сведения об авторе / Information about the author



Пригара Андрей Михайлович,

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории геофизики,
ВНИИ Галургии,
614002, г. Пермь, ул. Сибирская, 94, Россия,
доцент кафедры геофизики,
Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, г. Пермь, ул. Букирева, 15, Россия,
e-mail: prandra@gmail.com

Andrey M. Prigara,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, Research Laboratory of Geophysics,
ARRIH (All-Russian Research Institute of Hallurgy),
94, Sibirskaia St., Perm, 614002, Russia,
Associate Professor, Geophysics Department,
Perm State National Research University,
15, Bukireva St., 614990, Russia,
e-mail: prandra@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.232.8.004(075.8)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193>

Моделирование системы управления электроприводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях

© А.В. Сорокин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Основным средством механизации горных работ при вскрыше угольных месторождений в регионах Сибири являются шагающие экскаваторы. Надежность функционирования и производительность вскрышных экскаваторов-драглайнов определяют эффективность работы горных предприятий. Проведенные исследования показали, что большой процент выхода из строя механического оборудования угольных разрезов связан с поломками экскаваторов-драглайнов. Ограничение динамических нагрузок в кинематических элементах привода подъема драглайна ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях повышает эксплуатационную надежность. Был проведен анализ отказов механического оборудования экскаваторов ЭШ 20.90. Большая часть поломок горного оборудования связана с выходом из строя тяговых и подъемных механизмов, что показала обработка статистической информации. Количественное проявление отказов драглайнов, работающих в регионах Сибири, продемонстрировало, что необходимо снижать уровень нагрузки на кинематические узлы механической конструкции в зимние месяцы года для повышения их надежности. Также наиболее критичными являются осенние и весенние месяцы, имеющие наибольший градиент суточных температур. В ходе работы была исследована замкнутая система управления электроприводом подъема, реализованная по традиционному принципу. Моделирование показало недопустимый уровень динамических нагрузок, возникающих в кинематической схеме экскаватора, эксплуатирующегося при низких температурах. Разработана система управления привода подъема экскаватора ЭШ 20.90 с управлением момента двигателя в зависимости от скорости и стабилизацией постоянной мощности привода. Результаты исследований показали, что динамические напряжения в механической конструкции экскаватора, приводящие к разрушениям, существенно уменьшаются. Применение предлагаемой системы управления приводом подъема повышает эксплуатационную надежность оборудования. Также обоснована целесообразность применения предлагаемой системы управления для привода подъема экскаваторов-драглайнов.

Ключевые слова: система управления, электропривод, экскаватор, экскаватор-драглайн, снижение динамических нагрузок, ЭШ 20.90

Информация о статье: Дата поступления 2 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 8 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Сорокин А.В. Моделирование системы управления электроприводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 185–193. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193.

Modeling a control system for the lifting drive of ESH 20.90 excavators operating in arduous mining conditions

© Alexander V. Sorokin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Walking excavators (ESH) are the main mechanization means when developing coal fields in the regions of Siberia. The operational reliability and in-use performance of overburden dragline excavators determine the mining enterprises' capacity. The previous studies show that a large percentage of the failures of the mechanical equipment used in opencast mining is connected with the draglines. Reduction of the dynamic load in the kinematic elements of the ESH 20.90 lifting drive increases the operational reliability of the excavators operating in arduous conditions. The statistical analysis has shown that most of the excavators' breakdowns are connected with the

failures of their traction and lifting mechanisms. Therefore, to increase the draglines' reliability, it is necessary to limit the load on the kinematic elements of the mechanical structure in the periods of the year with a significant temperature gradient. For this purpose, a standard closed-loop control system of the lifting electric drive has been modelled. The modelling has shown an unacceptable level of the dynamic loads arising in the kinematic elements of the excavators operating at low temperatures. As a result, an advanced lifting drive control system for the ESH 20.90 excavator has been developed. The system allows to control the engine torque by the speed, and to stabilize the sustained power of the drive. The study has shown that the suggested system significantly reduces the dynamic stress in the mechanical elements and therefore, increases the excavator's operational reliability. The application of the developed control system for the lifting drives of dragline excavators has been substantiated.

Keywords: control system, electric drive, excavator, dragline, dynamic load reduction, ESH 20.90

Information about the article: Received April 2, 2019; accepted for publication May 8, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Sorokin A.V. Modeling a control system for the lifting drive of ESH 20.90 excavators operating in arduous mining conditions. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sekcii 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. 2, pp.185–193. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-185-193.

Введение

При разработке месторождений угля в регионах Сибири основным средством механизации работ являются шагающие экскаваторы. Надежность функционирования и производительность вскрышных экскаваторов-драглайнов определяет эффективность работы горных предприятий. Проведенные исследования показали, что 50–70 % отказов выхода из строя механического оборудования угольных разрезов связано с поломками экскаваторов-драглайнов [1–3]. Поэтому разработка системы управления экскаватора, повышающая эксплуатационную надежность, является актуальной задачей.

В работе [4] был предложен способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора, а также устройство для его осуществления. Проведенные исследования данного способа [5] показали его эффективность для снижения динамических нагрузок в металлоконструкциях экскаватора ЭКГ-15. Возможности применения данного способа управления на экскаваторах-драглайнах были отражены в работах [6–10] на примере привода тяги ЭШ 20.90. Данная работа посвящена использованию предлагаемого способа для системы управления электроприводом подъема

экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях.

Материал и методы исследования

В исследовании применен статистический сбор и анализ информации по отказам механического оборудования разреза «Черемховуголь» ООО «Компания «ВостСибУголь»» за десять лет [11]. Обследованию подверглись шесть экскаваторов ЭШ 20.90. Большая часть поломок горного оборудования связана с выходом из строя тяговых и подъемных механизмов, что показала обработка статистической информации. Число поломок редукторов подъема и тяги экскаваторов ЭШ 20.90 в период с 2001 по 2010 г. представлено на рис. 1. Увеличение срока эксплуатации отрицательно сказывается на динамике поломок и приводит к возрастанию их количества, что является очевидным фактом, так как происходит постепенное исчерпание ресурса узлов.

Довольно часто после планового ремонта происходили повторные повреждения редукторов экскаваторов ЭШ 20.90. Было необходимо найти методы повышения эксплуатационной надежности механизмов экскаваторов. Встала задача выявить основные причины отказов оборудования. На основе проведения статистической обработки данных можно

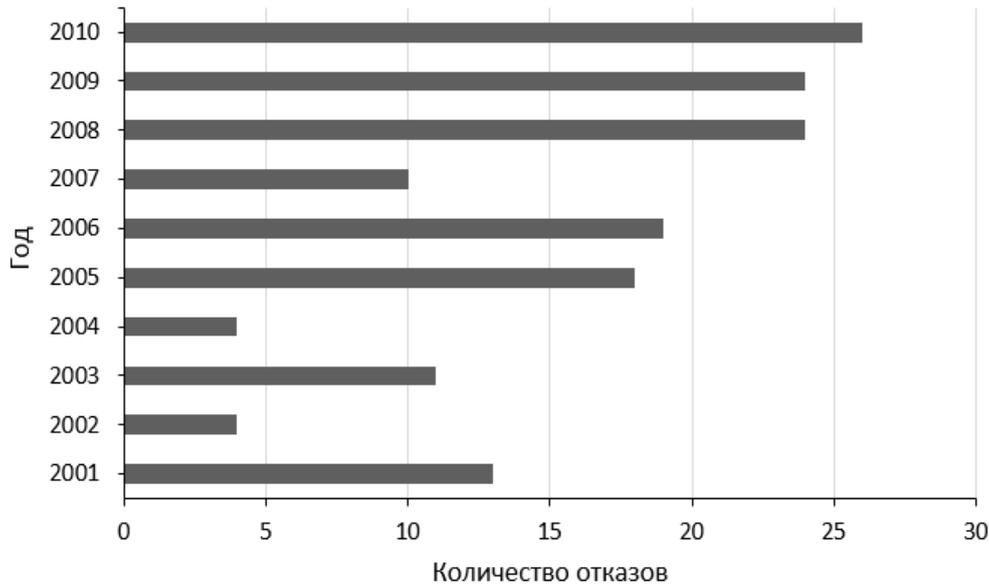


Рис. 1. Число отказов редукторов экскаваторов ЭШ 20.90 в период с 2001 по 2010 г.
Fig. 1. Failure number for ESH 20.90 drive units, 2001–2010

получить распределение отказов механической части экскаваторов ЭШ 20.90 в течение года. На рис. 2 представлено распределение отказов редукторов и металлоконструкций экскаваторов по месяцам.

На рис. 2 изображены два основных потока отказов: первый приходится на позднюю осень, второй – на раннюю весну. Количественное проявление отказов драглайнов, работающих в регионах

Сибири, продемонстрировало, что необходимо снижать уровень нагрузки на кинематические узлы механической конструкции в зимние месяцы года для повышения их надежности. Также наиболее критичными являются осенние и весенние месяцы, имеющие наибольший градиент суточных температур. Объясняется это изменением физико-механических свойств сталей [2].

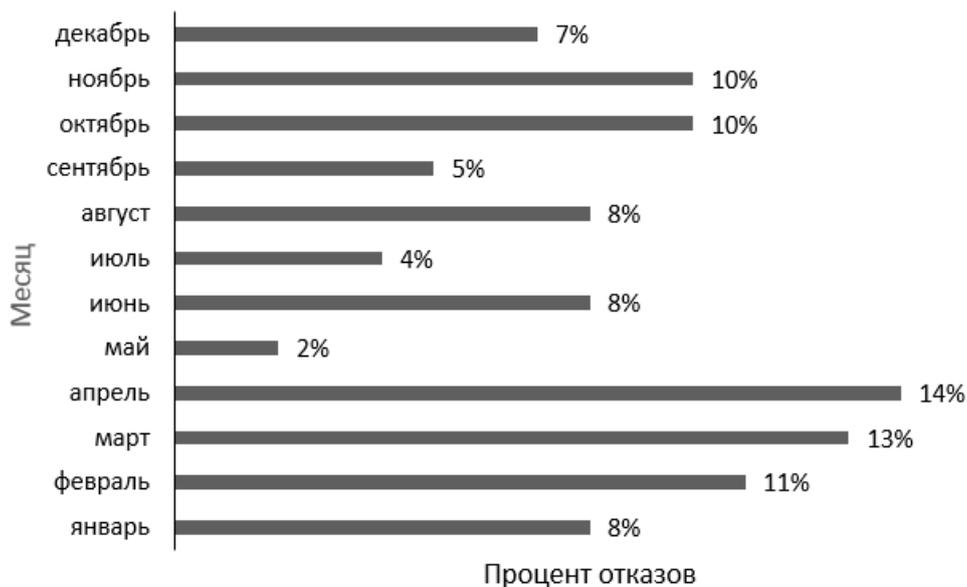


Рис. 2. Распределение отказов механической части экскаваторов ЭШ 20.90 в течение года
Fig. 2. Distribution of mechanical failures for ESH 20.90 during the year

Неплановые ремонты, причиной которых является большое количество отказов редукторов главных приводов экскаваторов ЭШ 20.90, в 2,5–5 раз более длительны и затратны по сравнению с плановыми ремонтами. Анализ поломок драглайнов, работающих в регионах Сибири в тяжелых горнотехнических условиях, показал, что уровень нагрузки на кинематических узлах механической конструкции необходимо снижать не только в зимние месяцы, но и в осенние и весенние месяцы года для повышения их надежности [12–14].

Скорость износа узлов редукторов определяется режимами работы экскаватора. Детали редукторов подвержены усиленному износу в результате опасных нагрузок, возникающих в механизме привода подъема [6].

Предложенный в работе [5] способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора был проверен на системе двухканального управления главных приводов экскаватора ЭКГ-15. Было подтверждено, что изменение режима работы привода экскаватора в зависимости от воздействия неблагоприятных факторов внешней среды позволит снизить уровень динамических нагрузок и за счет этого уменьшить преждевременный износ оборудования экскаватора. Проведено исследование возможности применения данного способа управления на экскаваторах-драглайнах. В источниках [7, 11] была исследована система управления электроприводом тяги экскаватора ЭШ 20.90 в тяжелых горнотехнических условиях. В данной работе выполняется проверка возможности организации системы управления привода подъема по тому же принципу.

Система управления электроприводом экскаватора основана на изменении задания скорости в соответствии с технологией экскавации и одновременном изменении магнитного потока возбуждения

двигателя. Данное управление учитывает ветер и температуру окружающей среды. Система управления регулирует запас кинетической энергии в механической части экскаватора, что дает возможность повышать надежность узлов путем снижения динамических нагрузок.

Регулирование момента двигателя привода подъема экскаватора ЭШ 20.90 изменением возбуждения одновременно с изменением задания скорости позволяет сформировать необходимые механические характеристики и обеспечить работу на малых скоростях с моментами, достаточными для эффективного функционирования. При данных режимах привод работает на скоростях ниже номинальной при работе на естественной механической характеристике и нагрузках, превышающих номинальные, что приводит к уменьшению динамических нагрузок, так как запас кинетической энергии оказывается меньше.

В период сезонной наладки система управления приводом подъема настраивается таким образом, чтобы формировались механические характеристики с ослабленным током возбуждения, представленные на рис. 3.

В начальный момент времени система управления устанавливает номинальный ток возбуждения двигателя привода подъема. В этом случае развиваемый двигателем момент – максимально возможный при работе на малых скоростях, что обеспечивает хорошие пусковые характеристики. При увеличении скорости возбуждение двигателя привода подъема уменьшается, что ведет к уменьшению момента двигателя. Момент двигателя составляет 0,85 от номинального на основной характеристике. Пуск привода подъема осуществляется с меньшими ускорениями, что ведет к меньшим динамическим нагрузкам. При ослаблении магнитного поля при работе на основной характеристике скорость двигателя оказывается ниже

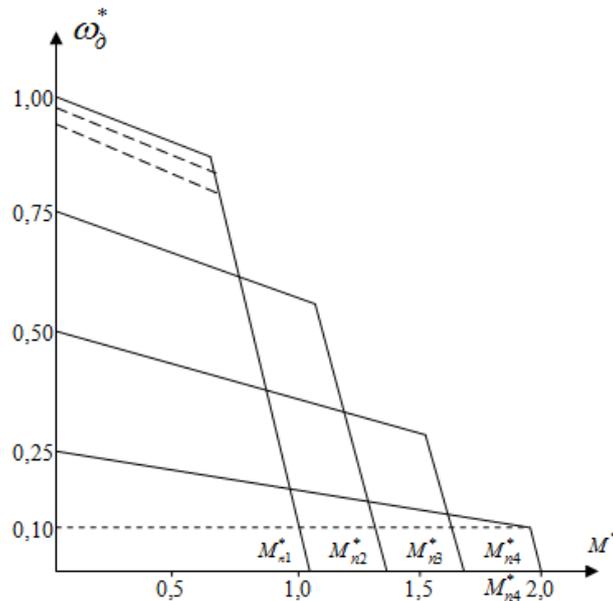


Рис. 3. Механические характеристики привода с системой двухканального управления, представленные в относительных единицах
Fig. 3. Mechanical characteristics of the drive with a dual-channel control system, in relative units

номинальной. Аварийный режим стопорения начинается при пониженных нагрузках и скоростях, что определяет меньший запас кинетической энергии и снижает динамическую нагрузку, оказываемую на кинематику привода. Когда температура окружающей среды опускается ниже нуля градусов, система управления, учитывающая уровень отрицательной температуры и ветровую нагрузку, уменьшает скорость двигателя (пунктирные характеристики), что дополнительно снижает динамические нагрузки при работе экскаватора.

Работоспособность системы управления приводом подъема экскаватора ЭШ 20.90 была проверена с помощью компьютерного моделирования. Были исследованы электромеханические процессы, протекающие в элементах электропривода.

Электропривод подъема экскаватора имеет ряд особенностей, затрудняющих создание математической модели. Влияние на работу экскаватора оказывает также ряд случайных факторов, учет которых возможен только путем вероят-

ностных оценок. Поэтому модель системы управления экскаватора может быть построена только с некоторыми допущениями.

Данная работа посвящена определению динамических нагрузок в рабочем оборудовании экскаватора. Механические части экскаватора являются взаимосвязанной многомассовой системой, но в ходе рассмотрения работы отдельных приводов принимается допущение: многомассовые системы представляются изолированными двухмассовыми.

Математическая модель привода подъема имеет несколько существенных особенностей:

- изменение в процессе работы параметров механической части экскаватора, являющихся нелинейными;
- изменение магнитного поля двигателя постоянного тока, зависящего от скорости;
- формирование экскаваторной характеристики;
- учет уровня температуры окружающей среды и ветровой нагрузки.

Модель описана системой дифференциальных и алгебраических уравнений. Дифференциальные уравнения были записаны в нормальной форме Коши и решены относительно первых производных. Для моделирования использовалось специализированное программное обеспечение DifSis.

Результаты исследования и их анализ

Внешние и управляющие воздействия определяют процессы, протекающие в механической подсистеме. Угловые скорости, положения и упругие моменты элементов системы определяют ее внутреннее состояние.

При учете упругостей в механической подсистеме появляются дополнительные внутренние связи. Адекватным описанием механической части привода тяги экскаватора ЭШ 20.90 является двухмассовое представление. Приведенный коэффициент жесткости между первой и второй массой для привода подъема $C = 1500$ Нм/рад. Математическое описание электропривода подъема экскаватора было приведено в виде пространства состояний и описывалось

системой дифференциальных уравнений 13-го порядка с обычными ограничениями и допущениями, принятыми в электромеханических системах.

Проведенное исследование замкнутой системы управления электропривода подъема, реализованной по классическому принципу, отразило электромеханические процессы, протекающие в элементах экскаватора. Полученные результаты совпали с реальным обследованием экскаватора ЭШ 20.90 разреза «Черемховуголь», что подтвердило адекватность модели.

На рис. 4 и 5 представлен переходной процесс упругого момента привода подъема. В данном режиме происходит процесс увеличения нагрузки при заданной скорости. Данный процесс характеризует обмен энергии в упругих элементах кинематической части привода. Внешняя кривая характеризует процессы, протекающие в приводе с номинальным магнитным потоком двигателя (традиционная система управления), вторая кривая – процессы в приводе с ослабленным магнитным потоком, равным 75 и 50 % от номинального соответственно.

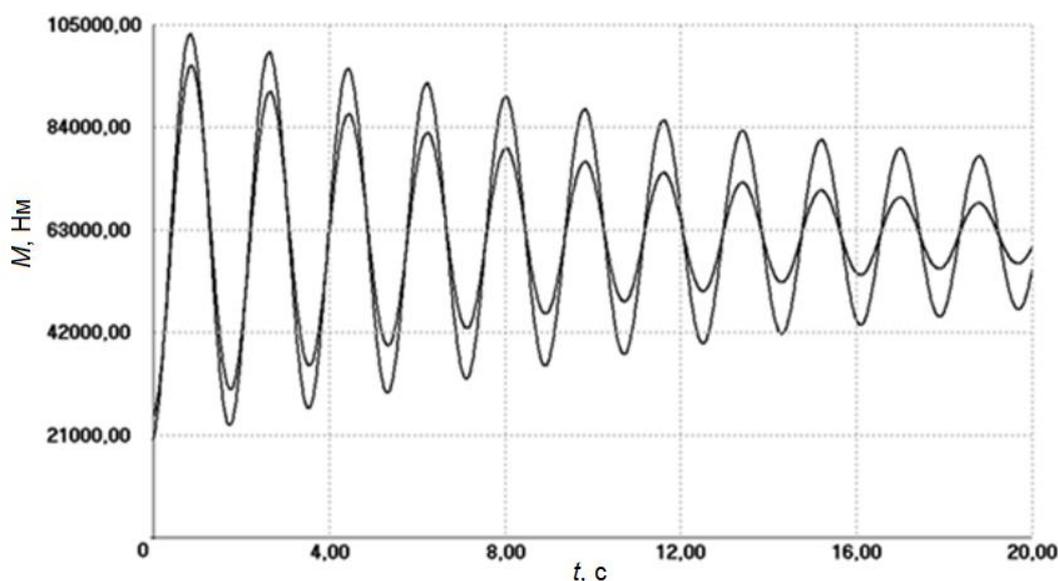


Рис. 4. Упругий момент привода подъема в режиме наброса нагрузки при установившейся скорости с ослаблением магнитного потока до 75 % от номинального

Fig. 4. Moment of elasticity of the lifting drive in the mode of load surge at a steady speed, with the magnetic flux attenuation to 75 % of nominal

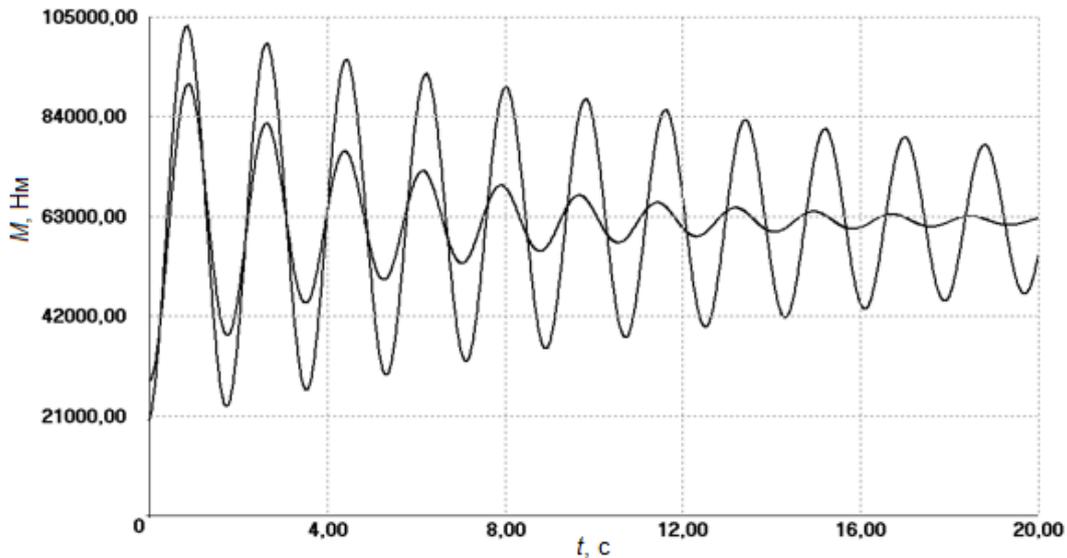


Рис. 5. Упругий момент привода подъема в режиме наброса нагрузки при установившейся скорости с ослаблением магнитного потока до 50 % от номинального
Fig. 5. Moment of elasticity of the lifting drive in the mode of load surge at a steady speed, with the magnetic flux attenuation to 50 % of nominal

Как видно из рисунков, динамический момент имеет колебательный характер с наложенными вынужденными колебаниями, обусловленными двухмассовой системой кинематической схемы электропривода. Он принимает опасное значение, которое может привести к разрушению редуктора привода подъема.

Обсуждение результатов

Проведенные исследования подтвердили предположение о снижении динамических нагрузок в кинематической части привода подъема экскаватора ЭШ 20.90 при ограничении мощности двигателя в осенний, весенний и зимний периоды. Применение предлагаемой системы управления приводом предъема повышает эксплуатационную надежность оборудования.

Хотя длительность цикла экскавации несколько увеличивается, за счет сокращения простоев оборудования, вызванных внеплановыми ремонтами, годовая производительность остается неизменной.

Заключение

Функционирование экскаватора ЭШ 20.90 в тяжелых горнотехнических и климатических условиях предъявляет особые требования к системе управления основными приводами.

Разработанная система управления, ограничивающая динамические нагрузки в элементах электропривода подъема экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях, повышает эксплуатационную надежность, которая определяет общую эффективность работы горных предприятий.

Библиографический список

1. Шадрин А.И., Махно Д.Е., Авдеев А.Н., Макаров А.П. Хладноломкость и хладостойкость металлоконструкций горных машин в условиях Севера. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2010. 232 с.
2. Макаров А.П., Красноштанов С.Ю. Хладноломкость и хрупкость металлов и конструкций карьерных экскаваторов // Известия высших

учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 5. С. 66–69.

3. Махно Д.Е., Красноштанов С.Ю., Ишков А.М., Викулов М.А. Технология и техника горных предприятий Севера. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2015. 216 с.

4. Пат. № 2255184, Российская Федерация, МКИ Е 02 F9/20, Н 02 Р 5/00. Способ управления электроприводом постоянного тока одноковшового экскаватора и устройство для его осуществления / С.С. Леоненко, Д.Е. Махно, А.В. Сорокин, А.С. Леоненко, М.В. Павлов. Заявл. 13.05.2004; опубл. 27.06.2005. Бюл. № 18.

5. Сорокин А.В. Двухканальная система управления приводов экскаваторов, эксплуатирующихся при низких температурах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 2 (42). С. 126–130.

6. Иов И.А., Сорокин А.В., Леоненко А.С. Снижение уровня динамических нагрузок в элементах редуктора привода тяги экскаваторов-драглайнов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 8 (91). С. 22–26.

7. Сорокин А.В. Иов И.А., Леоненко А.С. Исследование системы управления электроприводом тяги экскаватора ЭШ 20.90 при работе в тяжелых горнотехнических условиях // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 7 (102). С. 91–96.

8. Kuznetsov N.K., Makhno D.E., Iov I.A. Damping elastic oscillations of digging mechanism // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87 (2). [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/2/022011/pdf> (17.05.2019).

9. Кузнецов Н.К., Иов И.А., Иов А.А. Разработка электромеханической модели механизма тяги шагающего экскаватора // Вестник Иркут-

ского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 11. С. 53–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-53-66.

10. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Investigation of dynamics of excavator digging mechanism with additional drive // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 193 (3) [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032014/pdf> (17.05.2019).

11. Иов И.А. Исследование надежности редукторов шагающих экскаваторов ЭШ 20.90 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 5 (88). С. 29–33.

12. Broido V.L., Krasnoshtanov S.U. Improvement of operation stability of crucial parts and constructions when repairing dredges and other mining machines exploited in conditions of North // IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327 [Электронный ресурс]. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032012/pdf> (17.05.2019).

13. Пат. № 152922, Российская Федерация, МПК E02F9/20. Устройство управления тяговой лебедкой экскаватора-драглайна / Е.А. Дмитриев, М.В. Корняков, А.И. Найденев, С.Ю. Красноштанов. Заявл. 09.09.2014; опубл. 02.06.2015. Бюл. № 17.

14. Пат. № 167811, Российская Федерация, МПК G02B 21/06. Портативный цифровой микровизор / Е.О. Гурков, А.Н. Шевченко, М.В. Корняков, С.Ю. Красноштанов. Заявл. 28.04.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 1.

References

1. Shadrin A.I., Makhno D.E., Avdeev A.N., Makarov A.P. *Khladnolomkost' i khladostoičnost' metallokonstruktsii gornykh mashin v usloviyakh Severa* [Cold brittleness and cold resistance of mining machines' steel structures in the conditions of the North]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2010, 232 p. (In Russ.).

2. Makarov A.P., Krasnoshtanov S.Yu. Cold brittleness and brittleness of metals and structures of mining excavators. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2010, no. 5, pp. 66–69. (In Russ.).

3. Makhno D.E., Krasnoshtanov S.Yu., Ishkov A.M., Vikulov M.A. *Tekhnologiya i tekhnika gornykh predpriyatii Severa* [Technology and equipment of mining enterprises of the North]. Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University Publ., 2015, 216 p. (In Russ.).

4. Leonenko S.S., Makhno D.E., Sorokin A.V., Leonenko A.S., Pavlov M.V. *Sposob upravleniya elektroprivodom postoyannogo toka odnokovshovogo ekskavatora i ustroystvo dlya ego*

osushchestvleniya [Control method and control device for DC electric drive of single-bucket excavator]. Patent RF, no. 2255184, 2005. (In Russ.).

5. Sorokin A.V. Two-channel system to control excavator drives operating at low temperatures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2010, no. 2 (42), pp. 126–130. (In Russ.).

6. Iov I.A., Sorokin A.V., Leonenko A.S. Dynamic load reduction in dragline gear traction drive elements. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 8 (91), pp. 22–26. (In Russ.).

7. Sorokin A.V. Iov I.A., Leonenko A.S. Study of ЭШ 20.90 excavator traction electric drive control system at arduous mining conditions. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 7 (102), pp. 91–96. (In Russ.).

8. Kuznetsov N.K., Makhno D.E., Iov I.A. Damping elastic oscillations of digging mechanism. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science, 2017, vol. 87 (2). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/87/2/022011/pdf> (accessed 17 May 2019).

9. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Developing electromechanical model of walking dragline traction mechanism. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 11, pp. 53–66. (In Russ.). DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-53-66.

10. Kuznetsov N.K., Iov I.A., Iov A.A. Investigation of dynamics of excavator digging mechanism with additional drive. IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2018, vol. 193 (3). Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/194/3/032014/pdf> (accessed 17 May 2019).

11. Iov I.A. Reliability study of walking dragline ESh 20.90 reduction gear. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 5 (88), pp. 29–33. (In Russ.).

12. Broido V.L., Krasnoshtanov S.U. Improvement of operation stability of crucial parts and constructions when repairing dredges and other mining machines exploited in conditions of North. IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering, 2018, vol. 327. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/3/032012/pdf> (accessed 17 May 2019).

13. Dmitriev E.A., Korniyakov M.V., Naidenov A.I., Krasnoshtanov S.Yu. *Ustroistvo upravleniya tyagovoi lebedkoi ekskavatora-draglaina* [Traction winch control device for dragline excavator]. Patent RF, no. 152922, 2015. (In Russ.).

14. Gurkov E.O., Shevchenko A.N., Korniyakov M.V., Krasnoshtanov S.Yu. *Portativnyi tsifrovoy mikrovizor* [Portable digital microvizor]. Patent RF, no. 167811, 2017.

Критерии авторства / Authorship criteria

Сорокин А.В. написал статью, имеют на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Alexander V. Sorokin is the author of the article, holds the copyright and bears a sole responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторе / Information about the author



Сорокин Александр Васильевич,

кандидат технических наук,
доцент кафедры горных машин и электромеханических систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: sorokinav@bgu.ru

Alexander V. Sorokin,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor, Department of Mining Machines and Electromechanical Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: sorokinav@bgu.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.271

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-194-200>

Горное оборудование для разработки рудных тел малой мощности и технология его применения

© А.Ю. Чебан

Институт горного дела ДВО РАН, г. Хабаровск, Россия

Резюме: Целью данного исследования является создание компактного и мобильного выемочного оборудования для разработки с допустимыми параметрами разубоживания пластов и жил мощностью первые десятки сантиметров с различными углами падения (восстания), которое можно было бы применять для разработки запасов как на карьерах, так и в подземных выработках. В статье анализируются известные технические устройства и технологии выемки минерального сырья, содержащегося в пластах и жилах малой мощности, при ведении открытых и подземных горных работ. Перспективным направлением совершенствования горного оборудования являются геходы, позволяющие создавать значительные напорные усилия на забой за счет использования контуров выработки как опорного элемента для восприятия силовых нагрузок. Автором предлагается конструкция гехода для разработки запасов минерального сырья, содержащегося в рудных телах малой мощности, и технология его применения. Геход представляет собой автономное устройство, состоящее из корпуса с направляющими и гидроцилиндрами, сдвоенных дисковых фрез с опорными листами и толкателями. Геход обеспечивает возможность создания напора сдвоенных фрез на забой за счет распора корпуса в выработке и удаление разрыхленной горной массы посредством системы пневмотранспортирования, что упрощает устройство данного выемочного оборудования в сравнении с известными конструкциями геходов. Энергообеспечение и управление геходом осуществляется от внешнего модуля, располагающегося на уступе карьера или в подземной горной выработке. Компоновка фрезерного рабочего органа гехода позволяет получать выработки прямоугольного сечения, что обеспечивает высокий коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр. Технология добычных работ с применением гехода позволит обеспечить экономически оправданное вовлечение в отработку запасов, находящихся в рудных телах малой мощности.

Ключевые слова: геход, дисковые фрезы, горная масса, гидроцилиндры, система пневмотранспортирования, внешний модуль

Информация о статье: Дата поступления 12 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 16 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Чебан А.Ю. Горное оборудование для разработки рудных тел малой мощности и технология его применения. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 194–200. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-194-200.

Mining machinery for thin bed ore bodies and technology of its application

© Anton Yu. Cheban

Far Eastern branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study has been to create a compact and mobile excavating machine that allows permissible-dilution mining of thin bed strata and seams with different rise angles, and thus, cleaning-up of the mineral reserves both in quarries and underground mines. The article analyzes the known mining machinery and technologies used to extract mineral raw materials from thin bed seams in both opencast and underground mining. Geohods are considered promising mining machines as they make it possible to create significant pressure on the face by using the workings' contour as a support structure for the power loads. The paper presents a geohod structure developed for mining mineral reserves in thin bed ore bodies, and the technology of its application. It is an autonomous device consisting of a frame with guides and hydraulic cylinders, and double disc cutters with supporting sheets and pushers. The double disc cutters of the geohod create pressure on the face due to the frame

expansion in the workings, the loosened rock mass being removed with a pneumatic conveying system. Thus, the machine structure is simplified in comparison with the known geohod structures. The power supply and control of the geohod are realized from an external module located on a quarry face or in an underground mine working. The layout of the geohod mill unit allows rectangular cross-section workings, resulting in a high extraction factor. The extraction technology using geohods provides an economic ground for cleaning-up the reserves of thin bed ore bodies.

Keywords: geohod, disc mills, rock mass, hydraulic cylinders, pneumatic conveying system, external module

Information about the article: Received April 12, 2019; accepted for publication May 16, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Cheban A.Yu. Mining machinery for thin bed ore bodies and technology of its application. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 194–200. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-194-200.

Введение

Постепенно ухудшающиеся условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых, ужесточение требований к экологической и промышленной безопасности горных работ при сохранении приемлемого уровня экономической эффективности производства определяют необходимость создания нового горного оборудования и технологических схем его применения [1–3]. При добыче полезных ископаемых как открытым, так и подземным способом в горном массиве могут оставаться тонкие пласты мощностью первые десятки сантиметров, содержащие запасы ценного минерального сырья. Освоение таких запасов традиционными технологиями с применением буровзрывных работ и относительно крупного горного оборудования для механического рыхления и выемки зачастую оказывается экономически нецелесообразным, так как вместе с рудным телом малой мощности придется вести выемку большого количества вмещающих пород. Это приводит к перемещиванию полезного ископаемого с пустыми породами, что ведет к повышенным удельным расходам на выемку полезного ископаемого и его последующую переработку. В то же время необходимо отметить, что наличие ранее созданной инфраструктуры горного предприятия создает положительные условия для доработки таких запасов.

Состояние вопроса

и постановка проблемы

Для доработки запасов полезных ископаемых в прибортовом массиве карьеров в настоящее время применяют шнекобуровые агрегаты и комплексы глубокой разработки [4–7]. Также известна конструктивная схема выемочного комплекса для разработки (доработки) крутопадающих рудных тел ограниченной мощности [8]. Недостатками вышеперечисленного оборудования являются сравнительно большое поперечное сечение отрываемых данным оборудованием выработок (мощность обрабатываемого рудного тела – от 0,8–1,2 м) и наличие жесткой связи в виде транспортера или стрелы для передачи напорного усилия от комплекса (агрегата) к режущему органу, что ведет к необходимости создания оборудования значительной массы и габаритов.

Обеспечить большие напорные усилия на забой без увеличения массы машины позволяют геходы. Геходом приконтурный массив пород используется как опорный элемент для восприятия силовых нагрузок, возникающих при движении твердого тела в геосреде, во время выполнения основных технологических операций при ведении горных выработок [9, 10]. В настоящее время разрабатываются конструкции геходов для проведения выработок в горных породах крепостью до 5 единиц по шкале

М.М. Протоद्याконова [10]. Известна конструктивная схема винтоповоротного проходческого агрегата (геохода), особенностью работы которого является вращательно-поступательное перемещение по принципу ввинчивания [11]. Геоход представляет собой цилиндрическую оболочку, состоящую из секций, снаружи головной секции установлена винтовая лопасть, а на хвостовой секции закреплены продольные опорные элементы для ее удержания от реактивного проворота. Во время работы исполнительный модуль геохода разрабатывает забой и удерживает его от обрушения, а поступившая внутрь головной секции горная масса захватывается погрузочным модулем. Однако круглое поперечное сечение выработки, выполняемой геоходом данной конструкции, и ее значительный диаметр не позволят эффективно применять это оборудование для разработки тонких пластов полезного ископаемого.

Целью данной работы является создание компактного и мобильного выемочного оборудования для разработки маломощных пластов и жил мощностью первые десятки сантиметров с различными углами падения (восстания) и с допустимыми параметрами разубоживания, которое можно было бы применять для доработки запасов как в карьерах, так и в подземных выработках.

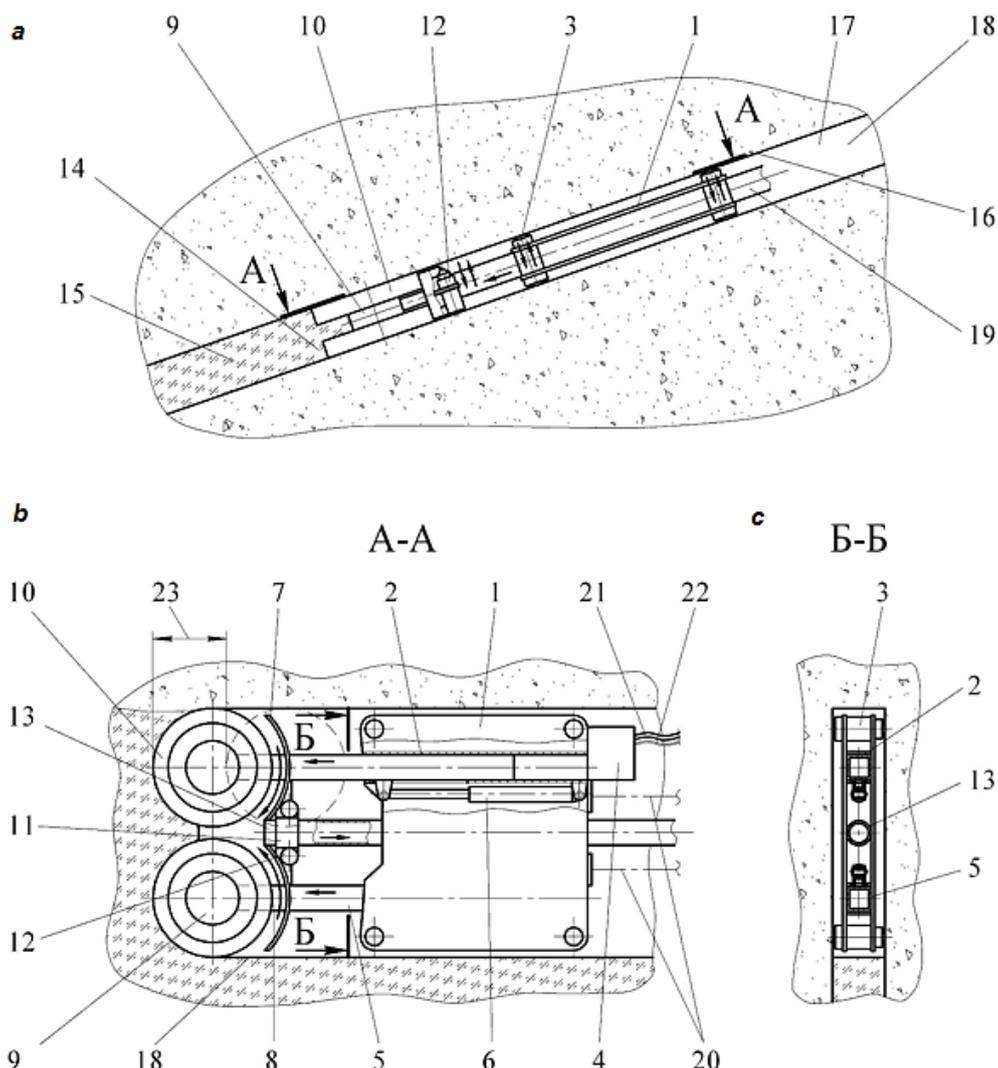
Результаты исследований

В Институте горного дела ДВО РАН разработана конструкция геохода для разработки тонких пластов и технология его применения. В качестве режущего инструмента предлагается использование дисковых фрез, подобный режущий инструмент уже нашел применение в горных машинах в основном для нарезания щелей в массивах горных пород при добыче каменных блоков, а также для ослабления сезонно промерзших мягких пород перед выемкой экскаваторами [12, 13]. Однако конструкция рабочих органов данных машин не позволяет прорезать

щели глубиной более 60–65 % от величины диаметра дисковых фрез (даже в случае их внецентренного зацепления). Также известен угольный комбайн КВЭ, оборудованный комбинированным щелевым рабочим органом, включающим режущие диски (дисковые фрезы) и скалывающие шарошки [14], при работе режущие диски нарезают в массиве вдоль забоя щели с последующим отделением целиков угля скалывающими шарошками. Комбайн работает по струговой технологии. Непосредственное применение для разработки тонких пластов комбайна КВЭ невозможно по причине того, что проектная мощность вынимаемого им пласта составляет 1,5 м.

Предлагаемая конструкция геохода (рисунок) состоит из корпуса 1 с двумя направляющими 2, четырьмя гидроцилиндрами 3 и блока гидрораспределительной аппаратуры 4 с электромагнитным управлением. В направляющих 2 установлены толкатели 5, взаимодействующие с напорными гидроцилиндрами 6. К толкателям 5 жестко прикреплены кожухи 7 и опорные листы 8, на которых установлены гидромоторы 9 и сдвоенные дисковые фрезы 10. Опорные листы 8 соединены между собой поперечиной 11, которая служит для обеспечения устойчивости толкателей 5, а также установки двух гидравлических стопоров 12. Кожухи 7 служат для направления разрыхленной горной массы к всасывающему патрубку 13 системы пневмотранспортирования.

Для создания напора двух сдвоенных дисковых фрез 10, вращающихся в противоположных направлениях, на забой 14 при отработке рудного тела 15 малой мощности гидроцилиндры 3 выдвигаются до упора их штоков в висячий борт 16 выработки 17 и обеспечивают распор корпуса 1 геохода (см. рисунок). При этом напорные гидроцилиндры 6 выдвигают толкатели 5 из направляющих 2. Разрыхленная фрезами 10 горная масса



Геоход для разработки рудных тел малой мощности:
 а – отработка рудного тела малой мощности; б – вид на геоход сверху;
 с – вид на корпус геохода спереди
Geohod for mining thin bed ore bodies:
 а – refining of a thin bed ore body; б – top view of the geohod;
 с – front view of the geohod's frame

перемещается вдоль боковых стенок 18 выработки 17 и кожухов 7 к всасывающему патрубку 13, после чего по гибкому трубопроводу 19 системы пневмотранспортирования подается в накопительный бункер внешнего модуля (на рисунке не показаны).

Внешний модуль, располагающийся на уступе карьера или в подземной горной выработке, также включает силовую установку, гидравлическую насосную станцию, лебедку с канатами

20 и пульт управления. Гидравлическая жидкость под давлением подается от насосной станции к блоку гидрораспределительной аппаратуры 4 геохода по шлангам 21, а сигналы на электромагниты управления поступают по электрическому кабелю 22. Отработка рудного тела 15 осуществляется на величину 23 выдвигания фрез 10, после чего фрезерование останавливается, гидравлические стопоры 12 выдвигаются до упора в висячий борт 16 выработки 17

с обеспечением распора толкателей 5, при этом штоки гидроцилиндров 3 втягиваются. Затем осуществляется втягивание штоков напорных гидроцилиндров 6 с одновременным подтягиванием корпуса 1 к фрезам 10. Распор толкателей 5 снимается, а распор корпуса 1 гидроцилиндрами 3 возобновляется, и цикл фрезерования повторяется вновь. Таким образом, геолод осуществляет напорное усилие на забой 14 посредством взаимодействия с геосредой (выработкой 17). Извлечение геолода из выработки осуществляется посредством лебедки и канатов 20.

Выводы

Технология разработки рудных тел малой мощности с использованием предлагаемого горного оборудования позволяет вести выемку рудных тел мощностью первые десятки сантиметров с минимальным разубоживанием. Представленный в данной статье геолод является компактным и мобильным выемочным

оборудованием, обеспечивающим возможность отработки рудных тел с различными углами падения как при ведении открытых работ, так и в подземных горных выработках. Геолод обеспечивает напор сдвоенных фрез на забой за счет распора корпуса в выработке и удаление разрыхленной горной массы посредством системы пневмотранспортирования, что обеспечивает простоту и функциональность данного выемочного оборудования в сравнении с известными конструкциями геолодов. При этом компоновка фрезерного рабочего органа позволяет получать выработки прямоугольного сечения, что обеспечивает высокий коэффициент извлечения полезного ископаемого из недр. Применение геолода предлагаемой конструкции позволит обеспечить экономически оправданное вовлечение в отработку запасов, находящихся за границами карьера в рудных телах малой мощности.

Библиографический список

1. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015. 804 p.
2. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges // *Software & Systems Modeling*. 2014. Vol. 13. № 3. P. 941–962.
3. Чебан А.Ю. Способ доработки глубокого карьера с применением фрезерных машин // *Маркшейдерия и недропользование*. 2017. № 4. С. 23–29.
4. Perry K.A., Raffaldi M.J., Harris K.W. Influence of highwall mining progression on web and barrier pillar stability // *Mining Engineering*. 2015. Vol. 67. № 3. P. 59–67.
5. Prakash A., John L.P., Pal R.P. Highwall mining in India. Part II. Subsidence management mechanism at mine level // *Journal of Mines, Metals & Fuels*. 2014. Vol. 62. № 9-10. P. 254–262.
6. Dixit S.K., Pradhan M. Highwall mining in India // *Mine Planning and Equipment Selection*. Dresden: Springer International Publishing, 2014. P. 175–187.
7. Нецветаев А.Г., Григорян А.А., Пружина Д.И. Технологии безлюдной добычи угля с

- применением шнекобуровых машин // *Горная промышленность*. 2015. № 2 (120). С. 60–63.
8. Чебан А.Ю. Способ и оборудование для открытой разработки маломасштабных крутопадающих месторождений // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2017. Т. 15. № 3. С. 18–23. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>.
9. Ананьев К.А., Аксенов В.В., Хорешок А.А., Ермаков А.Н. Выбор принципиальной компоновочной схемы барабанных исполнительных органов разрушения забоя для геолодов // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 11. С. 141–143.
10. Аксенов В.В., Хорешок А.А., Ананьев К.А., Ермаков А.Н. Определение силовых и кинематических параметров исполнительных органов геолода методом имитационного моделирования // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2016. № 1 (113). С. 77–82.
11. Аксенов В.В., Ефременков А.Б., Бегляков В.Ю., Бурков П.В., Блащук М.Ю., Сапожкова А.В. Компоновочные решения машин для проведения горных выработок на основе геовинчестерной технологии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2009. № 1. С. 251–259.

12. Чебан А.Ю. Совершенствование техники и технологий безвзрывной разработки горных пород: монография. Хабаровск: Изд-во ИГД ДВО РАН, 2017. 260 с.

13. Чирков А.С. Добыча и переработка строительных горных пород. М.: Изд-во МГГУ, 2005. 623 с.

14. Дмитрак Ю.В., Картавый А.Н., Картавый Н.Г., Серов В.А. Разработка малозахватных рабочих органов выемочных агрегатов типа ВСА для маломощных угольных пластов // Горное оборудование и электромеханика. 2012. № 7. С. 2–7.

References

1. Jarvie-Eggart M.E. Responsible mining: case studies in managing social & environmental risks in the developed world. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2015, 804 p.

2. Frank U. Multi-perspective enterprise modeling: foundational concepts, prospects and future research challenges. *Software & Systems Modeling*, 2014, vol. 13, no. 3, pp. 941–962.

3. Cheban A.Yu. Method of developing deep-career with application of milling machines. *Marksheideriya i nedropol'zovanie* [Mine surveying and subsurface use], 2017, no. 4, pp. 23–29. (In Russ.).

4. Perry K.A., Raffaldi M.J., Harris K.W. Influence of highwall mining progression on web and barrier pillar stability. *Mining Engineering*, 2015, vol. 67, no. 3, pp. 59–67.

5. Prakash A., John L.P., Pal R.P. Highwall mining in India. Part II. Subsidence management mechanism at mine level. *Journal of Mines, Metals & Fuels*, 2014, vol. 62, no. 9-10, pp. 254–262.

6. Dixit S.K., Pradhan M. Highwall mining in India. Mine Planning and Equipment Selection. Dresden: Springer International Publishing, 2014, pp. 175–187.

7. Netsvetaev A.G., Grigoryan A.A., Pruzhina D.I. Unmanned technologies of coal mining using augering machines. *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry], 2015, no. 2 (120), pp. 60–63. (In Russ.).

8. Cheban A.Yu. Method and equipment for opencast mining of small steeply dipping deposits. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2017, vol. 15, no. 3, pp. 18–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2017-15-3-18-23>.

9. Anan'ev K.A., Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Ermakov A.N. The choice of geohod's drum cutter fundamental design. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2014, no. 11, pp. 141–143. (In Russ.).

10. Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Anan'ev K.A., Ermakov A.N. Estimation of force and kinematic parameters of cutting drums of geokhod. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kuzbass State Technical University], 2016, no. 1 (113), pp. 77–82. (In Russ.).

11. Aksenov V.V., Efremenkov A.B., Beglyakov V.Yu., Burkov P.V., Blashchuk M.Yu., Sapozhkova A.V. Layout solutions for mining machinery based on screw drilling technology. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2009, no. 1, pp. 251–259. (In Russ.).

12. Cheban A.Yu. *Sovershenstvovanie tekhniki i tekhnologii bezvzryvnoi razrabotki gornykh porod* [Improvement of machinery and technology for non-explosive rock excavation]. Khabarovsk: Mining Engineering Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017, 260 p. (In Russ.).

13. Chirkov A.S. *Dобыча и переработка строitel'nykh gornykh porod* [Mining and processing of rocks for construction]. Moscow: Moscow State Mining University Publ., 2005, 623 p. (In Russ.).

14. Dmitrak Yu.V., Kartavyi A.N., Kartavyi N.G., Serov V.A. Development of small dredging coverage milling cutters of aggregates type VSA for girde coal layers. *Gornoe oborudovanie i elektromekhanika* [Mining Equipment and Electromechanics], 2012, no. 7, pp. 2–7. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Чебан А.Ю. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Anton Yu. Cheban has written the article, holds the copyright and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of the article.

Сведения об авторе / Information about the author



Чебан Антон Юрьевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геотехнологии и горной
теплофизики,

Институт горного дела ДВО РАН,
680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, 51, Россия,
e-mail: chebanay@mail.ru

Anton Yu. Cheban,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher, Laboratory of Geotechnology and Mining Thermal Physics,
Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,
51, Turgenev St., Khabarovsk, 680000, Russia,
e-mail: chebanay@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 622

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-201-208>

Влияние микрокремнезема на физические свойства тампонажного камня

© Н.А. Буглов, Л.А. Бутакова, Н.С. Буланов

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данной работы является выявление изменений физическо-механических показателей тампонажного камня в зависимости от добавления различных концентраций микрокремнезема разных марок, а также проведение экспериментального сравнения полученных значений с допустимыми параметрами государственного стандарта. Затворение раствора производилось в разных концентрациях. Время ожидания затвердевания цемента перед испытанием составило 48 часов, при этом в первые сутки твердение проходило в формах-балочках, а в дальнейшем – в ванне с водой. Полученный цементный камень был проверен на прочность при сжатии и изгибе с помощью гидравлического пресса, также были произведены замеры водоотделения и растекаемости раствора. На основе экспериментов и анализа полученных данных выведена зависимость влияния микрокремнезема на прочностные свойства тампонажного камня, а также сделаны выводы о допустимом количестве микрокремнезема в цементной смеси. При повышении концентрации микрокремнезема более 8 % цементная смесь перестает соответствовать государственному стандарту, так как становится слишком вязкой, а следовательно, сложнопрокачиваемой. В данной статье рассмотрена возможность улучшения свойств тампонажного камня при строительстве скважин для эксплуатации углеводородных месторождений. Проведен ряд практических опытов по модифицированию тампонажного цемента марки ПЦТ I-50. В качестве добавок был использован микрокремнезем марок МК-65 и МК-85. Выбор данного реагента объясняется тем, что теоретически он способен влиять на прочность и проницаемость цементного камня, а также водоотделение, сульфатостойкость, плотность тампонажного раствора. На основе проведенного исследования сделан вывод о том, что применение данных добавок оказывает воздействие на прочностные свойства камня, но необходимо провести дополнительные эксперименты по увеличению подвижности цементного раствора, в случае успешно подобранной добавки по уменьшению его вязкостных свойств можно добиться получения консистенции, которая удовлетворяла бы производственным требованиям.

Ключевые слова: портландцемент, цементный камень, микрокремнезем, прочностные характеристики, растекаемость, предел прочности

Информация о статье: Дата поступления 15 марта 2019 г.; дата принятия к печати 16 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Буланов Н.С. Влияние микрокремнезема на физические свойства тампонажного камня. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 201–208. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-201-208.

Influence of silica fume on the physical properties of oil-well cement stone

© Nicolai A. Buglov, Lyubov A. Butakova, Nikita S. Bulanov

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of the study has been to define the changes in the physical-mechanical properties of cement stone when adding different-concentration silica fume (SF) of different grades, and to experimentally compare the obtained values with the state standard (GOST) permissible values. Different-concentration cement slurry was mixed, with a 48-hour interval for thickening and solidification before the test. The obtained cement stone was tested for compressive and flexural strength using a hydraulic press; besides, its water separation and spreadability measurements were taken. Based on the experimental data analysis, the dependence of the cement stone's strength properties on silica fume admixture was defined, and conclusions were drawn on the permissible amount of SF in the cement slurry. With the SF concentration exceeding 8%, the cement slurry no longer meets the standard values

and becomes low workable and highly viscous. The article discusses the possibility of improving the cement stone properties in well construction for hydrocarbon deposits development. A series of experiments have been carried out with the purpose to modify the cement of PCT – 1-50 grade with silica fume admixtures of MK-65 and MK-85 grades. The reagent was chosen due to its ability to influence the strength and permeability of the cement stone, as well as the water separation, sulfate resistance, and density of the cement slurry. On the basis of the study done, it has been concluded that the above admixtures do influence the strength properties of the stone; though to increase the flowability of the cement slurry, further experiments are needed. A properly selected admixture can reduce the cement slurry's viscosity, thereby making it possible to achieve the consistency meeting the production requirements.

Keywords: portland cement, cement stone, silica fume, strength characteristics, spreadability, ultimate strength

Information about the article: Received March 15, 2019; accepted for publication April 16, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Buglov N.A., Butakova L.A., Bulanov N.S. Influence of silica fume on the physical properties of oil-well cement stone. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 201–208. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-201-208.

Введение

В нефтегазовых районах со сложными геолого-техническими условиями не всегда удается качественно разобшить пласты друг от друга. Анализ литературных данных [1–2] показывает, что число скважин, в которых возникают осложнения после цементирования, очень велико. Так, например, анализ, проведенный Н.Н. Круглицким и его командой, показал, что из 66 скважин Самолорского нефтяного месторождения в 29 отмечены межпластовые перетоки и межколонные газопроявления [3]. А.И. Булатов и другие [4] приводят случаи низкого качества цементирования скважин с образованием кратеров. Очень часты случаи, когда цементный раствор в затрубном пространстве не поднимается до планируемых высот.

Цементирование обсадных колонн является заключительным и вместе с тем одним из важнейших процессов строительства скважин для разведки и эксплуатации нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений. Большое внимание уделяется поиску тампонажных растворов и смесей, которые наилучшим образом подходят под конкретные горно-геологические условия [5].

Одной из возможных причин некачественного крепления скважин является

использование тампонажного портландцемента. Бездобавочный портландцемент становится непригодным изоляционным материалом для сложных геолого-технических условий и требует доработок.

Материалы и методы исследования

Все показания и значения, использованные в работе, получены экспериментальным путем или с помощью обработки экспериментальных данных.

Результаты исследования и их анализ

Одной из добавок, которая может улучшить физическо-механические свойства камня, является микрокремнезем [6]. Его применение объясняется тем, что он способен влиять на прочность, водоотделение, сульфатостойкость, проницаемость, а также способствует понижению плотности и, как следствие, гидравлического давления [7].

Использование микрокремнезема при тампонировании скважин позволяет добиться:

- уменьшения расхода цемента;
- увеличения прочности как на изгиб, так и на сжатие;
- уменьшения водоотделения;
- увеличения срока службы нефтегазовой скважины.

В лаборатории буровых растворов и крепления скважин был проведен ряд исследований по применению микрокремнезема двух марок – МК-65 и МК-85 – к тампонажному портландцементу марки ПЦТ I-50 (таблица). В ходе эксперимента замерялись такие показатели, как: водоотделение, растекаемость, прочность при изгибе и сжатии.

В результате добавления микрокремнезема в тампонажный портландцемент наблюдается увеличение прочности, которое обусловлено образованием связывающих соединений при реакции с СаО, освобождаемой при гидратации портландцемента. Вследствие этого частицы микрокремнезема присоединяются к каждому зерну цемента, таким образом, цементный раствор начинает уплотняться, а пустоты заполняются продуктами гидратации [8].

При добавлении микрокремнезема в цемент увеличилась прочность при

сжатии. При концентрации 12 % реагента МК-65 данная характеристика возрастает почти на 24 %, что является довольно хорошим показателем (рис. 1). Но при проверке на прочность при изгибе показатели в лучшую сторону кардинально не изменились. Наилучший показатель был достигнут при добавлении 10 % МК-65, в результате прочность выросла всего на 8,5 % (рис. 2). С применением МК-65 прочностные характеристики цемента возросли, но при этом показатель растекаемости сильно снизился. Так, при добавлении 10 % МК-65 цементный раствор не соответствует ГОСТ 26798.1-96, поэтому дальнейшее повышение концентрации МК-65 в ПЦТ I-50 не имеет смысла (рис. 3).

Кроме этого, был проведен ряд экспериментов, связанных с добавлением МК-85 в ПЦТ I-50. Эта добавка также лучше проявила себя в опытах при сжатии. Данный показатель при добавлении

Составы и свойства тампонажных растворов Composition and properties of cement slurries

Состав раствора	Водоотделение, мл	Время ожидания затвердевания, ч	Температура, °С	Соотношение вода / цемент
ПЦТ I-50	1,1	48	22	0,5
ПЦТ I-50 + 5 % МК-65	0,5			
ПЦТ I-50 + 8 % МК-65	0			
ПЦТ I-50 + 10 % МК-65	0			
ПЦТ I-50 + 12 % МК-65	0			
ПЦТ I-50 + 5 % МК-85	0			
ПЦТ I-50 + 8 % МК-85	0			
ПЦТ I-50 + 10 % МК-85	0			

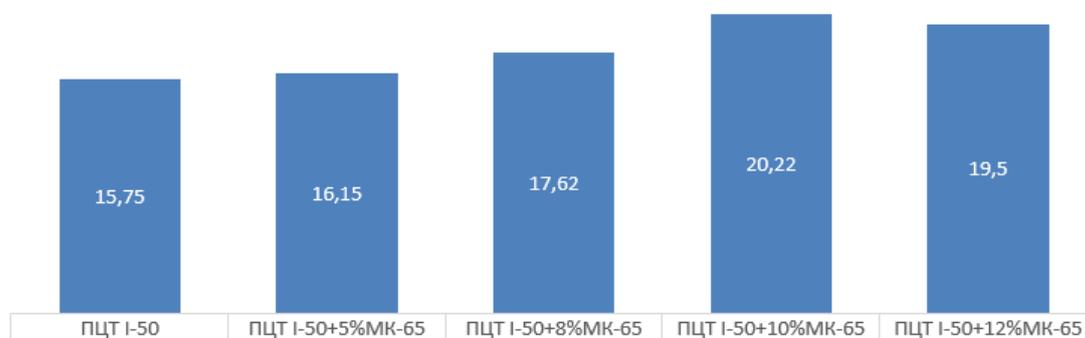


Рис. 1. Показатели предела прочности при сжатии при добавлении МК-65, МПа
Fig. 1. Ultimate compressive strength when adding МК-65, MPa

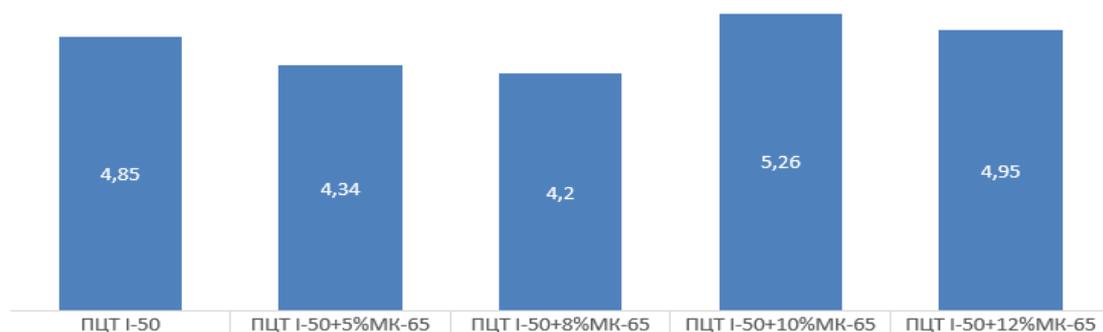


Рис. 2. Показатели предела прочности при изгибе при добавлении МК-65, МПа
 Fig. 2. Ultimate flexural strength when adding MK-65, MPa

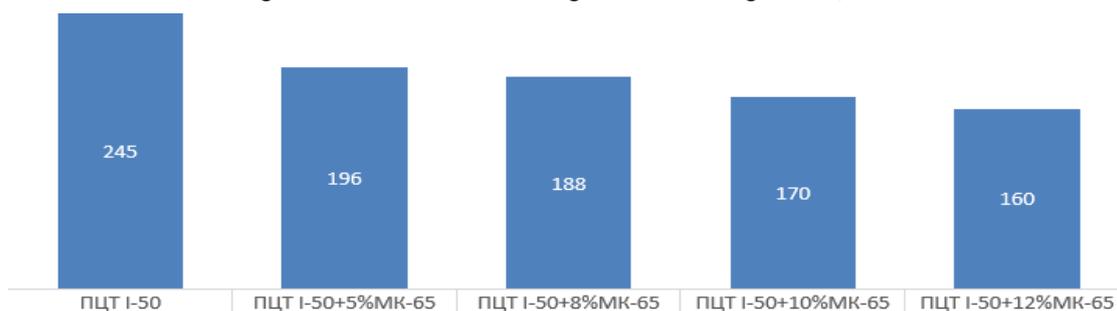


Рис. 3. Показатели растекаемости при добавлении МК-65, мм
 Fig. 3. Spreadability when adding MK-65, mm

10 % МК-85 увеличился по отношению к бездобавочному цементу на 55,8 %, что на 27,1 % больше показателя предела при сжатии с добавлением такой же концентрации МК-65 (рис. 4).

В то же время прочность при изгибе при добавлении 10 % МК-85 относительно бездобавочного ПЦТ I-50 возросла на 15,7 %, этот показатель также превосходит данные результатов, полученные при добавлении МК-65 (рис. 5). Таким образом, можно сказать, что добавление МК-85 существенно увеличивает прочностные характеристики цементного камня по сравнению с добавкой

МК-65, но экспериментальные показатели растекаемости не соответствуют ГОСТ 26798.1-96 [9], поэтому дальнейшее увеличение концентрации МК-85 нецелесообразно, так как необходимо повышать растекаемость цементного раствора путем добавления пластифицирующих добавок (рис. 6).

Процесс заполнения пор способствует значительному понижению пористости цемента. При достаточном добавлении микрокремнезема в портландцемент можно получить непроницаемый цементный камень, таким образом, микрокремнезем может оказывать

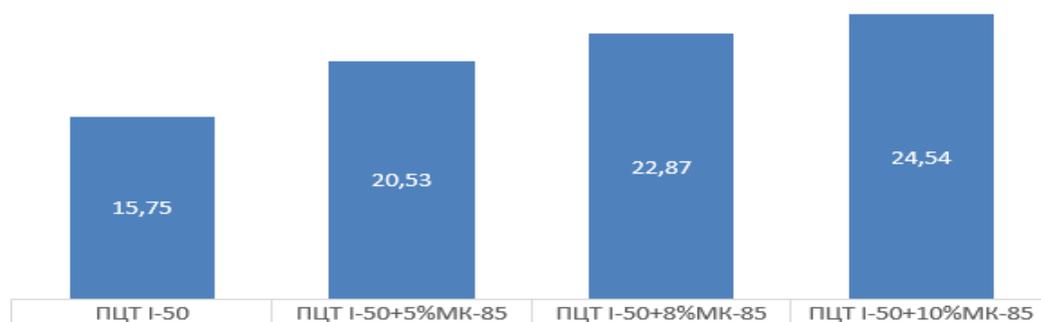


Рис. 4. Показатели предела прочности при сжатии при добавлении МК-85, МПа
 Fig. 4. Ultimate compressive strength when adding MK-85, MPa

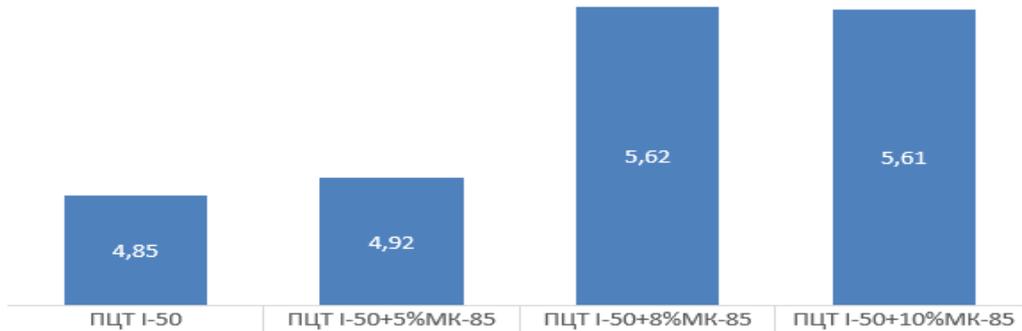


Рис. 5. Показатели предела прочности при изгибе при добавлении МК-85, МПа
Fig. 5. Ultimate flexural strength when adding of МК-85, MPa

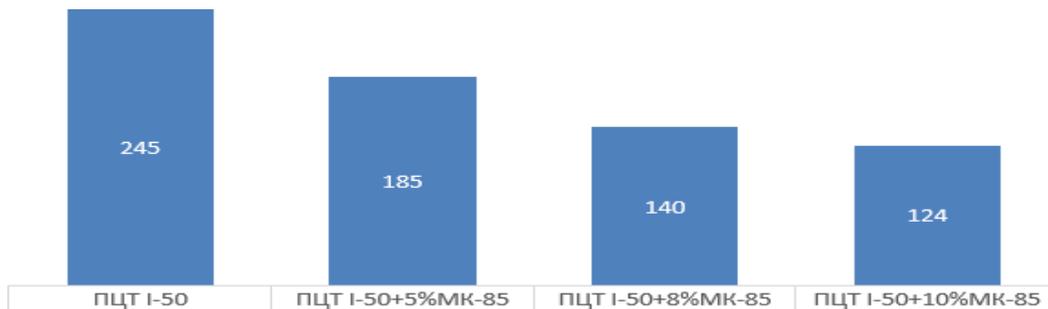


Рис. 6. Показатели растекаемости при добавлении МК-85, мм
Fig. 6. Spreadability when adding МК-85, mm

большее влияние на свойство проницаемости, нежели прочности. Проницаемость камня, содержащего микрокремнезем, будет меньше [10], чем проницаемость камня на основе бездобавочного цемента, обладающего такими же прочностными характеристиками.

Обсуждение результатов

Экспериментальным путем при добавлении МК-65 и МК-85 удалось достигнуть повышения прочностных характеристик ПЦТ I-50, но при этом снизился показатель растекаемости [11]. На основе проведенного исследования сделан вывод, что применение данных добавок возможно, но необходимо провести дополнительные эксперименты по увеличению подвижности цементного раствора. Также выяснилось, что при добавлении микрокремнезема требуется добавление пластифицирующих реагентов [12], способствующих разжижению раствора. Поэтому в процессе тампонирувания нефтегазовых скважин данным цемент-

ным раствором без добавления разжижающих присадок могут возникнуть трудности с прокачкой раствора в затрубное пространство, потому что он обладает низкой подвижностью, а следовательно, ни один насос не сможет прокачать такую высоковязкую консистенцию.

Заключение

Цементирование скважины – один из самых ответственных моментов при строительстве скважины [13], если в ходе этого процесса нарушить технологию или использовать неподходящий цемент, в скором времени скважина может выйти из строя или полностью прекратить свою работу. Недоброкачественный тампонаж скважин может привести к перетоку флюида из продуктивного пласта в пласт с меньшим давлением [14]. Следовательно, необходимо активно работать над модифицированием тампонажных растворов. Исследования в этом направлении являются весьма актуальными.

Библиографический список

1. Круглицкий Н.Н., Гранковский И.Г., Вагнер Г.Р., Детков В.П. Физико-химическая механика тампонажных растворов. Киев: Наукова думка, 1974. 291 с.
2. Самсоненко Н.В., Симонянц С.Л., Самсоненко В.А. О влиянии объемных изменений тампонажных растворов-камней на качество первичного цементирования // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. № 4. С. 19–24.
3. Булатов А.И., Рябченко В.И., Сибирко И.А., Сидоров Н.А. Газопроявления в скважинах и борьба с ними. М.: Недра, 1969. 287 с.
4. Вавржин Ф. Влияние химических добавок на процессы гидратации и твердения цемента: доклады VI Междунар. конгресса по химии цемента. М.: Стройиздат, 1976. 34 с.
5. Каримов Н.Х., Данюшевский В.С., Рахимбаев Ш.М. Разработка рецептур и применение расширяющихся тампонажных цементов. М.: Изд-во ВНИИОЭНГ, 1980. 51 с.
6. Шакирова Э.В., Аверкина Е.В., Сабиров Т.Р., Пырышкина 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.
7. Bayasi Z., Zhou J. Properties of silica fume concrete and mortar // ACI Materials Journal. 1993. Vol. 90 (4). P. 349–356.
8. Bhikshma V., Nitturkar K., Venkatesham Y. Investigations on mechanical properties of high strength silica fume concrete // Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing). 2009. Vol. 10 (3). P. 335–346.
9. Venkatesh Babu D.L., Nateshan S.C. Investigations on silica fume concrete // Indian Concrete Journal. 2004. P. 57–60.
10. Иванов Ф.М. Эффективность использования суперпластификаторов // Бетоны с эффективными модифицирующими добавками. М.: Изд-во НИИЖБ, 1985. С. 3–7.
11. Yamada K.A. Summary of important characteristics of cement and superplasticizers // Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete: proceedings of 9th CANMET/ACI International Conference. Seville, 2009. P. 29–58.
12. Prince W., Espagne M., Aitcin P.C. Ettringite formation: a crucial step in cement superplasticizer compatibility // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Iss. 5. P. 635–641.
13. Grabiec A.M., Piasta Z. Study on compatibility of cement-superplasticiser assisted by multicriteria statistical optimization // Journal of Materials Processing Technology. 2004. Vol. 152. P. 197–203.
14. Holland T.C. Technical Report no. FHWA-IF-05-016 // Silica Fume. User's Manual. 2005. April. 183 p.

References

1. Kruglitskii N.N., Grankovskii I.G., Vagner G.R., Detkov V.P. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika tamponazhnykh rastvorov* [Physico-chemical mechanics of cement slurries]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1974, 291 p. (In Russ.).
2. Samsonenko N.V., Simonyants S.L., Samsonenko V.A. The effect of volume changes of grouting mortars-stones on the quality of casing strings primary cementing in wells. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*, 2017, no. 4, pp. 19–24. (In Russ.).
3. Bulatov A.I., Ryabchenko V.I., Sibirko I.A., Sidorov N.A. *Gazoproavleniya v skvazhinakh i bor'ba s nimi* [Gas show control in wells]. Moscow: Nedra Publ., 1969, 287 p. (In Russ.).
4. Vavrzhin F. *Vliyanie khimicheskikh dobavok na protsessy gidratatsii i tverdeniya tsementa* [Effect of chemical admixtures on cement hydration and hardening]. *Doklady VI Mezhdunar. kongressa po khimii tsementa* [Materials of 4th International Congress on Cement Chemistry]. Moscow: Stroizdat Publ., 1976, 34 p. (In Russ.).
5. Karimov N.Kh., Danyushevskii V.S., Rakhimbaev Sh.M. *Razrabotka retseptur i primeneniye rasshiryayushchikhysya tamponazhnykh tsementov* [Formulation and application of expanding cement cements]. Moscow: All-Russian Research Institute of Organization, Management and Economics of Oil and Gas Industry Publ., 1980, 51 p. (In Russ.).
6. Shakirova E.V., Averkina 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). *Neftgazovoe delo* [Petroleum Engineering], 2018, vol. 16, no. 2, pp. 12–19. (In Russ.).
7. Bayasi Zing, Zhou Jing. Properties of silica fume concrete and mortar. *ACI Materials Journal*, 1993, vol. 90 (4), pp. 349–356.
8. Bhikshma V., Nitturkar K., Venkatesham Y. Investigations on mechanical properties of high strength silica fume concrete. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2009, vol. 10 (3), pp. 335–346.
9. Venkatesh Babu D.L., Nateshan S.C. Investigations on silica fume concrete. *Indian Concrete Journal*, 2004, pp. 57–60.
10. Ivanov F.M. *Effektivnost' ispol'zovaniya superplastifikatorov* [Superplasticizers usage

efficiency]. *Betony s effektivnymi modifitsiruyushchimi dobavkami* [Concretes with Effective Modifying Admixtures]. Moscow: Research, Design and Technology Institute of Concrete and Reinforced Concrete n.a. A.A. Gvozdev Publ., 1985, pp. 3–7. (In Russ.).

11. Yamada K.A. Summary of important characteristics of cement and superplasticizers. Proceedings of 9th CANMET/ACI International Conference "Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete". Seville, 2009, pp. 29–58.

12. Prince W., Espagne M., Aitcin P.C. Ettringite formation: a crucial step in cement superplasticizer compatibility. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, iss. 5, pp. 635–641.

13. Grabiec A.M., Piasta Z. Study on compatibility of cement-superplasticiser assisted by multicriteria statistical optimization. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 152, pp. 197–203.

14. Holland T.C. Technical Report no. FHWA-IF-05-016. Silica Fume. User's Manual, 2005, April, 183 p.

Критерии авторства / Authorship criteria

Буглов Н.А., Бутакова Л.А., Буланов Н.С. написали статью, имеют на нее авторские права и несут ответственность за плагиат.

Nikolai A. Buglov, Lyubov A. Butakova, Nikita S. Bulanov are the authors the article, hold equal copyright and bear equal plagiarism responsibility.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Буглов Николай Александрович,

кандидат технических наук,
заведующий кафедрой нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: bna@istu.edu

Nikolai A. Buglov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of Oil and Gas Engineering Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: bna@istu.edu



Бутакова Любовь Александровна,

аспирант, младший научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории буровых растворов и крепления скважин кафедры
нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: lyubov.elizarova.89@bk.ru

Lyubov A. Butakova,

Post-graduate student, Junior researcher at the Research Laboratory of Drilling
Muds and Well Cementing, Oil And Gas Engineering Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: lyubov.elizarova.89@bk.ru



Буланов Никита Сергеевич,
студент,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: nek103@mail.ru
Nikita S. Bulanov,
Student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: nek103@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 528.946

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-209-220>

Картографирование морфосистем как основа мониторинга геологической среды водохранилищ

© В.П. Ступин

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Исследование направлено на обоснование, разработку и апробацию методологических, методических и технологических принципов геоинформационного картографирования в интересах организации мониторинга геологической среды Ангарских водохранилищ. Методологической основой картографирования является теория морфосистем. Она позволяет выполнить классификацию рельефа и выявить его иерархию на основе его природной делимости на морфоструктурные, бассейновые и склоновые системы. Карты береговых морфосистем служат основой для морфодинамического анализа берегов и определения скоростей их размыва. Информационная основа картографирования морфосистем – автоматизированная база съемочных, картографических и литературно-справочных данных. Основными источниками информации являются материалы дистанционного зондирования и данные полевых инструментальных наблюдений на эталонных участках. Технологическая составляющая – геоинформационное картографирование, позволяющее моделировать и выполнять динамический анализ береговых морфосистем на разных масштабных и временных уровнях. В ходе работы автором было определено понятие «зона влияния водохранилищ» с точки зрения динамики морфосистем. Выполнена классификация берегов водохранилищ в интересах их картографирования. Определены возможности космических снимков для дешифрирования этих морфосистем. Разработано специальное содержание составляемых карт. Создана система условных знаков для карт морфосистем. Составлены авторские карты морфосистем зоны влияния каскада Ангарских водохранилищ. Разработана и апробирована методика морфодинамического анализа берегов водохранилищ. Выполнен ретроспективный и перспективный морфодинамический анализ эталонных участков, выявивший скорости разрушения берегов в прошлом, настоящем и будущем. В результате можно сделать вывод о том, что геоинформационное картографирование и морфодинамический анализ береговых морфосистем зоны влияния водохранилищ позволяют создать основу для оперативного мониторинга геологической среды как каскада крупных искусственных резервуаров Ангары, так и аналогичных водохранилищ.

Ключевые слова: картографирование морфосистем, морфодинамический анализ, мониторинг геологической среды, размыв берегов водохранилищ

Информация о статье: Дата поступления 5 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 7 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Ступин В.П. Картографирование морфосистем как основа мониторинга геологической среды водохранилищ. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 209–220. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-209-220.

Morphosystems mapping as the basis for monitoring water reservoirs' geological environment

© Vladimir P. Stupin

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the study has been to substantiate, develop and test the methodological, methodical and technological principles of geoinformation mapping for monitoring the geological environment of the Angara water reservoirs. The research methodology is based on the concept of morphosystems that makes it possible to classify the relief and identify its dynamic hierarchy at three levels of generalization: morphostructure, basin, and slope. Based on the shoreline morphosystems maps, a morphodynamic analysis of the shores has been conducted, and the erosion rate has been determined. The information component of the morphosystems mapping is a computerized database containing survey, cartographic, and reference data. The main sources of information are remote sensing and field instrumental observation data from the model sites. The technological component is

geoinformation mapping that allows modeling and dynamic analysis of the shoreline morphosystems at different scale and time levels. The 'reservoir influence zone' concept has been defined from the point of view of the morphosystems dynamics. For mapping purposes, the reservoir shores have been classified. The potential use of satellite images for decoding the morphosystems has been evaluated. A specific content of the compiled maps has been created. A system of notation conventions for the morphosystems' maps has been developed. Authoring maps of the influence zone morphosystems for the Angara reservoir cascade have been compiled. A method of morphodynamic analysis of the reservoir shores has been developed and tested. The retrospective and prospective morphodynamic analysis of the model sites have defined the erosion rate in the past, present and future. The results of the study infer that based on the geoinformation mapping and morphodynamic analysis of the shoreline morphosystems of the reservoir influence zone, prompt monitoring of the geological environment can be done for large artificial water reservoirs such as the Angara cascade reservoirs.

Keywords: morphosystems mapping, morphodynamic analysis, geological environment monitoring, reservoir shore erosion

Information about the article: Received April 5, 2019; accepted for publication May 7, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Stupin V.P. Morphosystems mapping as the basis for monitoring water reservoirs' geological environment. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 209–220. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-209-220.

Введение

Одним из важнейших факторов, определяющих состояние геологической среды юга Восточной Сибири, является создание и эксплуатация крупных гидротехнических сооружений на р. Ангаре. В состав Ангарского каскада входят четыре гидроузла: Иркутский, Братский, Усть-Илимский и Богучанский. Сооружение этих гидроузлов привело к образованию грандиозного каскада водохранилищ. Общая площадь затопления составляет почти 10000 км²; протяженность водохранилищ с юга на север – около 1800 км; глубина затопления местами превышает 100 м. Создание такого грандиозного гидроузла привело к быстрому и коренному перераспределению литодинамических потоков и изменению структуры морфогенеза затопленных и прилегающих территорий^{1,2} [1–6].

Затопленные пространства перешли в субаквальный литодинамический режим, а в их пределах произошла смена эрозионно-денудационных процессов на процессы абразионного размыва и аккумуляции. В границах субаэральных затопленных территорий имело место поднятие и смещение местных базисов денудации, изменение уровня грунтовых вод и, следовательно, перестройка литодинамических потоков всего побережья.

Зоны влияния водохранилищ подвержены воздействию динамичных экзогенных процессов, изучение воздействия которых на геологическую среду необходимо как с теоретической, так и с практической точки зрения. Одной из важнейших задач такого рода исследований является организация комплексного оперативного мониторинга геологической среды этих обширных территорий, которая невозможна без теоретического

¹ Тржцинский Ю.Б., Козырева Е.А., Мазаева О.А. Активизация экзогенных геологических процессов под воздействием водохранилищ // О состоянии окружающей природной среды Иркутской области в 2000 году: гос. докл. Иркутск, 2001. С. 188–190. / Trzhtinskii Yu.B., Kozyreva E.A., Mazaeva O.A. Activation of exogenous geological processes under the influence of water reservoirs // On the environmental state of the Irkutsk Region in 2000: State report. Irkutsk, 2001. P. 188–190.

² Тржцинский Ю.Б., Овчинников Г.И. Окончательный отчет по теме: «Мониторинг экзогенных геологических процессов береговой зоны Иркутского и Братского водохранилищ». Т. 1. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2004. 250 с. / Trzhtinskii Yu.B., Ovchinnikov G.I. Exogenous geological processes monitoring for the shoreline of the Irkutsk and Bratsk water reservoirs: Final report. Vol. 1. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS Publ., 2004. 250 p.

обоснования границ и внутреннего деления зоны влияния водохранилищ, а также нанесения их на картографическую основу [7–10].

Целью настоящего исследования стали разработка и апробация методологического, методического и технологического обоснования организации геоинформационного картографического мониторинга геологической среды каскада Ангарских водохранилищ.

Материалы и методы исследования

Пространственной основой и эффективным инструментом мониторинга являются тематические карты, создаваемые на базе трех главных составляющих: методологической, информационной и технологической.

Методология картографирования является его теоретическим стержнем и базируется на концепции морфосистем и принципах морфодинамического анализа, которые постулируют естественную дифференциацию рельефа на трех ступенях иерархии земной поверхности: на уровне морфосистем, бассейнов и склонов [11]. В свою очередь, дефиниция морфосистем зоны влияния водохранилищ позволяет выполнить их районирование и специализированное картографирование, главным образом на двух последних из указанных уровней – бассейновом и склоновом. В бассейнах осуществляется сбор и перераспределение потоков талых, дождевых и подземных вод, а также литодинамических потоков и наносов. Быстрее всего при формировании новых урезов наполняющихся водохранилищ перестраиваются склоновые морфосистемы.

Бассейновые морфосистемы ограничены главным водоразделом и имеют только один выход через тальвег водотока высшего порядка, напрямую открывающийся на водохранилище. Они могут быть осложнены бассейнами низших порядков, тальвеги которых имеют

древовидный рисунок и контролируют нисходящие литодинамические потоки. Элементарные бассейны первого порядка представляют собой конструктивные парагенезы склонов, которые могут расчленять водотоки нулевого порядка – эрозионные борозды, которые лишь повторяют профили материнских склонов, осложняют их и не образуют собственных бассейнов.

Исходя из изложенных выше теоретических принципов, применительно к специфике водохранилищ ангарского каскада нами разработана классификация его береговых морфосистем, а также методика их картографирования и морфодинамического анализа [12]. В основу дефиниции и классификации морфосистем положен метод дискретизации и ранжирования земной поверхности на основе анализа морфологии рельефа и ее связей с факторами морфогенеза. Морфология служит одновременно и индикатором наличия, и основой формирования как природных, так и техногенных морфосистем, характеризующихся целостностью и относительной устойчивостью своей внутренней структуры, обмена веществом и энергией и т. д. [11].

Источниками информации для морфосистемного картографирования служат аэрокосмические снимки, цифровые модели, картографические и литературно-справочные материалы. Их совокупность составляет гибкую и постоянно пополняемую базу исходных данных. Кроме того, в состав указанной базы данных входят составляемые карты на стадии предварительной и промежуточной обработки, архивные снимки, разного рода иллюстративные и другие материалы.

Технологическая составляющая представляет собой географическую информационную систему, так как геоинформационное картографирование позволяет быстро и корректно выполнить анализ и синтез факторов и условий

формирования и развития береговых морфосистем на разных масштабных и временных уровнях.

В настоящее время создание любых картографических моделей действительности сложно представить без применения средств и возможностей цифрового геоинформационного картографирования, которые вывели классическую картографию на новый уровень оперативности, наполненности и качества выходной продукции. Не является исключением и создание картографической основы в интересах инженерно-геологического мониторинга зоны влияния водохранилищ. Технологии с применением геоинформационных систем являются незаменимыми, эффективными и гибкими инструментами для научных, ведомственных, административных и других организаций при выявлении, территориальной привязке, изучении и оценке абразионных, оползневых, гравитационных, карстовых, биогенных и других негативных процессов, протекающих в береговой зоне и за ее пределами, а также при их прогнозе, планировании и управлении мероприятиями по ликвидации последствий этих процессов.

На сегодняшний день разработано много зарубежных и отечественных геоинформационных систем, каждая из которых обладает своими программными и технологическими особенностями со своими достоинствами и недостатками, но которые позволяют получить на выходе вполне кондиционную картографическую продукцию примерно одинакового качества. Одной из лучших программ является модульная полнофункциональная система Esri ArcGIS, технологические возможности которой позволяют успешно выполнять цифровое картографирование любой сложности.

Необходимым условием геоинформационного картографирования морфосистем является наличие цифровой модели рельефа – основного источника о

морфологии и морфометрии земной поверхности. По цифровым моделям рельефа в автоматическом режиме реализуются функции пространственного анализа земной поверхности, выявляются контуры водосборных бассейнов разных порядков, производится построение сети тальвегов и водоразделов, проводятся изогипсы и изобаты, составляются карты крутизны склонов, горизонтальной и вертикальной расчлененности, моделируются зоны подтопления, производятся гидрогеологические расчеты и построения, реализуются возможности построения временных рядов динамики морфосистем и т. д.

Принципы классификации картографируемых берегов и методики картографирования зоны воздействия водохранилищ подстроены под широкое использование материалов дистанционного зондирования, которые являются основным источником информации для последующей интерполяции полевых данных и оперативного картографирования протяженных береговых линий и обширных площадей зон влияния всех водохранилищ Ангарского каскада в условиях ограниченного финансирования и сжатых сроков работ. Поэтому в основу классификации берегов положен индикационный морфотопологический принцип, так как именно морфология и топологические связи (парагенезы, сукцессии) рельефа есть результат прошлого, основа настоящего и предпосылка его будущего развития. Таким образом, рельеф является индикатором природных и техногенных морфосистем, характеризующихся целостностью и относительной устойчивостью своей внутренней структуры, обмена веществом и энергией и т.д.

С учетом сказанного выше под переработкой береговых морфосистем понимается процесс совокупного воздействия на береговую зону различных факторов, проявившихся в результате нарушения динамического равновесия в ходе

формирования молодых водохранилищ и приводящих к перестройке прежде равновесных береговых и прибрежных морфосистем. Процессы формирования и переформирования берегов водохранилищ протекают как в зоне непосредственного контакта водной массы с дном и берегом, так и в пределах прилегающих к берегу субаэральных и субаквальных морфосистем – в зоне опосредованного контакта.

Основными факторами, определяющими границы, тип, облик и интенсивность переработки морфосистем ангарских водохранилищ являются:

- геоморфологический (морфология и топология рельефа);
- инженерно-геологический (устойчивость пород, слагающих территорию, к выветриванию и денудации);
- гидрологический (ветровой и волновой режимы, колебания уровня, стоковые и волновые течения, ледовые условия);
- ландшафтный (тип климата, растительный покров);
- антропогенный (техногенная нарушенность территорий).

Перечисленные факторы положены в основу зонирования морфосистем территории исследований. Разрабатываемая классификация должна быть картографичной, то есть служить основой для последующего картографирования. Рассмотрим подробнее основные принципы дефиниции морфосистем в порядке приоритетности факторов.

Выявление и последующее ранжирование каскадов береговых морфосистем, прежде всего, производится по картам и материалам дистанционного зондирования Земли с использованием морфологических и морфометрических признаков, определяющих динамику берегов, а также по пространственным связям элементов каскада друг с другом (топологии). Затем рассматриваются особенности инженерно-геологических

условий (грунты). Далее учитывается положение береговых морфосистем в определенных географических ландшафтах. Наконец, определяется роль антропогенного воздействия на береговую зону.

Таким образом, приоритет отдается пластике и топологии рельефа, так как именно они в первую очередь определяют направленность морфогенеза данной морфосистемы и закономерности ее структуры нисходящих литодинамических потоков под воздействием силы тяжести. Выделяются следующие типы морфосистем:

1) субаквальные системы подводных склонов и ложа водохранилищ:

- глубже слоя воздействия волн, где преобладает отложение наносов,
- в слое волнового воздействия, где преобладает размыв грунтов;

2) осыхающие морфосистемы, периодически затапливаемые в результате многолетних и сезонных колебаний уровня водохранилища;

3) подтопленные субаэральные морфосистемы:

- приуроченные к склонам, непосредственно опирающимся на урез водохранилищ или на осыхающие абразионные террасы и пляжи,
- приуроченные к выположенным устьевым участкам днищ падей, открывающихся в водохранилище, а также к низким побережьям и островам;

4) морфосистемы опосредованного воздействия, приуроченные к каскадам склонов, опирающимся на контактирующие с акваторией скаты.

Классический каскад береговых склонов представлен на рис. 1. Типы берегов дешифрируются на аэрокосмических снимках по наличию или отсутствию четких индикационных морфодинамических элементов: клифа, бенча, пляжа.

Морфодинамические типы берегов определяются по материалам дистанционного зондирования Земли по соотношению абразионных и аккумулятивных элементов в их пределах.

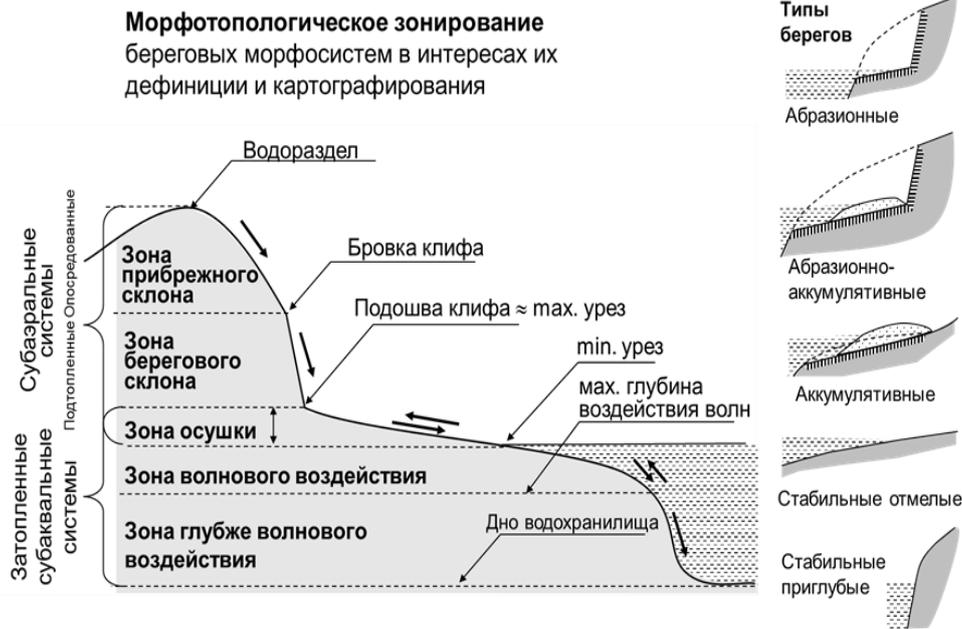


Рис. 1. Каскад береговых морфосистем
Fig. 1. Cascade of shoreline morphosystems

Абразионные берега дешифрируются по наличию четко выраженного клифа и практическому отсутствию пляжа. Они формируются в условиях преобладания размыва береговых склонов над отложением наносов, что возможно при интенсивном волнении в сочетании с постоянным выносом образующихся наносов интенсивными течениями.

Абразионно-аккумулятивный тип берегов развивается в условиях равновесия абразионного и аккумулятивного процесса. Для них характерен полный классический набор береговых элементов: абразионного уступа, абразионной террасы с пляжем, подводной аккумулятивной призмы наносов. Такие берега обычно сложены дисперсными, а также полускальными или сильно разрушенными скальными грунтами.

Аккумулятивные берега сложены рыхлыми наносами, принесенными извне волнами и течениями и отложенными в условиях ветровой тени. Этот тип берегов встречается редко в виде небольших песчаных кос и зачаточных пляжей при отсутствии активных абразионных уступов.

Стабильные берега выглядят практически неизменными процессами абразии и аккумуляции, а на аэрокосмических снимках у них не обнаруживается ни резко очерченная абразионная терраса, ни светлая полоска пляжа. Такие берега приурочены либо к выходам устойчивых к размыву твердых скальных пород, либо к устьям подтопленных речных долин.

Грунты, слагающие береговые морфосистемы, являются важным инженерно-геологическим фактором, определяющим особенности их развития. Классификация по характеру геологического субстрата отражает осложняющие локальные особенности экзогенных геодинамических процессов. Поэтому на картах береговых морфосистем показаны следующие грунты: скальные (в том числе карстующиеся); связные дисперсные (глины и суглинки); несвязные дисперсные (аллювий, коллювий).

Региональные особенности развития береговых морфосистем обуславливаются влиянием климата и растительности. Основными типами ландшафтов, определяющими специфику динамики берегов на исследуемой территории, являются степные, лесные и антропогенные.

Результаты исследований

В результате проведенных исследований была выполнена классификация береговых бассейновых и каскадных склоновых систем по морфотопологическим и морфодинамическим характеристикам на основе индикационных дешифровочных признаков, отражающихся на

космических снимках, оработано содержание морфосистемных карт и составлены авторские карты морфосистем зоны влияния каскада Ангарских водохранилищ, позволяющие организовать мониторинг их геологической среды и выполнить анализ их динамики. Представленные в качестве примера карты (рис. 2, 3)

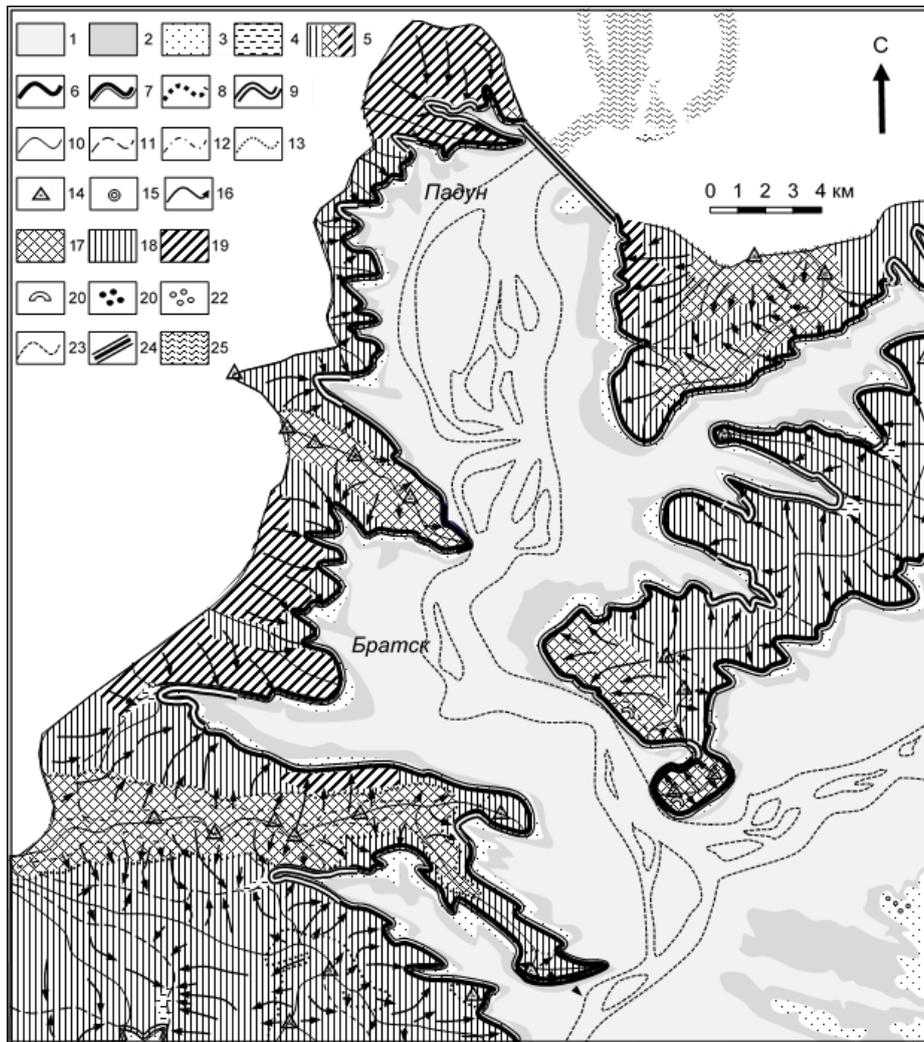


Рис. 2. Морфосистемы участка Братского водохранилища:

1–5 – зоны: 1 – вне воздействия волн, 2 – воздействия волн, 3 – осушки, 4 – влияния, 5 – береговых склонов; 6–9 – берега: 6 – абразионные, 7 – абразионно-аккумулятивные, 8 – аккумулятивные, 9 – стабильные; 10 – водоразделы; 11 – тальвеги; 12 – бровки; 13 – подошвы; 14 – вершины; 15 – донные точки; 16 – линии тока; 17–19 – грунты: 17 – скальные, 18 – полускальные, 19 – техногенные; 20 – оползни; 21 – карст; 22 – золовые формы; 23 – затопленная береговая линия Ангары; 24 – плотина гидроэлектростанции; 25 – русло Ангары ниже плотины

Fig. 2. Morphosystems of the Bratsk reservoir section:

1–5 – zones: 1 – out of wave influence, 2 – wave influence, 3 – drying zone, 4 – influence zone, 5 – shore slopes; 6–9 – shores: 6 – abrasion, 7 – abrasion-accumulative, 8 – accumulative, 9 – stable; 10 – watershed; 11 – thalweg; 12 – edge; 13 – foot; 14 – top; 15 – bottom points; 16 – current lines; 17–19 – soils: 17 – rock, 18 – semi-rock, 19 – anthropogenic; 20 – landslide; 21 – karst; 22 – aeolian form; 23 – submerged Angara coastline; 24 – dam; 25 – Angara channel downstream

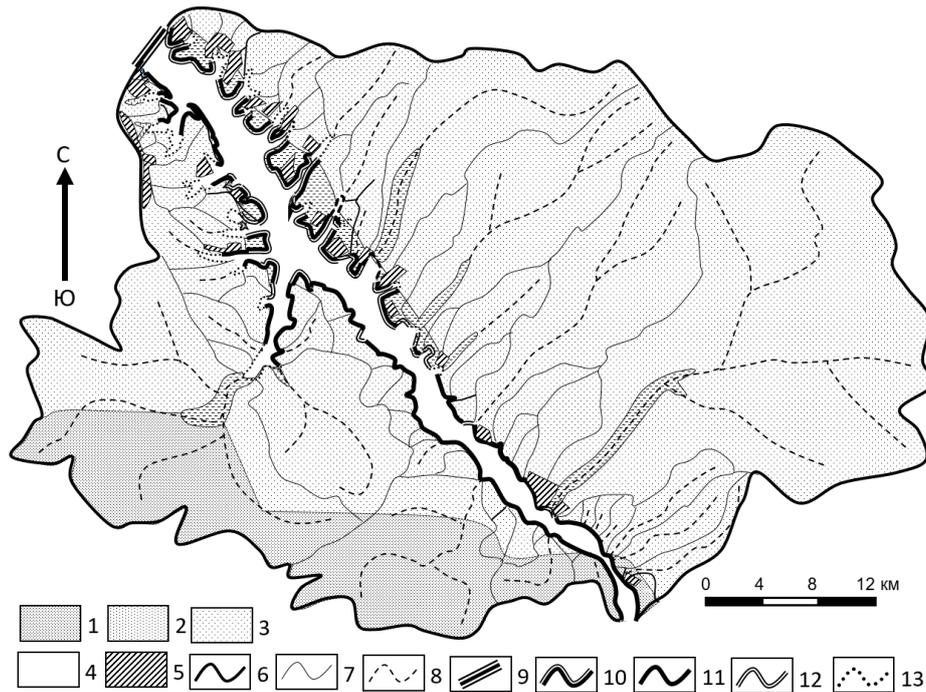


Рис. 3. Морфосистемы Иркутского водохранилища:

1–3 – грунты: 1 – скальные, 2 – полускальные, 3 – дисперсные; 4 – акватория;
 5 – селитебные территории; 6 – главный водораздел; 7 – водоразделы второго порядка;
 8 – тальвеги; 9 – плотина гидроэлектростанции; 10–13 – берега: 10 – абразионные,
 11 – стабильные, 12 – аккумулятивные, 13 – ингрессионные

Fig. 3. Morphosystems of the Irkutsk reservoir:

1–3 – soils: 1 – rock, 2 – semi-rock, 3 – dispersion; 4 – water area;
 5 – residential area; 6 – main watershed; 7 – watersheds of the second order;
 8 – thalwegs; 9 – dam; 10–13 – shores: 10 – abrasion,
 11 – stable, 12 – accumulative, 13 – ingressive

составлены по морфотопологическим признакам с учетом осложняющих факторов в соответствии с вышеизложенной концепцией [12,13].

Принцип морфодинамического анализа разных типов берегов рассмотрим на примере поперечных профилей эталонных участков, расположенных на противоположных берегах в нижней части Иркутского водохранилища (рис. 4, а). Простое сопоставление этих профилей показывает, что берег, сложенный слабыми грунтами, отступал со скоростью 2–3 м в год, а противоположный берег, сложенный прочными грунтами – со скоростями 2–3 см в год. Изменения береговых систем правого берега в плане хорошо видны также из сравнительного анализа положения береговой линии по разновременным космическим снимкам (рис. 4, б).

Важным результатом проведенных исследований стала разработка методики морфодинамического анализа изменений берегов водохранилищ. Для этого были выполнены ретроспективные исследования скорости разрушения берегов на эталонном участке Заярск, расположенном в нижней части Братского водохранилища на его правом затопленном берегу (рис. 5, а), и прогноз размыва на эталонном участке Тушама, расположенном в зоне затопления Богучанского водохранилища на левом берегу Ангары в районе с. Кеуль (рис. 5, б).

Заярский участок интересен тем, что на нем имеют место наиболее благоприятные для размыва берегов инженерно-геологические (грунты) и гидрометеорологические (волны и ветер) условия

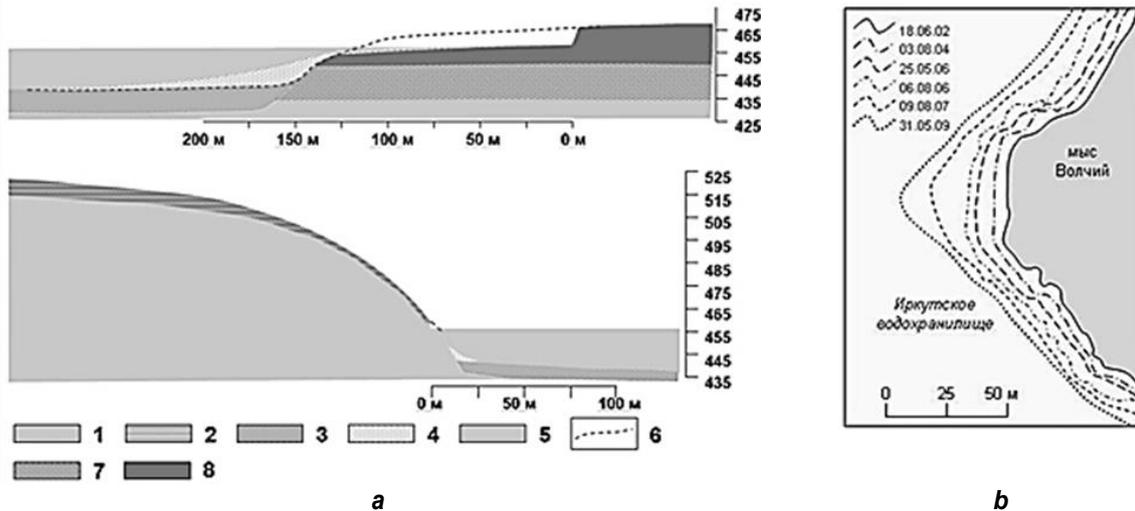


Рис. 4. Анализ береговых морфосистем Иркутского водохранилища:

a – поперечные профили эталонных участков на противоположных берегах в нижней части Иркутского водохранилища; *b* – положения береговой линии по разновременным космическим снимкам 1–6 – профили берега (слева верху – правого, слева внизу – левого): 1 – полускальные грунты коренного берега, 2 – дисперсные грунты склоновых отложений, 3 – аллювий затопленной поймы Ангары, 4 – современные дисперсные абразионные отложения, 5 – водная масса, 6 – исходный профиль берега; 7–8 – отложения террасы Ангары: 7 – аллювиальные, 8 – делювиальные

Fig. 4. Analysis of shoreline morphosystems of the Irkutsk reservoir:

a – transverse profiles of model sites on the opposite shores, lower part of the Irkutsk reservoir; *b* – position of the shoreline by non-simultaneous satellite images 1–6 – shore profiles (left top – right shore, left bottom – left shore): 1 – semi-rock soils of the bedrock shore, 2 – dispersed soils of slope sediments, 3 – alluvium of the flooded Angara bottomland, 4 – recent dispersed abrasion sediments, 5 – water, 6 – initial shore profile; 7–8 – deposits of the Angara terrace: 7 – alluvial, 8 – deluvial

и отмечены самые большие величины размыва берегов по всему Ангарскому каскаду [2, 14]. Для анализа и количественной оценки величины размыва на этом участке был построен поперечный профиль измененного берега.

Средняя скорость размыва на рассматриваемом участке была получена путем деления ширины размывтой береговой полосы на время размыва и составила порядка 3–4 м в год, что является, по-видимому, одной из наивысших скоростей на всем каскаде ангарских водохранилищ.

Выполненная реконструкция скорости размыва на данном эталонном участке цифры была верифицирована и другими способами, а именно: путем анализа разновременных топографических и лоцманских карт и повторными геодезическими съемками [15].

Подобные работы были выполнены также по профилю эталонного участка Тушама, однако не в целях реконструкции произошедшего размыва, а в целях прогноза будущего размыва. Здесь при планируемом 13-метровом подъеме воды подтопляются террасы Ангары, сложенные слабыми дисперсными грунтами, что приведет к дисбалансу литодинамических обстановок берегов и их интенсивному размыву.

Сопоставляя эталонный Тушамский участок с аналогичными по морфологии и инженерно-геологическим условиям эталонными участками уже существующих водохранилищ, нетрудно предположить, что размыв берегов в его пределах составит 2–3 м в год и их отступление по причине достаточного удаления будущего уреза от коренных скальных пород (траппы) будет весьма интенсивным и составит несколько сотен метров.

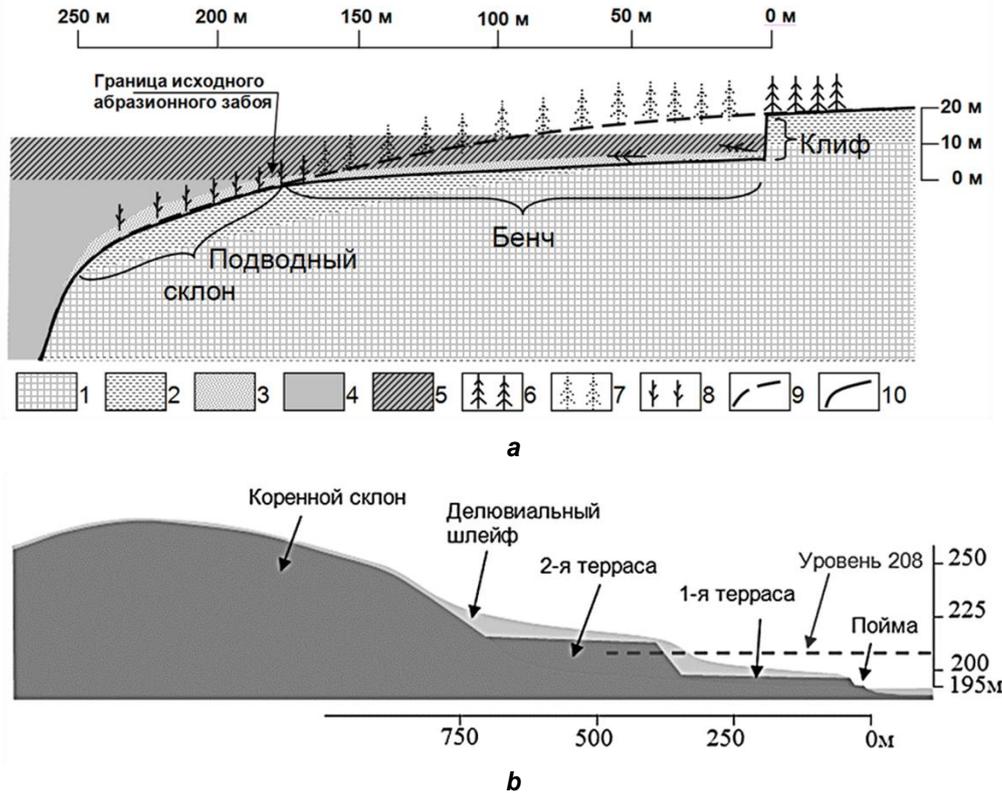


Рис. 5. Морфодинамический анализ береговых морфосистем:

a – ретроспективный анализ размыва берегов Заярского полигона;

b – прогнозный анализ размыва зоны затопления Тушамского полигона

- 1 – полускальные грунты цоколя террасы Ангары; 2 – дисперсные грунты аллювия террасы Ангары и склоновых отложений; 3 – дисперсные грунты наносов водохранилища; 4 – минимальный уровень воды; 5 – максимальный уровень воды; 6 – сохранившиеся деревья; 7 – исчезнувшие деревья; 8 – затопленные деревья; 9 – берег до затопления; 10 – современный берег

Fig. 5. Morphodynamic analysis of coastal morphosystems

a – retrospective analysis of the shore erosion, Zayarsk model site;

b – prospective erosion analysis of the flooded area, Tushama model site

- 1 – semi-rock soils of the Angara terrace basement; 2 – dispersed soils of the alluvium Angara terrace and slope deposits; 3 – dispersed soils of reservoir sediments; 4 – minimal water level; 5 – maximal water level; 6 – survived trees; 7 – vanished trees; 8 – submerged trees; 9 – shore before submersion; 10 – current shore

В целом, обобщая результаты рассмотренного выше морфодинамического анализа, можно констатировать, что скорость размыва берегов, сложенных скальными грунтами, составляет несколько миллиметров в год, полускальными – несколько сантиметров в год, и дисперсными – несколько метров в год.

Следует также отметить, что интенсивность отступления берегов Ангарских водохранилищ сохранится и в обозримом будущем, поскольку морфологическая выраженность абразионного рельефа и

существующие скорости размыва пока не свидетельствуют о затухании этого процесса.

Выводы

Апробирование данных исследований показало, что геоинформационное картографирование зоны влияния водохранилищ на основе концепции морфосистем с использованием материалов дистанционного зондирования Земли может решить следующие вопросы: обеспечение создания специализированной картографической основы для организа-

ции и ведения оперативного мониторинга геологической среды крупных водохранилищ; выполнение морфодинамического

анализа береговых морфосистем, определение скорости разрушения берегов в прошлом, настоящем и будущем.

Библиографический список

1. Братское водохранилище. Инженерная геология территории / отв. ред. М.М. Одинцов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 275 с.

2. Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б. Изменение геологической среды в зонах влияния Ангаро-Енисейских водохранилищ. Новосибирск: Наука, 1999. 254 с.

3. Безруков Л.А., Густокашина Н.Н., Никольский А.Ф., Балыбина А.С. Воздействие Ангарского каскада ГЭС и водохранилищ на климат, хозяйство и население Иркутской области // Проблемы комплексного использования водных ресурсов ангарских водохранилищ: материалы IV науч.-метод. семинара. М., 2000. С. 69–80.

4. Дьяконов К.Н. Влияние крупных равнинных водохранилищ на леса прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 127 с.

5. Кусковский В.С., Маслов В.М., Тржцинский Ю.Б. Проблемы рационального использования береговой зоны Ангаро-Енисейских водохранилищ // Инженерная геология. 1991. № 3. С. 45–53.

6. Кусковский В.С., Овчинников Г.И., Павлов С.Х., Тржцинский Ю.Б., Орехова Е.С., Козырева Е.А. Экологические изменения геологической среды под влиянием крупных водохранилищ Сибири // Сибирский экологический журнал. 2000. № 2. С. 135–148.

7. Межеловский Н.В., Рамм Н.С., Шварев В.В. Аэрокосмический мониторинг геологической среды. М.: Знание, 1988. 64 с.

8. Пластинин Л.А., Гиенко А.Я., Ступин В.П., Олзоев Б.Н., Коптев А.В. Проблемы методологических и методических разработок

регионального мониторинга и экологического прогноза на примере водохранилищ Ангарского каскада // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2010. № 5. С. 105–110.

9. Гиенко А.Я., Гиенко Г.А. Космический мониторинг зоны влияния Богучанской ГЭС на Ангаре. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 164 с.

10. Пластинин Л.А., Ступин В.П. Картографо-космический мониторинг зоны воздействия водохранилищ Ангарского каскада: монография. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2018. 188 с.

11. Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. 256 с.

12. Ступин В.П. Картографирование морфосистем: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. 160 с.

13. Ступин В.П., Пластинин Л.А. Морфодинамическое картографирование типов берегов ангарских водохранилищ по материалам дистанционного зондирования Земли // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2011. № 9 (56). С. 72–78.

14. Литвин В.М., Сараева Е.П., Баженова Н.Н. Оценка интенсивности экзогенных геологических процессов зоны влияния Братского водохранилища // Гидрогеология и инженерная геология Сибири. Новосибирск: Наука, 1990. С. 46–64.

15. Ступин В.П., Кононенко А.В., Пластинин Л.А. Геодезический и картографо-морфодинамический методы в изучении динамики берегов Братского водохранилища // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 12 (71). С. 77–81.

References

1. Odintsov M.M. *Bratskoe vodokhranilishche. Inzhenernaya geologiya territorii* [Bratsk water reservoir. Engineering geology of the territory]. Moscow: ASUSSR Publ., 1963, 275 p. (In Russ.).

2. Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhtsin'skii Yu.B. *Izmenenie geologicheskoi sredy v zonakh vliyaniya Angaro-Eniseiskikh vodokhranilishch* [Change of geological environment in the influence zones of Angara-Yenisey water reservoirs]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1999, 254 p. (In Russ.).

3. Bezrukov L.A., Gustokashina N.N., Nikol'skii A.F., Balybina A.S. *Vozdeistvie Angarskogo kaskada GES i vodokhranilishch na klimat, khozyaistvo i naselenie Irkutskoi oblasti* [The Angara hydropower cascade and reservoirs influence on climate, economy and population of Irkutsk region].

Materialy IV nauch.-metod. seminara "Problemy kompleksnogo ispol'zovaniya vodnykh resursov angarskikh vodokhranilishch" [Materials of the 4th research-and-methodology seminar "Multi-purpose use of water resources of the Angara reservoirs"]. Moscow, 2000, pp. 69–80. (In Russ.).

4. D'yakonov K.N. *Vliyanie krupnykh ravninykh vodokhranilishch na lesa pribrezhnoi zony* [Influence of flat-bottomed water reservoirs on near-shore forests]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975, 127 p. (In Russ.).

5. Kuskovskii V.C., Maslov V.M., Trzhtsin'skii Yu.B. Rational use of Angara-Yenisey water reservoirs' shores. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering Geology World], 1991, no. 3, pp. 45–53. (In Russ.).

6. Kuskovskii V.S., Ovchinnikov G.I., Pavlov S.Kh., Trzhtsinskii Yu.B., Orekhova E.S., Kozyreva E.A. Ecological changes of geological environment under the influence of large reservoirs of Siberia. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2000, no. 2, pp. 135–148. (In Russ.).

7. Mezhelovskii N.V., Ramm N.S., Shvarev V.V. *Aerokosmicheskii monitoring geologicheskoi sredy* [Aerospace monitoring of geological environment]. Moscow: Znanie Publ., 1988, 64 p. (In Russ.).

8. Plastinin L.A., Gienko A.Ya., Stupin V.P., Olzoev B.N., Koptev A.V. Problems of methodological developments in regional monitoring and environmental forecasting: Angara cascade case. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 2010, no. 5, pp. 105–110. (In Russ.).

9. Gienko A.Ya., Stupin V.P., Kononenko G.A. *Kosmicheskii monitoring zony vliyaniya Boguchanskoi GES na Angare* [Space monitoring of the influence zone of Boguchansk hydropower station, Angara river]. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006, 164 p. (In Russ.).

10. Plastinin L.A., Stupin V.P. *Kartografo-kosmicheskii monitoring zony vozdeistviya vodokhranilishch Angarskogo kaskada* [Cartographic-space monitoring of the influence zone of the Angara water reservoir cascade]. Irkutsk: Irkutsk

National Research Technical University Publ., 2018, 188 p. (In Russ.).

11. Lastochkin A.N. *Morfodinamicheskii analiz* [Morphodynamic analysis]. Leningrad: Nedra Publ., 1987, 256 p. (In Russ.).

12. Stupin V.P. *Kartografirovaniye morfosistem* [Morphosystems mapping]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2009, 160 p. (In Russ.).

13. Stupin V.P., Plastinin L.A. Morphodynamic mapping of types of Angara reservoir shores by earth remote sensing data. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2011, no. 9 (56), pp. 72–78. (In Russ.).

14. Litvin V.M., Saraeva E.P., Bazhenova N.N. *Otsenka intensivnosti ekzogennykh geologicheskikh protsessov zony vliyaniya Bratskogo vodokhranilishcha* [Evaluating the intensity of exogenous geological processes in Bratsk water reservoir influence zone]. *Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya Sibiri* [Hydrogeology and engineering geology of Siberia]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1990, pp. 46–64. (In Russ.).

15. Stupin V.P., Kononenko A.V., Plastinin L.A. Geodetic, cartographic and morphodynamic methods in studying Bratsk reservoir banks dynamics. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 12 (71), pp. 77–81. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Ступин В.П. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Vladimir P. Stupin is the author of the article, holds the copyright and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторе / Information about the author



Ступин Владимир Павлович,

доктор технических наук,
профессор кафедры маркшейдерского дела и геодезии,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: Stupinigu@mail.ru

Vladimir P. Stupin,

Dr. Sci. (Eng.),
professor at Mine Surveying and Geodesy Department,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: Stupinigu@mail.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.142

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-221-229>

Оценка эффективности методов рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при анализе глинистых минералов

© Нгуен Нгок Нам^a, Лай Тхи Биск Тхуй^b, Фам Динь Ан^c

^{a,b}Центр геологических испытаний и анализа, г. Ханой, Вьетнам

^cИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данной статьи является оценка эффективности двух методов: рентгеноструктурного анализа (РСА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) при исследовании глинистых минералов. Глинистые минералы имеют маленький размер частиц, поэтому использование РСА и ДСК в исследовании их минерального состава считается наиболее эффективным. В настоящее время качественный анализ некоторых минералов каолиновой группы затруднен, поэтому авторы представляют анализы минерального состава трех различных глинистых грунтов: VN 01 (Вьетнам), Laos 02 (Лаос), NZ 03 (Новая Зеландия). Исследования показывают, что использование метода РСА является эффективным как в качественном анализе, так и в выявлении различий между минералами, однако дифракционный пик каолинита и диккита относительно одинаковый, поэтому опознавание минералов затруднено. При этом метод ДСК легко выявляет пары минералов каолинита и диккита или диккита и галлуазита благодаря различиям эндотермического эффекта. Так как минералы каолинит и галлуазит имеют одинаковый эндотермический эффект 530–590 °С, их распознавание методом ДСК считается трудным. Метод РСА эффективен в качественном анализе глинистых минералов в целом и минералов группы каолинита в частности; этот метод также эффективен при идентификации двух минералов: каолинита и галлуазита, что невозможно сделать с помощью метода ДСК. Однако опознавание двух минералов – диккита и каолинита – методом РСА в некоторых случаях затруднено. Для улучшения эффективности анализа глинистых грунтов для других объектов исследования и оценки качества каолина или очень тонкодисперсного минерала предлагается совместное использование методов РСА и ДСК.

Ключевые слова: метод рентгеноструктурного анализа, метод дифференциальной сканирующей калориметрии, глинистые минералы, кристаллизация, экзотермический эффект, эндотермический эффект

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

Для цитирования: Нгуен Нгок Нам, Лай Тхи Биск Тхуй, Фам Динь Ан. Оценка эффективности методов рентгеноструктурного анализа и дифференциальной сканирующей калориметрии при анализе глинистых минералов. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 221–229. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-221-229.

Effectiveness evaluation for X-ray diffraction and differential scanning calorimetry methods in the study of clay minerals

© Nguyen Ngoc Nam^a, Lai Thi Bich Thuy^b, Pham Dinh An^c

^{a,b}Center for Geological Experiment Analysis, Hanoi, Vietnam

^cIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of the study is to evaluate the effectiveness of X-ray diffraction analysis (XRD) and differential scanning calorimetry (DSC) used in the study of clay minerals. Due to the small particle size of clay minerals, XRD and DSC are considered most effective research methods. As a qualitative analysis for some kaolinite minerals is still a challenge, the authors present the results of a mineral composition analysis for three types of clays,

i.e. VN 01 (Vietnam), Laos 02 (Laos) and NZ 03 (New Zealand) in order to evaluate the effectiveness of the two above-mentioned methods. The results show that the XRD method appears to be relatively effective in a qualitative analysis as well in distinguishing kaolinite and dickite from halloysite. As the diffraction peaks of kaolinite and dickite are quite close, it is difficult to differentiate between the two minerals, while kaolinite-dickite or dickite-halloysite pairs are easily distinguished by DSC due to their different endothermic effects. Kaolinite and halloysite have identical endothermic effects ranging from 530°C to 590°C which makes it difficult to differentiate between them using DSC. XRD method is effective in a qualitative analysis of clay minerals in general, and of kaolinite minerals in particular. It is also effective when distinguishing between kaolinite and halloysite, which is impossible when using DSC; though it is of a limited effectiveness when differentiating dickite and kaolinite. To improve the effectiveness of clay analysis for other research objects and to evaluate the quality of kaolin or other high-disperse minerals, combination of XRD and DSC methods is suggested.

Keywords: X-ray diffraction analysis, differential scanning calorimetry method, clay minerals, crystallization, exothermic effect, endothermic effect

Information about the article: Received February 27, 2019; accepted for publication March 28, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Nguyen Ngoc Nam, Lai Thi Bich Thuy, Pham Dinh An. Effectiveness evaluation of X-ray diffraction and differential scanning calorimetry methods in the study of clay minerals. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 221–229. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-221-229.

Введение

Каолин является не только важным глинистым грунтом при геологических исследованиях, но и необходимым материалом при производстве керамики, красок, резиновых, косметических изделий и т. д. [1–4]. Минералы группы каолинита имеют подобную химическую формулу, твердость, расцветку и прочее.

Если каолинит является распространенным минералом в природной среде, то диккит и накрит встречаются редко, их находят в гидротермальных месторождениях. Галлуазит – относительно чистый минерал и также очень редко встречается в природе [1, 3, 5–9].

Опознавание этих минералов вызвало некоторые трудности как в лабораторных условиях, так и в природной среде из-за того, что они имеют маленький размер частиц. В лаборатории авторы проводили исследование типичных глинистых минералов: каолинита (Вьетнам), диккита (Лаос), галлуазита (Новая Зеландия). С целью оценки эффективности методов исследования перечисленных выше глинистых минералов были использованы два современных метода:

рентгеноструктурный анализ (РСА) и метод дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК).

Методы исследования

Для исследования были выбраны три типичных для этих мест глинистых образца: 1 – глина VN 01 (Вьетнам), 2 – глина Laos 02 (Лаос), 3 – глина NZ 03 (Новая Зеландия). Среди них первый является высококачественным каолином из Вьетнама, содержащим много каолинита; второй – глиной из Лаоса, содержащей много диккита; третий – глиной из Новой Зеландии, содержащей много галлуазита (Новая Зеландия считается ведущей страной в исследовании, добыче и переработке галлуазита).

Перечисленные минералы имеют одинаковый химический состав, расцветку, твердость и т. д., хотя они обладают различными свойствами кристаллической решетки, например, каолинит имеет триклинную сингонию, а диккит – моноклинную сингонию. Кристаллы каолинита и диккита имеют пластинчатую форму, а кристаллы галлуазита – цилиндрическую. Из-за мелкого и раздробленного зерна их трудно дифференцировать и опознавать.

Авторы использовали методы PCA и ДСК для идентификации минералов. Опыт проводился на рентген-дифракционном устройстве Roentgen-D8-Advance и на дифференциальном сканирующем калориметрическом оборудовании STA-PT-1600 в Центре геологических испытаний и анализа (г. Ханой, Вьетнам). Кроме этого, авторы использовали рентгеновский флуоресцентный анализ (РФА) с целью противопоставления результатов. При выполнении анализа методом PCA образец сушится при температуре 40 °С, потом дробится и просеивается до размера менее 0,074 мм. Анализ проводится на устройстве D8 Advance (Bruker) с лучеиспусканием Cu(K α 1,2). Режим работы устройства: напряжение – 35 кВ, сила тока – 35 мА, время остановки – 3 с, диапазонное сканирование – 5–60°. Результаты анализа обрабатывались по программе Diffracplus Evaluation на системных данных ICDD/JCPDS для определения минералов [10].

Анализ ДСК проводился на образце с размером частиц менее 0,074 мм. Образец сушится примерно один час при температуре 60 °С с помощью устройства STA-PT1600 (Linseis), работающего с силой тока 3,5 кВА. Условие проведения опыта: образец массой 200 мг засыпается в фарфоровую чашку и прогревается при температуре 30 °С до 1000 °С в среде N₂, скорость прогрева – 20 °С/мин с эталонным образцом Al₂O₃. Полученные данные обрабатываются с помощью программы LINSEIS/TA-WIN. Эндотермический эффект, полученный на диаграмме ДСК, сравнивался со стандартной термической диаграммой Аужуитнань (2001 г.) и Földvári (2011 г.), что позволило нам определить качественный состав минералов в образце.

Рентгеноструктурный анализ проводился с итоговым образцом. Образец измельчается до размера менее 0,074 мм и сушится при температуре

35–40 °С, затем его перемешивают с поливиниловым спиртом и сжимают в брикет. Для этого была использована машина ARLADVANT' XP (Thermoscientific), работающая с силой тока 30–80 мА и напряжением 30–50 кВ.

Результаты исследования и их обсуждение

На рентгеноструктурной диаграмме видно, что в образце VN 01 кроме типичных дифракционных пиков каолинита 7,19; 3,58; 2,34 Å есть еще иллит с дифракционными пиками (10; 4,48; 3,34 Å). Диккит и каолинит имеют много похожих дифракционных пиков у 7,2; 3,58; 2,32 Å в образце Laos 02. Особенно дифракционные пиками 7,36; 4,44; 3,61 Å характеризуют метагаллуазит или галлуазит 7 Å, с дифракционными пиками легко опознаваем галлуазит по отношению к остальным минералам – каолиниту и диккиту (рис. 1). Результаты метода PCA показывают, что можно легко опознавать галлуазит благодаря тому, что этот минерал имеет специфический дифракционный пик по сравнению с другими минералами.

Результаты анализа показывают, что эндотермический эффект диккита сильно отличается от эффекта каолинита в интервале 500–700 °С (рис. 2). Эндотермический эффект каолинита (VN 01) происходит около 500 °С и достигает максимального значения T_{max} , равного 580 °С. Эндотермический эффект диккита (Laos 02) (см. рис. 2) появился в интервале 600–700 °С, и максимальное его значение приходится на 700 °С. Кроме того, образец NZ 03 содержит много галлуазита, поэтому значение эндотермического эффекта этого минерала меньше, чем у диккита с интервалом 530–590 °С, и максимальное значение T_{max} равно приблизительно 580 °С, что совпадает со значением эндотермического эффекта каолинита. Таким образом, среди трех данных минералов диккит имеет самый явный эндотермический эффект, поэтому он легко опознаваем.

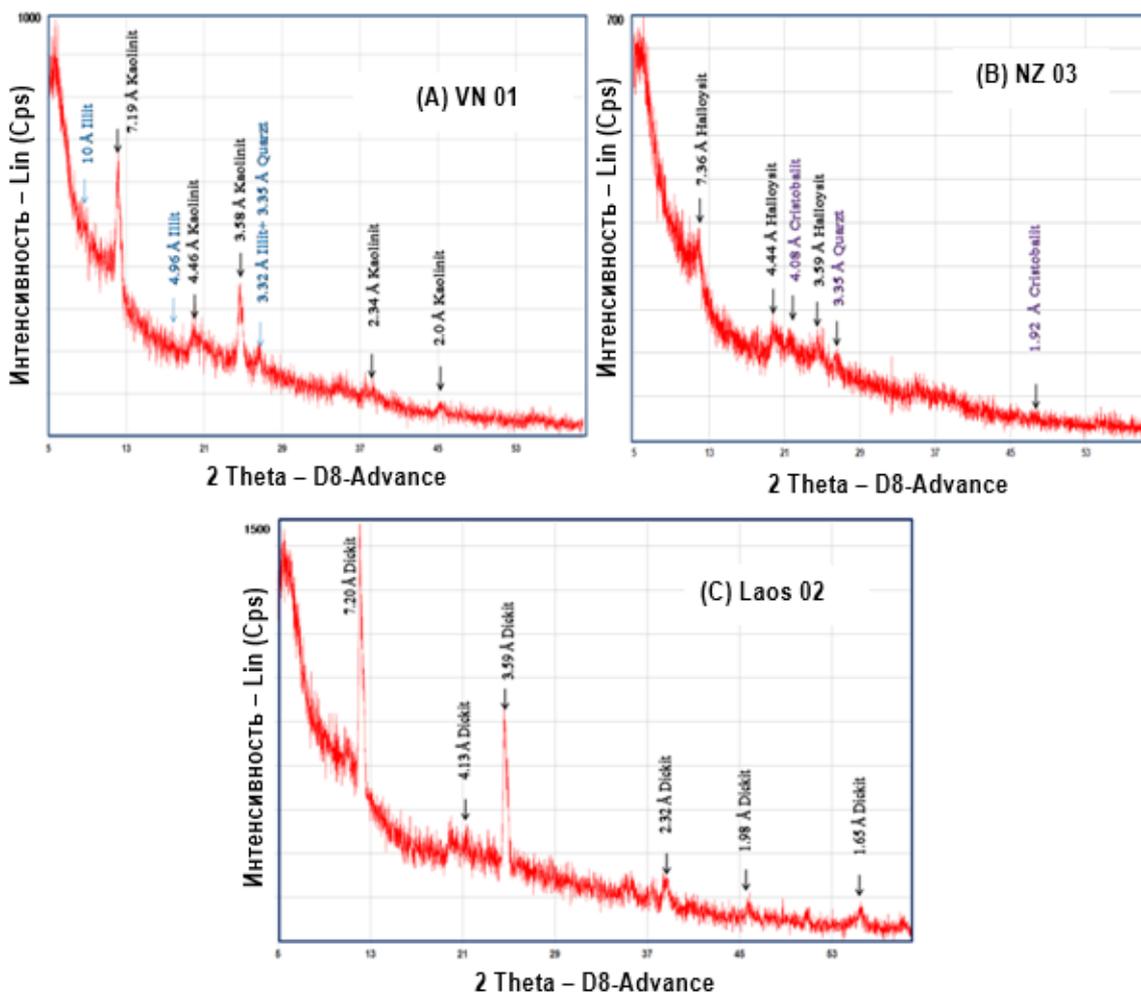


Рис. 1. Диаграмма РСА (по вертикали – интенсивность излучения, по горизонтали – шаг измерения) с образцами:

A – VN 01 (каолинит, Вьетнам); B – NZ 03 (галлуазит, Новая Зеландия); C – Laos 02 (диккит, Лаос)

Fig. 1. XRD chart (vertical – radiation intensity, horizontal – measurement step) for samples:

A – VN 01 (kaolinite, Vietnam); B – NZ 03 (halloysite, New Zealand); C – Laos 02 (dickite, Laos)

Нами были проанализированы результаты РФА в неметаллической лаборатории Центра геологических испытаний и анализа (таблица).

Результаты анализа двумя методами – РСА и ДСК – показывают, что три образца принадлежат к группе каолинита.

Оценка совмещения рассматриваемых методов при анализе минералов группы каолинита

Группа каолинита включает четыре основных минерала: каолинит, накрит,

диккит и галлуазит. Они имеют структуру 1:1, то есть каждая структура каолинита образуется прослойкой – четырехгранной и восьмигранной (рис. 3). Идеальная химическая формула каолинита, диккита и накрита – $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Отличие других минералов в группе заключается в том, что кристаллическая решетка галлуазита взаимодействует с водой и связывается с ней; его идеальная формула: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, его идеальная химическая формула: SiO_2 – 46,54 %; Al_2O_3 – 39,5 % и H_2O – 13,95 % [5].

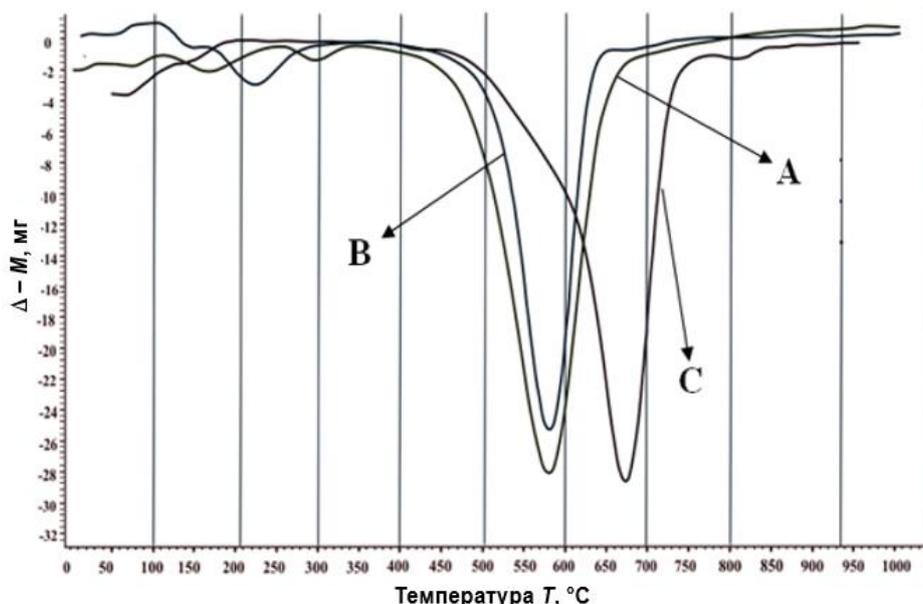


Рис. 2. Термическая диаграмма:

A – VN 01 (каолинит, Вьетнам); B – NZ 03 (галлуазит, Новая Зеландия); C – Laos 02 (диккит, Лаос)

Fig. 2. Thermal diagram:

A – VN 01 (kaolinite, Vietnam); B – NZ 03 (halloysite, New Zealand); C – Laos 02 (dickite, Laos)

Состав образцов при рентгеновском флуоресцентном анализе Sample composition by fluorescence analysis

Номер образца	Состав, %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	LOI
VN 01	46,5	38,5	0,09	0,43	0,25	0,21	1,05	0,17	0,046	0,06	13,38
Laos 02	44,32	39,68	0,06	0,1	0,23	0,23	0,01	0,36	0,035	0,1	13,92
NZ 03	48,1	35,6	0,15	0,33	0,15	0,12	0,01	0,38	0,068	0,06	14,16

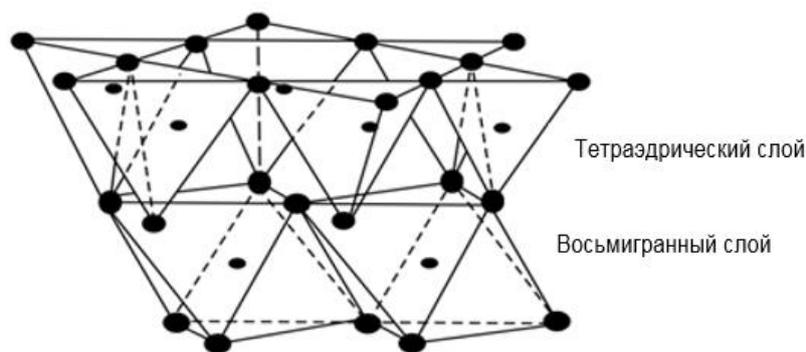


Рис. 3. Моделирование структуры кристалла глинистого минерала типа 1:1

Fig. 3. Structure modeling for a clay mineral crystal, type 1:1

Особенностью каолинита является отсутствие между частицами прослойки благодаря устойчивости водородной связи между гидроксильными группами прослойки восьмигранных и прослойки

четырёхгранных кристаллов, что уменьшает процесс гидратации, а также отсутствие явления набухания при взаимодействии с водой. Диккит отличается от каолинита наличием в его составе прослоек

кристаллов от четырехгранных до восьмигранных. А у кристалла галлуазита при гидратации появляется явление деформации или суперпозиции у узлов кристаллической решетки, что создает цилиндрический кристалл [7]. Хотя структура галлуазита похожа на структуру каолинита, у него есть еще одна прослойка воды (2,9 Å) [5]. Из-за этого расстояния в кристаллической решетке галлуазита увеличиваются и достигают 10 Å, однако, когда происходит водопотеря и кристалл галлуазита подвергается усадке, расстояние в кристаллической решетке уменьшается до 7,2 Å. Поэтому Международный комитет по номенклатуре рекомендует разделять галлуазит на две группы: метагаллуазит 7 Å и галлуазит 10 Å [5]. Комплексные и детальные значения Å характеризуют каолинит – 7,17; 3,58; 1,49; диккит – 7,15; 3,58; 2,32; галлуазит 10 Å – 10; 4,36; 3,35 и метагаллуазит 7 Å – 7,3; 4,42; 3,62.

Эффективность

рассматриваемых методов

Кривая ДСК каолинита и диккита показывает, что эндотермический эффект двух минералов отличается в пределах 100 °C [11–14]. Эндотермический эффект каолинита происходит в интервале 530–590 °C и характеризует процесс кристаллизации, а его экзотермический эффект 970 °C характеризует процесс образования муллита и каолинита. Причем, хотя диккит имеет одинаковую химическую формулу с каолинитом, он имеет эндотермический эффект выше, чем каолинит. Его эндотермический эффект появился в интервале 600–700 °C, а его интенсивный экзотермический эффект составляет 1011 °C. Однако в аналитическом образце экзотермическое явление каолинита, диккита и галлуазита не наблюдается.

По результатам анализа диккита образца Laos 02 (похожего на диккит Ямайки) имеется отчетливый эндотермический эффект с двумя довольно симметричными ветвями параболы,

острой вершиной, T_{max} около 700 °C, а также очень хорошая степень кристаллизации [15].

Среди приведенных минералов каолинит имеет наибольшее распространение. Каолинит, встречающийся обычно на месторождениях Танмай (Куангнинь) (или каолин – Тхакхоанг (Футхо)), обладает безукоризненной характеристикой кристаллизации, вершина эндотермического эффекта $T_{max} > 570$ °C. Процесс для муллита проходит быстро, интенсивно, поэтому амплитуда эндотермического эффекта большая, вершина острая. Кристаллизация каолинита дает T_{max} в интервале 500–560 °C, а каолинит с плохой кристаллизацией обычно встречается на месторождениях осадочного каолина с меньшим эндотермическим эффектом, $T_{max} < 500$ °C, экзотермический эффект находится в интервале 900–1000 °C обычно с маленькой амплитудой, вершина не острая [11]. Таким образом, мы можем говорить, что минерал каолинит образца VN 01 имеет очень хорошую степень кристаллизации.

Хотя метод ДСК имеет много преимуществ, он обладает и некоторыми недостатками. Например, трудно опознавать галлуазит и каолинит из-за их одинакового эндотермического эффекта в интервале 530–590 °C и экзотермического эффекта в интервале 900–1000 °C, их отличие только в том, что галлуазит имеет еще эффект дегидратации при 150 °C, однако это совпадает с эндотермическим эффектом иллита.

Кроме того, с помощью метода РСА опознавание галлуазита и каолинита или галлуазита и диккита происходит достаточно легко, потому что галлуазит имеет типичные дифракции 7,36; 3,44; 3,61 Å, а дифракционный пик каолинита – 7,17; 3,58; 1,49 Å (см. рис. 1). Также на диаграмме дифракций видно, что галлуазит в образце характеризуется тремя параметрами – 7,36; 4,44; 3,61 Å, и мы можем говорить, что галлуазит в образце

NZ 03 потерял воду, а кристалл галлуазита существует в виде метагаллуазита 7 Å, а не галлуазита 10 Å. Хотя метод РСА эффективен в этом случае, опознавание двух минералов – диккита и каолинита – методом РСА затруднено, если поверхности образца каолинита слабо выражены.

Закключение

Результаты анализа показывают, что метод РСА эффективен в качественном анализе глинистых минералов в целом и минералов группы каолинита в частности; этот метод также эффективен в опознавании двух минералов – каолинита и галлуазита, что невозможно сделать методом ДСК. Однако опознавание двух минералов – диккита и каолинита – методом РСА в некоторых случаях затруднено.

Метод ДСК имеет множество преимуществ: он не только помогает анализировать, качественно и точно распознавать содержание двух минералов – диккита и каолинита или диккита и галлуазита, но и позволяет оценивать степень кристаллизации этих минералов. В то же время применение этого метода ограничено при распознавании двух минералов – каолинита и галлуазита – из-за их одинакового эндотермического эффекта.

Таким образом, если совмещать оба метода – РСА и ДСК, улучшается эффективность анализа и оценки качества минералов каолиновой группы очень тонкодисперсного материала, что может быть применимо и для других объектов исследования.

Библиографический список

1. Chatterjee K.K. Uses of industrial minerals, rocks and fresh water. New York: Nova Science Publishers Inc., 2009. P. 69–79.
2. Le Do Tri. Vietnam kaolin potential and orientation of exploration and exploitation for socio-economic development. Hanoi: Geological Information Storage Center, 2008. 155 p.
3. Murry H.H. Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite and common clays // Developments in Clay Science, 2. Amsterdam: Elsevier, 2007. P. 21–24.
4. Prasad M.S., Preid K.J., Murray H.H. Kaolin: processing, properties and applications // Applied Clay Science. 1991. Vol. 6. P. 87–119.
5. Al-Ani T., Sarapää O. Clay and clay mineralogy. Physical-chemical properties and industrial uses. 2008. P. 11–65. [Электронный ресурс]. URL: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/m19_3232_2008_41.pdf (2.11.2018).
6. Chen Y.P., Wang K.M., Yang S.D. Mineralogy of dickite and nacrite from Northern Taiwan // Clays and Clay Minerals. 2001. Vol. 49. № 6. P. 586–595.
7. Papoulis D., Tsolis-Katagas P. Physical and chemical properties of some greek kaolins of different environment of origin // Proceeding of the 10th International Congress. Thessaloniki, 2004. P. 130–131.
8. Schroeder P. Clay mineralogy: lecture. 2010 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.clay.uga.edu/courses/8550> (2.11.2018).
9. Hanson R.F., Zamora R., Keller W.D. Nacrite, dickite and kaolinite in one deposit in Nayarite, Mexico // Clay and Clay Minerals. 1981. Vol. 29. P. 451–453.
10. Powder diffraction file release 2004, Data Sets 1-50 plus 70-88 PDF, ICDD International Center for Diffraction Data [Электронный ресурс]. URL: <http://www.icdd.com> (2.11.2018).
11. Au DuyThanh. Thermal analysis of minerals in geological samples. Hanoi: Science and technology, 2001. 45 p.
12. Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of mineral and its use in geological practice. Budapest: Geological Institute of Hungary, 2011. 180 p.
13. Mackenzie R.C. The differential thermal investigation of clays: monograph 2. London: Mineralogical Society, 1957. 456 p.
14. Mackenzie R.C. The differential thermal investigation of clays. London: Academic Press, 1970. 775 p.
15. Brindley G.W., Porter A.R.D. Occurrence of dickite in Jamaica – ordered and disordered varieties // American Mineralogist. 1978. Vol. 63. P. 554–562.

References

1. Chatterjee K.K. Uses of industrial minerals, rocks and fresh water. New York: Nova Science Publishers Inc., 2009, pp. 69–79.
2. Le Do Tri. Vietnam kaolin potential and orientation of exploration and exploitation for socio-economic development. Hanoi: Geological Information Storage Center, 2008, 155 p.
3. Murry H.H. Applied clay mineralogy: occurrences, processing and application of kaolins, bentonites, palygorskite-sepiolite and common clays. Developments in Clay Science, 2. Amsterdam: Elsevier, 2007, p. 21–24.
4. Prasad M.S., Preid K.J., Murray H.H. Kaolin: processing, properties and applications. Applied Clay Science, 1991, vol. 6, pp. 87–119.
5. Al-Ani T., Sarapää O. Clay and clay mineralogy. Physical-chemical properties and industrial uses. 2008, pp. 11–65. Available at: http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/m19_3232_2008_41.pdf (accessed 2 November 2018).
6. Chen Y.P., Wang K.M., Yang S.D. Mineralogy of dickite and nacrite from Northern Taiwan. Clays and Clay Minerals, 2001, vol. 49, no. 6, pp. 586–595.
7. Papoulis D., Tsolis-Katagas P. Physical and chemical properties of some greek kaolins of different environment of origin. Proceeding of the 10th International Congress. Thessaloniki, 2004, pp. 130–131.
8. Schroeder P. Clay mineralogy: lecture. 2010. Available at: <http://www.clay.uga.edu/courses/8550> (accessed 2 November 2018).
9. Hanson R.F., Zamora R., Keller W.D. Nacrite, dickite and kaolinite in one deposit in Nayarite, Mexico. Clay and Clay Minerals, 1981, vol. 29, pp. 451–453.
10. Powder diffraction file release 2004, Data Sets 1-50 plus 70-88 PDF, ICDD International Center for Diffraction Data. Available at: <http://www.icdd.com> (accessed 2 November 2018).
11. Au Duy Thanh. Thermal analysis of minerals in geological samples. Hanoi: Science and technology, 2001, 45 p.
12. Földvári M. Handbook of thermogravimetric system of mineral and its use in geological practice. Budapest: Geological Institute of Hungary, 2011, 180 p.
13. Mackenzie R.C. The differential thermal investigation of clays: monograph 2. London: Mineralogical Society, 1957, 456 p.
14. Mackenzie R.C. The differential thermal investigation of clays. London: Academic Press, 1970, 775 p.
15. Brindley G.W., Porter A.R.D. Occurrence of dickite in Jamaica – ordered and disordered varieties. American Mineralogist, 1978, vol. 63, pp. 554–562.

Критерии авторства / Authorship criteria

Нгуен Нгок Нам, Лай Тхи Биск Тхуи, Фам Динь Ан написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Nguyen Ngoc Nam, Lai Thi Bich Thuy and Pham Dinh An have are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal plagiarism responsibility.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Нгуен Нгок Нам,
магистр,
сотрудник,
Центр геологических испытаний и анализа,
12109, г. Ханой, Тхань Суан, ул. Нгуенчай, 12, Вьетнам,
e-mail: ngocnamhn28@gmail.com

Nguyen Ngoc Nam,
Master of Sciences,
Researcher,
Center for Geological Experiment Analysis,
12, Nguyenchai, Than Suan, Hanoi, 12109, Vietnam,
e-mail: ngocnamhn28@gmail.com



Лай Тхи Биск Тхуй,

магистр,
сотрудник,
Центр геологических испытаний и анализа,
12109, г. Ханой, Тхань Суан, ул. Нгуенчай, 12, Вьетнам,
e-mail: thuyxray@gmail.com

Lai Thi Bich Thuy,

Master of Sciences,
Researcher,
Center for Geological Experiment Analysis,
12, Nguyenchai, Than Suan, Hanoi, 12109, Vietnam,
e-mail: thuyxray@gmail.com



Фам Динь Ан,

магистр,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: phaman.tpu@gmail.com

Pham Dinh An,

Master of Sciences,
Post-graduate student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: phaman.tpu@gmail.com

Оригинальная статья / Original article

УДК 624.131.1(571.5)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-230-239>

Использование метода «Микроструктура» при инженерно-геологической оценке глинистых и лессовых грунтов (на примере изысканий в районе правобережного примыкания Академического моста г. Иркутска)

© Ю.В. Вашестюк^а, Т.Г. Рященко^б

^{а,б}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

^бИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель исследований заключалась в использовании нового метода при изучении микроструктуры глинистых и лессовых грунтов, вскрытых скважинами на участке правобережного примыкания Академического моста (г. Иркутск). При инженерно-геологических изысканиях этот блок информации обычно отсутствует, но часто является одним из ведущих факторов при оценке свойств грунтов. Одновременно с изучением микроструктуры грунтов участка данные по величине их пластичности были использованы для применения прогнозных расчетов числа пластичности по пределу текучести с целью дополнительного обоснования предложенного метода. По методу «Микроструктура» определено общее содержание агрегатов, в том числе преобладающих мелко-тонкопесчаных, первичных (свободных) мелко-тонкопесчаных, крупнопылеватых и мелкопылеватых частиц и установлена реальная глинистость (содержание глинистой фракции в свободном состоянии и составе агрегатов). При статистической обработке данных рассчитаны средние значения содержаний указанных параметров и оценен характер их изменчивости (по величине коэффициента вариации) в исследованной группе объектов. По общему содержанию агрегатов установлен скелетно-агрегированный тип микроструктуры грунтов; выявлено высокое реальное содержание глинистой фракции. По средним значениям содержания выбранных параметров построен специальный график, который отражает их соотношения в исследованных объектах. Выполненные расчеты числа пластичности по прогнозным формулам и их сопоставление с экспериментальными данными подтвердили высокую степень совпадения по наименованию грунта согласно стандартной классификации.

Ключевые слова: метод «Микроструктура», глинистые грунты, лессовые грунты, число пластичности, кластерный анализ

Информация о статье: Дата поступления 5 марта 2019 г.; дата принятия к печати 28 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Вашестюк Ю.В., Рященко Т.Г. Использование метода «Микроструктура» при инженерно-геологической оценке глинистых и лессовых грунтов (на примере изысканий в районе правобережного примыкания Академического моста г. Иркутска). *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых*. 2019. Т. 42. № 2. С. 230–239. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-230-239.

“Microstructure” method for engineering-geological evaluation of clay and loess soils (the right-bank adjunction zone of Academic Bridge / Academichesky most, Irkutsk)

© Yulia V. Vashestyuk^а, Tamara G. Ryashchenko^б

^{а,б}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

^бInstitute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim of the work has been to introduce a new method in the soil microstructure study for the clay and loess soils uncovered by well-drilling in the right-bank junction zone of Academic Bridge / Academichesky most, Irkutsk. The microstructure information block is usually unavailable in engineering-geological survey, though it is

often one of the leading factors in evaluating the soil properties. Along with the study of the soil microstructure, the data on the soil plasticity has been used in the predictive calculations of the plasticity number at the yield point, in order to further substantiate the proposed method. Using the "Microstructure" method, the total aggregate content has been defined, including the prevailing fine fine-sandy, primary (unbound) fine-sandy, primary coarse-dust, and fine-dust particles; real clay content (clay fraction content in a free and aggregate state) has also been defined. In the course of the statistical data processing, the average values of the above parameters contents have been calculated, and their variability in the studied object group has been estimated using the variation coefficient. The soil skeleton-aggregated microstructure type defined by the total aggregate content shows a high real content of the clay fraction. Based on the average values of the selected parameters content, a special graph has been plotted, that reflects the parameters ratio for the studied objects. The comparison between the plasticity number values calculated by the predictive formulas and the experimental data shows a high matching degree in relation to the soil designation by the standard classification.

Keywords: "Microstructure" method, clay soils, loess soils, plasticity number, cluster analysis

Information about the article: Received March 5, 2019; accepted for publication May 28, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Vashestyuk Yu.V., Ryashchenko T.G. "Microstructure" method for engineering-geological evaluation of clay and loess soils (the right-bank adjunction zone of Academic Bridge / Academicheskyy most, Irkutsk). *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya sekcii 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. 2, pp. 230–239. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-230-239.

Введение

Изучение микроструктуры дисперсных грунтов представляет собой специальный блок информации, который является одним из ведущих факторов при оценке свойств грунтов. Например, при комплексных исследованиях набухания, пластичности, гранулометрического и минерального состава, физико-химической активности и микроструктуры глинистых грунтов в районе южного Китая было установлено, что величина набухания определяется составом глинистых минералов и микроструктурными признаками, а пластичность зависит не только от содержания глинистой фракции, но и от количества агрегатов [1]. Выявлено влияние микроструктурных признаков лессов свиты малань (vQ_{3-4}) на просадочность, которая изучалась в пределах строительных площадок в районе Северного лессового плато Китая [2, 3]. Для оценки степени агрегированности глинистых грунтов предложен дисперсионный коэффициент, расчет которого проводится на основе данных гранулометрического анализа, выполненного при различных способах подготовки образца [4]. Среди современных методов микроструктурных

исследований глинистых и лессовых грунтов ведущее место занимает растровая электронная микроскопия.

В процессе изучения лессовых и глинистых грунтов в Монголо-Сибирском регионе (юг Восточной Сибири и Западная Монголия) в лаборатории инженерной геологии и геоэкологии Института земной коры СО РАН был разработан новый метод «Микроструктура», который широко применяется в регионе при инженерно-геологической оценке грунтовых толщ строительных площадок или в пределах ключевых участков [5]. В статье представлены результаты использования данного метода на участке правобережного примыкания Академического моста (г. Иркутск).

Объекты исследований

Определения микроструктуры и прогнозные расчеты числа пластичности выполнялись для 22 образцов-монолитов лессовых грунтов, отобранных из восьми скважин глубиной 20 м, пробуренных на участке изысканий, который располагался в пределах третьей террасы Ангары. Грунтовые толщи представлены следующими геолого-генетическими комплексами: поздневерхнечетвертичный

делювиальный – верхний (dQ_3^3) и нижний (dQ_3^2) лессовые циклиты; верхнечетвертичный аллювиальный (aQ_3), представленный лессовидными суглинками пойменной фации и песчано-галечными отложениями русловой фации.

Метод «Микроструктура»

Основой метода «Микроструктура» являются результаты гранулометрического анализа грунта, который выполняется пипеточным методом с тремя способами подготовки образца [6]. Далее проводятся специальные расчеты для определения различных микроструктурных параметров, условные индексы которых и их расшифровка представлены в табл. 1 [7, с. 75].

Особенность метода заключается в том, что коэффициенты микроагрегатности (разность содержаний фракций, полученных при дисперсной и агрегатной подготовке) рассчитываются для всех шести фракций (1,00–0,25; 0,25–0,05; 0,05–0,01; 0,010–0,002; 0,002–0,001; < 0,001 мм). Далее ведутся специальные расчеты для получения 28 параметров микроструктуры грунта [8, 9].

Апробация этого метода на примере лессовых грунтов, распространенных на указанной выше площадке изысканий, позволяет увеличивать банк информации об особенностях их микростроения. При сопоставлении полученных методом «Микроструктура»

Таблица 1

Параметры микроструктуры лессовых и глинистых грунтов
(метод «Микроструктура»)

Table 1

Microstructure parameters for loess and clay soils
(«Microstructure» method)

Индекс	Параметр	Индекс	Параметр
A	Общее количество агрегатов	M^{5-A}	Частицы в составе агрегатов 0,002–0,001 мм
A1	Агрегаты 1–0,25 мм	M6	Первичные частицы < 0,001 мм
A2	Агрегаты 0,25–0,05 мм	M^{6-A}	Частицы в составе агрегатов < 0,001 мм
A3	Агрегаты 0,05–0,01 мм	M7	Реальное содержание фракции < 0,001 мм
A4	Агрегаты 0,010–0,002 мм	M8	Реальное содержание фракции < 0,002 мм
A5	Агрегаты 0,002–0,001 мм	M9	Содержание фракции < 0,002 мм по стандартной гранулометрии
M1	Первичные (свободные) частицы 1,00–0,25 мм	$K_{гл}$	Коэффициент глинистости M^8 / M^9
M2	Первичные частицы 0,25–0,05 мм	M11	Общее содержание фракции 0,050–0,002 мм по стандартной гранулометрии
M^{2-A}	Частицы в составе агрегатов 0,25–0,05 мм	F1	Коэффициент свободы фракции 1,00–0,25 мм
M3	Первичные частицы 0,05–0,01 мм	F2	Коэффициент свободы фракции 0,25–0,05 мм
M^{3-A}	Частицы в составе агрегатов 0,05–0,01 мм	F3	Коэффициент свободы фракции 0,05–0,01 мм
M4	Первичные частицы 0,010–0,002 мм	F4	Коэффициент свободы фракции 0,010–0,002 мм
M^{4-A}	Частицы в составе агрегатов 0,010–0,002 мм	F5	Коэффициент свободы фракции 0,002–0,001 мм
M5	Первичные частицы 0,002–0,001 мм	F6	Коэффициент свободы фракции < 0,001 мм

результатов с почти «забытым» методом А.К. Ларионова [10] установлено преимущество первого («Микроструктура»): представлены количественные характеристики микроструктурных параметров, на основании которых установлен тип микроструктуры в зависимости от количества агрегатов (по разработанной классификации); определена реальная глинистость исследованных образцов; установлено содержание агрегатов различного размера и первичных (свободных) частиц; на основе статистической обработки данных по некоторым параметрам микроструктуры выявлен характер их изменчивости в исследованной группе лессовых отложений. Метод А.К. Ларионова основан на качественном определении признаков – по степени микротрещиноватости (класс микроструктуры), характеру микроразмокания (подкласс), степени активной пористости по скорости впитывания инертного глицерина; для определения дисперсности необходимы данные гранулометрического анализа.

Одновременно с изучением микроструктуры грунтов участка данные по величине их пластичности были использованы для применения прогнозных расчетов числа пластичности I_p по пределу текучести W_m с целью дополнительного обоснования предложенного метода. Определение числа пластичности и расчеты показателя текучести для глинистых грунтов являются обязательным условием при их инженерно-геологической оценке согласно стандарту^{1,2}.

Результаты исследований и их обсуждение

Апробация метода «Микроструктура» на примере лессовых грунтов, распространенных на указанной выше

площадке изысканий, позволяет увеличить банк информации об особенностях их микростроения. Данные по величине пластичности грунтов были использованы для применения прогнозных расчетов числа пластичности I_p по пределу текучести W_m с целью дополнительного обоснования предложенного метода [11, 12].

Из 28 параметров микроструктуры (см. табл. 1) были выбраны основные: общее количество агрегатов (А) и преобладающие по размеру разновидности (А2), содержание первичных (свободных) тонко-мелкопесчаных (М2), крупнопылеватых (М3) и мелкопылеватых (М4) частиц и реальная глинистость (М8) – общее содержание глинистой (< 0,002 мм) фракции в свободном состоянии и составе агрегатов (табл. 2).

Выполнена статистическая обработка этих данных и получены основные статистические показатели (табл. 3).

По средним значениям содержания микроструктурных параметров представлен график, на котором показано их соотношение в исследованных лессовых грунтах (рисунок).

На основании представленных материалов установлено, что грунты имеют скелетно-агрегированную микроструктуру, тип которой определяется по содержанию агрегатов (А = 30,3 %) в соответствии с разработанной классификацией [5]. Среди агрегатов преобладают тонко-мелкопесчаные разновидности (А2 = 21,4 %). Основная масса первичного (свободного) материала представлена крупнопылевыми частицами (М3 = 36,6 %). Особенностью лессовых грунтов является высокая реальная глинистость – реальное содержание фракции < 0,002 мм в среднем составляет 30,6 %.

¹ ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М: Издательство стандартов, 1984. 23 с. / GOST (Russian State Standard) 5180-84. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standards Publ. 23 p.

² ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: МНТКС, 2012. 58 с. / GOST (Russian State Standard) 25100-2011. Soils. Classification. Moscow: Intergovernmental Scientific-technical Committee on Standardization, Technical Norming and Conformity Assessment in Construction Publ. 58 p.

Таблица 2

Содержание основных параметров микроструктуры

Table 2

Contents of the main microstructure parameters

Номер образца	Параметр микроструктуры, %					
	A	A2	M2	M3	M4	M8
1	38,8	37,7	3,4	38,4	10	32,6
2	40,9	24	1,2	37,7	13,6	39,5
3	38,5	36,8	8,5	36,3	10,3	30,7
4	28,2	14,7	13,6	27,3	20	38,6
5	39,9	17,9	4,2	32,9	16,2	31,2
6	39,5	19,1	3,7	31,3	18,7	31,4
7	17,6	10,6	18,4	38,1	21,1	21,6
8	17,7	10,9	26,7	34,3	16,5	20,3
9	33,2	26,9	30,9	19,2	8,5	33,7
10	30,6	24,9	12,4	38,6	13,8	25,8
11	36,2	29,2	8,8	34,6	13,8	31
12	22,5	8,1	20	40	11,4	24,6
13	26	8,2	19,7	38,1	11,2	30,8
14	22,5	22,4	7,8	50	10,4	27,5
15	31,7	24,4	2,6	30,7	15,8	39,6
16	37,8	32,3	8,1	34,9	12,7	35,4
17	25,7	21,2	8,5	47,4	12,5	31,7
18	30,9	24,6	11,3	45,9	7,1	28,3
19	17,2	10,7	20,3	40,1	12,5	24,1
20	33,6	32,8	10	41,7	8,4	32,8
21	28,2	11,1	25,8	30,1	11,2	31,5

Характер распределения микроструктурных параметров (определяется по величине коэффициента вариации V , %) различен: относительная однородность отмечена для крупнопылеватых частиц и величины реальной глинистости ($V = 17-19\%$), остальные параметры имеют широкий диапазон изменений в рамках изученной выборки объектов ($V = 26-68\%$) (см. табл. 3).

В заключение раздела по микроструктурным особенностям лессовидных грунтов площадки в качестве примера сопоставления разработанного авторами метода и ранее используемого метода для одного образца приведем «детальный структурный индекс» (метод А.К. Ларионова) и одновременно – количественные сведения, полученные по методу «Микроструктура». Образец с глубины

5,5 м: III, Г/З₁, β (класс – скелетно-агрегированная структура, подкласс – смешанный тип структурных связей / вид – высокая активная пористость, разновидность – высокая дисперсность). Совпадение данных фиксируется по классу (типу) микроструктуры ($A = 26\%$), остальные количественные параметры получены только по методу «Микроструктура».

Данные о пластичности образцов участка использованы для применения прогнозных формул, которые учитывают только предел текучести Wm [13]:

$$Ip_1 = 0,75 Wm - 11; \quad (1)$$

$$Ip_2 = 0,8 Wm - 14; \quad (2)$$

$$Ip_3 = 0,599 Wm - 0,079, \quad (3)$$

где Ip_1 – число пластичности, рассчитанное по формуле (1); Wm – предел текучести; Ip_2 – число пластичности, рассчитанное по формуле (2); Ip_3 – число пластичности, рассчитанное по формуле (3).

Таблица 3

Результаты статистической обработки данных
 по параметрам микроструктуры ($n = 21$)

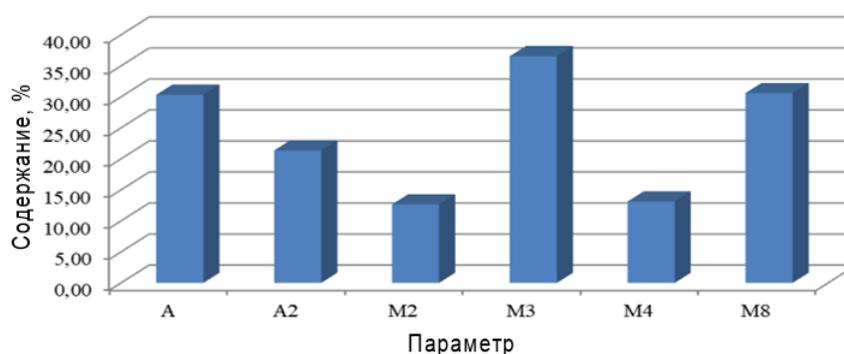
Table 3

Results of statistical processing of data
 on microstructure parameters ($n = 21$)

Статистический Показатель	Параметр микроструктуры, %					
	A	A2	M2	M3	M4	M8
X_{cp}	30,3	21,4	12,7	36,6	13,1	30,6
X_{min}	17,2	8,1	1,2	19,2	7,1	20,3
X_{max}	40,9	37,7	30,9	50	21,1	39,6
σ	7,76	9,34	8,58	6,95	3,79	5,35
V	26	44	68	19	29	17
θ	6,43	7,72	7,06	5,14	2,99	4
Md	30,9	22,4	10	37,7	12,5	31,2

Примечание. X_{cp} , X_{min} , X_{max} – среднее, минимальное, максимальное значения параметров микроструктуры; σ – стандартное отклонение; θ – среднее отклонение; V – коэффициент вариации; Md – среднемедианное значение.

Note. X_{cp} , X_{min} , X_{max} – mean, minimum, maximum values of microstructure parameters; σ – standard deviation; θ – mean deviation; V – coefficient of variation; Md – mean median value.



Соотношение основных параметров микроструктуры:

A – общее количество агрегатов; A2 – тонко-мелкопесчаные агрегаты;
 M2 – первичные тонко-мелкопесчаные частицы; M3 – первичные крупнопылеватые частицы 0,05–0,01 мм; M4 – первичные мелкопылеватые частицы 0,010–0,002 мм;
 M8 – реальное содержание фракции < 0,002 мм

Microstructure parameters:

A – total number of aggregates; A2 – fine fine-sandy aggregates;
 M2 – primary fine-sandy particles; M3 – primary coarse-dust particles, 0.05–0.01 mm; M4 – primary fine-dust particles, 0.010–0.002 mm;
 M8 – real fraction content < 0.002 mm

Расчеты по указанным формулам выполнены для 22 объектов; представлены экспериментальные (I_p) и прогнозные (I_{p1} , I_{p2} , I_{p3}) значения числа пластичности и пределы текучести (табл. 4).

По этим материалам можно отметить высокий уровень совпадения: все 22

образца относятся к суглинкам при условии изменения предела текучести от 28,8 до 35,4 %.

Далее была проведена статистическая обработка данных о числах пластичности грунтов, полученных экспериментальным и расчетным методами (табл. 5).

Таблица 4
Экспериментальное (Ip) и расчетные (Ip_1, Ip_2, Ip_3) значения числа пластичности, %
Table 4
Experimental (Ip) and calculated (Ip_1, Ip_2, Ip_3) values of the plasticity number, %

Номер образца	Показатель пластичности, %				
	W_m	Ip	Ip_1	Ip_2	Ip_3
1	28,8	8,4	10,6	9	9,4
2	29,7	9,7	11,3	9,8	9,9
3	32,5	11,7	13,4	12	11,6
4	35	11,9	15,3	14	13,1
5	32,7	11,1	13,5	12,2	11,7
6	29,4	8,4	11,1	9,5	9,7
7	28,8	9	10,6	9	9,4
8	30,4	10	11,8	10,3	10,3
9	35,5	15,6	15,6	14,4	13,4
10	28,9	9,8	10,7	9,1	9,4
11	32,4	12,4	13,3	11,9	11,5
12	33,2	11,3	13,9	12,6	12
13	32,7	11,4	13,5	12,2	11,7
14	31,5	10	12,6	11,2	11
15	34,1	11,7	14,6	13,3	12,5
16	34,3	12,5	14,7	13,4	12,7
17	34,5	12,5	14,9	13,6	12,8
18	30,5	9,2	11,9	10,4	10,4
19	33,3	12,4	13	12,6	12,1
20	33,2	10,8	13,9	12,6	12
21	30,7	9,6	12	10,6	10,5
22	30,3	9,1	11,7	10,2	10,3

Таблица 5
Результаты статистической обработки данных по экспериментальным и расчетным значениям числа пластичности лессовых и глинистых грунтов
Table 5
Results of statistical data processing on experimental and calculated values of the plasticity number for loess and clay soils

Статистический показатель	Показатель пластичности, %				
	W_m	Ip	Ip_1	Ip_2	Ip_3
X_{cp}	31,93	10,84	12,95	11,54	11,22
X_{min}	28,8	8,4	10,6	9,04	9,35
X_{max}	35,5	15,6	15,63	14,4	13,36
σ	2,12	1,73	1,59	1,7	1,27
$V, \%$	7	16	12	15	11
θ	1,84	1,39	1,38	1,47	1,1
Md	32,45	10,95	13,34	11,96	11,54

Примечание. Условные обозначения статических показателей см. в табл. 3.
Note. Conventional signs for the statistical parameters are given in Table 3.

При незначительных изменениях предела текучести (коэффициент вариации – 7 %) достаточно стабильное распределение имеют все четыре значения пластичности (коэффициент вариации – 11–16 %). Близки и абсолютные средние значения исследуемого показателя (11–13–12–11).

На заключительном этапе сопоставлений использована компьютерная программа «Кластер-анализ R-типа» [14]. Матрица включала значения числа пластичности в четырех вариантах для 22 образцов лессовых грунтов участка. Коэффициент корреляции (горизонтальная ось на графике-дендрограмме) между экспериментальными (I_p) и расчетными (I_{p1} , I_{p2} , I_{p3}) значениями числа пластичности высокий – 0,9.

Заключение

Таким образом, при использовании метода «Микроструктура» определены основные микроструктурные параметры лессовых грунтов участка: общее количество агрегатов и их разновидностей, содержание первичных (свободных) частиц и реальная глинистость (реальное содержание фракции < 0,002 мм).

На основе статистической обработки данных и графических построений выявлены общие микроструктурные особенности грунтов: относительно стабильная агрегированность (установлен скелетно-агрегированный тип микроструктуры), преобладание крупнопылеватых первичных частиц (они отсутствуют в составе агрегатов), высокая (20,3–39,6 %) реальная глинистость (за счет частиц менее 0,002 мм, которые в большом количестве находятся в агрегатах), незначительная примесь тонко-мелкопесчаных, мелкопылеватых первичных частиц, распределение которых отличается разнообразием.

Преимущество метода «Микроструктура» связано с возможностью получения количественной информации о содержании различных микроструктурных параметров.

Выполненные расчеты числа пластичности по прогнозным формулам и их совпадение с экспериментальными данными позволяют рекомендовать их использование для оценки пластичности лессовых и глинистых грунтов.

Библиографический список

1. Li-dong B., Ke-rui C., Wen-kui H. Mineral composition and microstructural swelling of the soil in the southern part of Hefei-Xuzhou Expressway (China) // Journal of Chengdu Inst. Technical. 2001. № 2. P. 148–153.
2. Li Lan. Studying of a microstructure of loess // Shuiwendizhi gongcheng dizhi – Hydrogeology and Engineering Geology. 2004. Vol. 31. № 3. P. 17–19.
3. Qinq W., Feng-yan W., Shu-fang X. Quantitative study of the characteristics of the soil microstructure and the use of their results in desighing // Journal of Chengdu Inst. Technical. 2001. № 2. P. 148–153.
4. Yang T.-L., Gong S.-L. Microscopic analysis of the engineering geological behavior of soft clay in Shanghai, China // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2010. Vol. 69. № 4. P. 607–615.
5. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. 287 с.
6. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 327 с.
7. Рященко Т.Г., Акулова В.В., Ухова Н.Н., Штельмах С.И., Гринь Н.Н. Лессовые грунты Монголо-Сибирского региона. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2014. 241 с.
8. Горькова И.М. Структурные и деформационные особенности осадочных пород различной степени уплотнения и литификации. М.: Наука, 1965. 128 с.
9. Ларионов А.К., Преклонский В.А., Аняньев В.П. Лессовые породы СССР и их строительные свойства. М.: Госгеотехиздат, 1959. 366 с.
10. Ларионов А.К. Методы исследования микроструктуры грунтов. М.: Недра, 1971. 199 с.
11. Галай Б.Ф. Использование границы текучести глинистых грунтов для характеристики их пластичности // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1974. № 4. С. 23.

12. Галай Б.Ф. Корреляционные зависимости между показателями пластичности глинистых грунтов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 1978. № 8. С. 100–103.

13. Рященко Т.Г., Тирских С.А. Определенные пластичности глинистых и лессовых грунтов:

оценка расчетного метода и рекомендации // Инженерные изыскания. 2016. № 8. С. 15–19.

14. Данилов Б.С. Кластерный анализ в EXCEL // Строение литосферы и геодинамика: материалы Всерос. молодежн. конф. Иркутск, 2001. С. 18–19.

References

1. Li-dong B., Ke-ruì C., Wen-kui H. Mineral composition and microstructural swelling of the soil in the southern part of Hefei-Xuzhou Expressway (China). *Journal of Chengdu Inst. Technical*, 2001, no. 2, pp. 148–153.

2. Li Lan. Studying of a microstructure of loess. *Shuiwendizhi gongcheng dizhi – Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, vol. 31, no. 3, pp. 17–19.

3. Qinq W., Feng-yan W., Shu-fang X. Quantitative study of the characteristics of the soil microstructure and the use of their results in designing. *Journal of Chengdu Inst. Technical*, 2001, no. 2, pp. 148–153.

4. Yang T.-L., Gong S.-L. Microscopic analysis of the engineering geological behavior of soft clay in Shanghai, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, vol. 69, no. 4, pp. 607–615.

5. Ryashchenko T.G. *Regional'noe gruntovedenie (Vostochnaya Sibir')* [Regional soil science (Eastern Siberia)]. Irkutsk: Earth's Crust Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2010, 287 p. (In Russ.).

6. Lomtadze V.D. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornyykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy* [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. Leningrad: Nedra Publ., 1990, 327 p. (In Russ.).

7. Ryashchenko T.G., Akulova V.V., Ukhova N.N., Shtel'makh S.I., Grin' N.N. *Lessovye grunty Mongolo-Sibirskogo regiona* [Loess soils of the Mongolian-Siberian region]. Irkutsk: Earth's Crust Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2014, 241 p. (In Russ.).

8. Gor'kova I.M. *Strukturnye i deformatsionnye osobennosti osadochnyykh porod razlichnoi stepeni uplotneniya i litifikatsii* [Structural and deformation features of sedimentary rocks of different density and lithification degree]. Moscow: Nauka Publ., 1965, 128 p. (In Russ.).

9. Larionov A.K., Preklonskii V.A., Anan'ev V.P. *Lessovye породы СССР i ikh stroitel'nye svoystva* [Loess rocks of the USSR and the construction properties]. Moscow: Gosgeotekhnizdat Publ., 1959, 366 p. (In Russ.).

10. Larionov A.K. *Metody issledovaniya mikrostruktury gruntov* [Methods of soil microstructure investigation]. Moscow: Nedra Publ., 1971, 199 p. (In Russ.).

11. Galai B.F. Application of yield point for evaluating clay soils plasticity. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering], 1974, no. 4, p. 23. (In Russ.).

12. Galai B.F. Correlation of clayey soils plasticity indices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka* [Proceedings of Higher Schools. Geology and Exploration], 1978, no. 8, pp. 100–103. (In Russ.).

13. Ryashchenko T.G., Tirsikh S.A. Determination of plasticity index of clay and loess soils: evaluation of computational method and recommendations. *Inzhenernye izyskaniya* [Engineering survey], 2016, no. 8, pp. 15–19. (In Russ.).

14. Danilov B.S. *Klasterniy analiz v EXCEL* [Cluster analysis in EXCEL]. *Materialy Vseros. molodezhn. konf. "Stroenie litosfery i geodinamika"* [Materials of the All-Russian youth's scientific conference "The lithosphere structure and geodynamics"]. Irkutsk, 2001, pp. 18–19. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Вашестюк Ю.В., Рященко Т.Г. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Yulia V. Vashestyuk, Tamara G. Ryashchenko are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Вашестюк Юлия Владимировна,
кандидат геолого-минералогических наук,
доцент кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: vashestyuk_yv@istu.edu

Yulia V. Vashestyuk,
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Associate Professor at the Department of Applied Geology, Geophysics
and Geoinformation Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: vashestyuk_yv@istu.edu



Рященко Тамара Гурьевна,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
профессор кафедры прикладной геологии, геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
ведущий научный сотрудник,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: ryashenk@crust.irk.ru

Tamara G. Ryashchenko,
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor,
Professor, Department of Applied Geology, Geophysics and Geoinformation
Systems,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
Senior Researcher,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia,
e-mail: ryashenk@crust.irk.ru

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.831

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253>

Особенности изучения физико-механических свойств многолетнемерзлых массивов горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений

© А.Н. Авдеев^а, Е.Л. Сосновская^б, А.Ю. Болотнев^с, Батжаргал Долгорсүрэн^д

^{а,б}Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

^{с,д}Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Резюме: Цель данного исследования заключалась в изучении геомеханических условий рудных месторождений с оценкой прочностных и деформационных свойств массивов горных пород ряда рудных месторождений, залегающих в криолитозоне. Исследования проводились в 2000–2018 г. на базе лаборатории геомеханики и физики горных пород Иркутского национального исследовательского технического университета. Основные физико-механические свойства горных пород и руд определялись в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации. Выбор исследуемых характеристик базировался на наиболее распространенных методах оценки геомеханических условий месторождений и расчетов напряженного-деформированного состояния в конструктивных элементах систем разработки. Анализ прочностных и деформационных характеристик горных пород осуществлялся с учетом основных структурных и криологических особенностей массивов горных пород рудных месторождений и их обнажений в горных выработках. По результатам исследований установлено, что при разработке рудных месторождений криолитозоны выделяются три типа геомеханических условий: зона постоянной мерзлоты, переходная зона мерзлых пород в талые и зона постоянно талых пород. При оценке геомеханических условий рудных месторождений прочностные и деформационные свойства горных пород предлагается определять дифференцированно: в естественно-сухом состоянии пород для зоны постоянной мерзлоты; пород в водонасыщенном состоянии после 25 циклов замораживания и оттаивания для переходной зоны; в естественно-сухом и водонасыщенном состоянии в зависимости от конкретных гидрогеологических условий для зоны постоянно талых пород. Переход от прочностных свойств горных пород в образцах к их свойствам в массиве предлагается осуществлять на основе дифференцированного коэффициента структурного ослабления с учетом факторов мерзлоты, трещиноватости и геометрических размеров обнажений горных выработок. Оценка потенциальной удароопасности массивов горных пород и склонности горных пород к хрупкому разрушению предлагается производить также с учетом их криогенного состояния. Склонность пород к хрупкому разрушению рекомендуется оценивать на основе базовых методик: по критериям Г.Н. Кузнецова, запредельного деформирования или комбинированными способами. По результатам исследований разработан ряд методических и нормативных документов по управлению горным давлением и определению параметров подземных геотехнологий для условий разработки рудных месторождений, расположенных в криолитозоне.

Ключевые слова: криолитозона, физико-механические свойства горных пород, геомеханические условия, потенциальная удароопасность, устойчивость горных выработок

Информация о статье: Дата поступления 17 января 2019 г.; дата принятия к печати 24 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 27 июня 2019 г.

Для цитирования: Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю., Батжаргал Долгорсүрэн. Особенности изучения физико-механических свойств многолетнемерзлых массивов горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений. *Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых.* 2019. Т. 42. № 2. С. 240–253. DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253.

Specifics of permafrost rock mass' physical-mechanical properties study in evaluation of ore deposit geotechnical conditions

© Arkady N. Avdeev^a, Elena L. Sosnovskaya^b, Alexander Yu. Bolotnev^c, Batjargal Dolgorsuren^d

^{a,b}Mining Institute, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

^{c,d}Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: The aim has been to study the geotechnical conditions of certain ore deposits occurring in a permafrost zone, with the focus on the stress-strain properties of the rocks mass. The study was conducted in 2000-2018 at the Laboratory of Geomechanics and Rock Physics, INRTU. The main physical-mechanical properties of the rocks and ores have been defined in accordance with the requirements of the Russian Federation standards. The characteristics were selected based on the most common methods of estimating the geotechnical conditions of ore deposits, and on the stress-strain calculation for the structural components of the filed development systems. The analysis of the rock stress-strain characteristics has been carried out with the account of the main structural and cryogenic features of the ore deposit rock mass, and of rock outcrop in the mine workings. The study has distinguished three types of geotechnical conditions: permanent-frozen rock zone, frozen-to-thaw rock transition zone, and permanent-thaw rock zone. When evaluating the ore deposit geotechnical conditions, a differentiated approach to determining the rock stress-strain properties is suggested: natural dry state for the permanent-frozen rock zone; water-saturated state after 25 freezing-thawing cycles for the transition zone; natural dry and water-saturated state (depending on the hydrogeological factors) for the permanent-thaw rock zone. It is suggested that the conversion of the sample rock strength properties into those of the rock mass is done using the differentiated coefficient of structural slackening with the account of the permafrost, rock jointing, and the mining's' geometrics. When evaluating the burst risk and the brittle fracture susceptibility, the rock cryogenic state should be taken into account. It is recommended that the brittle fracture susceptibility is defined by either of the following methods: by the Kuznetsov criterion (the ratio of the rock's compressive strength to its tensile strength), by out-of-limit deformation (the ratio of the rock's modulus of elasticity to its modulus of decrease), or a by combination of the two. Based on the research results, a series of methodological and normative documents have been developed for regulating the rock pressure and defining the geotechnical parameters for the conditions of cryolythozone ore deposits underground mining.

Keywords: permafrost zone, physical-mechanical properties of rocks, geotechnical conditions, rock burst risk, stability of mine workings

Information about the article: Received January 17, 2019; accepted for publication May 24, 2019; available online June 27, 2019.

For citation: Avdeev A.N., Sosnovskaya E.L., Bolotnev A.Yu., Batjargal Dolgorsuren. Specifics of permafrost rock mass' physical-mechanical properties study in evaluation of ore deposit geotechnical conditions. *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*, 2019, vol. 42, no. 2, pp. 240–253. (In Russ.) DOI: 10.21285/2541-9455-2019-42-2-240-253.

Введение

Горно-геологические условия разработки рудных месторождений Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока весьма разнообразны. Неравномерное распределение разрывных нарушений и трещиноватых участков пород, гравитационно-тектоническое природное напряженное состояние в массивах горных пород обуславливают крайне сложные условия отработки. Дополнительно осложняет ведение горных работ наличие повсеместно распространенного

мощного слоя многолетнемерзлых пород. Суммарная площадь, занятая многолетнемерзлыми породами, составляет более 50 % территории России. Глубина слоя многолетнемерзлых пород варьирует в широких пределах, достигая под водоразделами более 500 м (табл. 1).

Многолетнемерзлые породы неоднородны по температурному режиму, мощности, наличию льда, составу. Геокриологические условия на месторождениях существенно изменяются при вскрытии мерзлых толщ горными

Таблица 1

Глубина залегания многолетнемерзлых пород
на некоторых золоторудных месторождениях

Table 1

Permafrost depth at some gold fields

Месторождение	Глубина криолитозоны, м
Майское	190–320
Зун-Холбинское	200 и более
Ирокиндинское	200–350
Кедровское	250–300
Каральвеем	150–500
Коневинское	250–400
Ново-Широкинское	200 и более
Биркачан	200–250

выработками как при открытом, так и при подземном способе добычи. В пределах слоя многолетнемерзлых пород появляются локальные участки растепленных горных пород, вызванные нарушением теплового режима горного массива по технологическим причинам [1–7]. При понижении горных работ глубже криогенного слоя начинается переход мерзлых пород в талые. Геомеханические условия в этой области ухудшаются вследствие фазового перехода льда в воду, прочностные свойства массива горных пород снижаются, а деформационные растут. На нижних горизонтах рудных месторождений, расположенных в криолитозоне, по совокупности факторов возможны проявления горного давления и сдвижения в динамической форме. Распространенные методы прогноза динамических проявлений горного давления базируются на оценке прочностных и деформационных характеристик горных пород. Без корректного учета физико-механических свойств горных пород криогенных массивов месторождений невозможно надежно оценивать устойчивость горных выработок и целиков и своевременно прогнозировать и предотвращать проявления горного давления в динамических и статических формах.

Для оценки геомеханических условий рудных месторождений авторы

статьи анализировали прочностные и деформационные свойства массивов горных пород ряда рудных месторождений, залегающих в криолитозоне. Информация о криогенных условиях очень важна при оценке геомеханических условий разработки месторождений. Мерзлоту необходимо учитывать при инженерных расчетах конструктивных элементов систем разработки, параметров крепления и закладки выработанного пространства [1–10].

Материал и методы исследований

Исследования проводились в 2000–2018 гг. на базе лаборатории геомеханики и физики горных пород Иркутского национального исследовательского технического университета. Основные физико-механические свойства горных пород и руд определялись в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации к методам испытаний горных пород. Выбор исследуемых характеристик базировался на наиболее распространенных методах оценки геомеханических условий рудников и расчетов напряженного-деформированного состояния в конструктивных элементах систем разработки, в том числе авторских. Анализ прочностных и деформационных характеристик горных пород осуществлялся с учетом основных структурных и

криологических особенностей массивов горных пород рудных месторождений и их обнажений в горных выработках.

Результаты исследований

Из горной практики известно, что при инженерных расчетах устойчивости горных выработок как при открытом, так и при подземном способе добычи наиболее часто используются следующие основные физико-механические показатели: плотность, пределы прочности при одноосном сжатии, растяжении и срезе со сжатием, модуль Юнга, модуль деформации, коэффициент Пуассона, коэффициент крепости по М.М. Протодякову, сцепление и угол внутреннего трения.

В последние десятилетия при оценке техногенных напряжений в окрестности горных выработок и целиков большое распространение получили математические методы моделирования с применением компьютерных технологий: методы граничных сингулярных уравнений [11, 12] и конечноэлементного анализа [13, 14].

Сначала эти расчеты были трудоемкими, поэтому количество используемых физико-механических характеристик горных пород принималось минимальным для упрощения расчетов. Так, в программах ELAST и ELAST-2, разработанных в конце прошлого века в Институте горного дела СО РАН (доктор физико-математических наук В.И. Машуков), использовались две наиболее влияющие на геомеханическое состояние горных пород характеристики: модуль деформации и коэффициент Пуассона. Дополнительно при оценке первоначальных напряжений учитывалась средняя плотность массива горных пород. При усовершенствовании технологий в расчетах стало использоваться большее количество параметров. В программном комплексе FEM, разработанном в Институте горного дела УрО РАН (профессор О.В. Зотеев), при решении упругих задач

используется шесть начальных характеристик ненарушенных горных пород: модуль деформации, коэффициент Пуассона, плотность горных пород, угол внутреннего трения, сцепление, предел прочности на растяжение. Следует отметить, что при конечноэлементном моделировании широко используются разномодульные среды, то есть стало возможным одновременно учитывать физико-механические свойства разных литологических типов горных пород, руд и закладочных материалов.

Таким образом, определение прочностных и деформационных характеристик горных пород становится все более значимым при оценке напряженно-деформированного состояния массивов горных пород.

В процессе исследования геомеханических условий на рудниках при определении прочностных свойств возникает важная задача оценки склонности горных пород к хрупкому разрушению с целью прогноза потенциальной удароопасности массива (табл. 2).

В качестве базового критерия удароопасности широко используется критерий запредельного деформирования: отношение модуля упругости E к модулю спада M . При $E/M < 1$ порода считается потенциально удароопасной; при $E/M > 1$ – неудароопасной (рис. 1). Метод достаточно трудоемкий, поэтому для оперативной оценки удароопасности часто используется критерий Г.Н. Кузнецова.

По этой методике в качестве критерия хрупкого разрушения предложено использовать отношение предела прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ к пределу прочности на одноосное растяжение σ_p : $\sigma_{сж}/\sigma_p$. Установлено, что породы разрушаются хрупко, если $\sigma_{сж}/\sigma_p > 6$.

В качестве примера произведем оценку потенциальной удароопасности горных пород нижних горизонтов Зун-Холбинского месторождения (см. табл. 2).

Таблица 2

Основные физико-механические характеристики горных пород
нижних горизонтов Зун-Холбинского месторождения (данные 2017 г.)

Table 2

Main physical-mechanical characteristics of lower horizon rocks,
Zun-Kholbinskoe deposit (data of 2017)

Наименование породы	Известняки	Метапесчаники	Диориты	Гранодиориты
Средняя плотность ρ , г/см ³	2,7	2,7	2,8	2,8
Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	46,1	51,1	93,7	114,7
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	12,2	11,7	12,4	14,5
Сцепление τ , МПа	14,3	16,4	25,8	31,6
Угол внутреннего трения φ , град.	–	24	34	35
Коэффициент хрупкости $K_{хр}$	3,6	4,3	7,6	7,9
Коэффициент Пуассона μ	0,22	0,15	0,3	–
Коэффициент крепости по М.М. Протодьяконову f	6	6	9	10
Модуль общей деформации E_d , МПа 10^4	3,42	3,98	6,2	4,99
Модуль упругости E , МПа 10^4	3,74	5,00	6,35	5,73
Модуль спада M , МПа 10^4	7,24	9,37	15,28	14,1
Критерий удароопасности	2,86	1,08	0,44	0,46
Суммарная оценка удароопасности	Неудароопасный	Удароопасный		

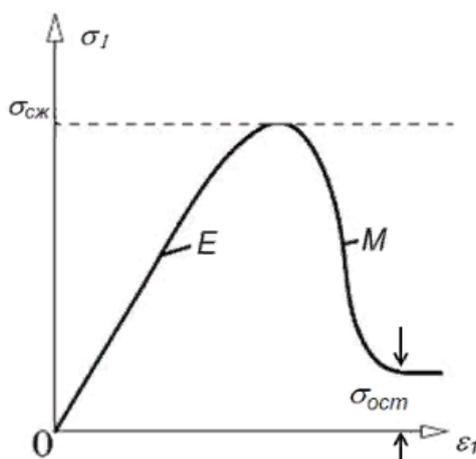


Рис. 1. Схема диаграммы «напряжение – деформация» при одноосном сжатии:
 σ_1 – осевое давление на образец, МПа; ϵ_1 – продольная деформация образца;
 E – модуль упругости образца, МПа; M – модуль спада образца, МПа; $\sigma_{сж}$ – предел прочности при одноосном сжатии, МПа; $\sigma_{ост}$ – предел остаточной прочности, МПа

Fig. 1. Stress-strain diagram, uniaxial compression:
 σ_1 – axial pressure, sample, MPa; ϵ_1 – longitudinal deformation, sample;
 E – modulus of elasticity, sample, MPa; M – modulus of decline, sample, MPa;
 $\sigma_{сж}$ – ultimate strength under uniaxial compression, MPa; $\sigma_{ост}$ – ultimate residual strength, MPa

Оценка хрупкости пород по критерию Г.Н. Кузнецова показала, что склонными к хрупкому разрушению под нагрузкой являются диориты и гранодиориты, несклонными – известняки и метапесчаники. Коэффициент хрупкости по Г.Н. Кузнецову изменяется в пределах от 2,7 до 8,4, составляя в среднем 5,8, что отвечает категории «неудароопасный». Оценка потенциальной удароопасности по критерию запредельного деформирования показала, что склонными к хрупкому разрушению под нагрузкой являются диориты и гранодиориты. Известняки и метапесчаники показали категорию «неудароопасный». В среднем по всем представленным образцам коэффициент удароопасности равен 0,47, это меньше критерия удароопасности $E/M = 1$, что отвечает характеристике массива «неудароопасный». Таким образом, оба метода показали хорошую сходимость и рекомендуются к использованию как комплексно, так и по отдельности – в зависимости от важности инженерно-геомеханических задач.

Следует учесть, что зачастую комплексные исследования прочностных и деформационных свойств затруднены вследствие недостаточно качественного и ограниченного количественно материала проб. Распространенный керновый материал разведочных скважин диаметром менее 42 мм не отвечает требованиям российских стандартов определения физико-механических свойств горных пород. При использовании кусков отбитой горной породы, отобранной на глубоких горизонтах рудников, прочностные свойства горных пород получают существенно заниженными, так как вследствие частичного разрушения буровзрывными работами отбитая горная порода более трещиновата, чем в массиве. Для оптимальной оценки геомеханических условий необходимо использовать наименее разрушенный керновый материал разведочных скважин диаметром 50 мм и более.

При оценке физико-механических свойств горных пород криолитозоны следует учитывать криогенные факторы: фазовое состояние воды в породе, конфигурацию ледяных включений, прослоев, наличие залежей льда в породной массе, структуру и текстуру пород. Установлено, что криогенное состояние массива горных пород оказывает значительное влияние на прочностные свойства массива горных пород [1–10]. По деформационно-прочностным показателям мерзлые породы существенно отличаются от талых: прочностные показатели растут, а деформационные характеристики снижаются. Особое значение приобретает время приложения нагрузки: для льда, являющегося существенной частью многолетнемерзлого массива горных пород, характерны явления снижения прочности и возрастания деформаций при длительных нагрузках. Следует отметить, что значительное изменение прочностных свойств мерзлых пород может происходить как при оттаивании, так и при колебаниях температуры пород в диапазоне отрицательных величин.

Для оценки снижения прочностных свойств при их периодическом замораживании и оттаивании широкое распространение получил показатель морозостойкости, равный отношению пределов прочности при сжатии исходной породы к ее пределу прочности при сжатии после многократных циклов замораживания и оттаивания в лабораторных условиях. Например, для условий Зашихинского редкометалльного месторождения снижение прочностных свойств составило 5–12 % при 25 циклах замораживания-оттаивания (табл. 3). К сожалению, метод получил распространение в основном для оценки устойчивости бортов карьеров и возможности использования грунтов в строительстве. По мнению авторов, показатель морозостойкости перспективен при оценке прочностных характеристик горных пород в подземных горных

Таблица 3

Снижение прочностных свойств пород при многократном растеплении горных пород (на примере Зашихинского редкометалльного месторождения)

Table 3

Decrease in strength properties of rocks for repeated-thawing mine workings (Zashikhinskoye rare metal deposit)

Наименование породы	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Предел прочности при одноосном сжатии после 25 циклов замораживания и оттаивания, МПа	Морозостойкость, %
Граниты среднезернистые	88,11	79,83	10
Метасоматиты	93,06	85,71	8
Метасоматиты альбит-кварцевые среднезернистые	84,46	73,25	12
Граниты рибекитовые	104,16	99,2	5
Диотиры	128,67	121,58	5

выработках переходных участков мерзлых пород в талые, особенно при их техногенном растеплении. Очевидно, что в случае техногенного растепления стенок горных выработок и целиков количество циклов замораживания-оттаивания возрастает многократно по отношению к сезонному оттаиванию открытых горных разработок.

В техногенных и природных переходных зонах мерзлых пород в талые значительное влияние на устойчивость горных выработок и целиков оказывает водоприток. Обводненность горных пород на локально растепленных участках усложняет геомеханические условия выемки рудных тел.

Так, для условий отработки Коневинского золоторудного месторождения анализ результатов определения физико-механических свойств пород в водонасыщенном состоянии позволяет отметить, что свойства значительно отличаются от полученных ранее для условий естественно-сухого состояния (табл. 4). Например, прочность пород на сжатие гранодиоритов для пород в естественно-

влажном состоянии составляет 98,1 МПа, в водонасыщенном состоянии – 76,6 МПа, на растяжение – 18 и 12,5 МПа соответственно. Сцепление беретизированных гранодиоритов равно: в естественно-влажном состоянии – 25,3 МПа, в водонасыщенном состоянии – 13,1 МПа. Таким образом, в водонасыщенном состоянии снижение прочностных характеристик горных пород может достигать 50 % и более.

В горной практике для оценки снижения прочности водонасыщенных скальных и полускальных пород используется в основном соотношение прочностей на одноосное сжатие в естественно-сухом и водонасыщенном состояниях, то есть коэффициент размягчаемости. При снижении прочности на сжатие в водонасыщенном состоянии на 10 % порода считается водоустойчивой, на 20–30 % – пониженной водоустойчивости, на 50 % и более – слабой водоустойчивости. Согласно этому критерию, на Коневинском месторождении существенная часть пород имеет пониженную водоустойчивость. Известно, что размягчаемые

Таблица 4

Снижение прочностных свойств пород на обводненных участках
 локального растепления на Коневинском месторождении

Table 4

Decrease in rock strength properties in localized-thawing
 water-encroached zones (Konevinskoye deposit)

Прочностные свойства		Наименование породы		
		Березит	Гранодиорит	Березитизированный гранодиорит
В естественно- сухом состоянии	Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	15,27	18,06	15,98
	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	76,95	98,12	90,48
	Сцепление τ , МПа	21,8	27,5	25,27
В водонасыщенном состоянии	Предел прочности при растяжении σ_p , МПа	12,47	12,55	11,11
	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, МПа	71,35	76,58	41,71
	Сцепление τ , МПа	19,74	20,78	13,11
Снижение прочностных свойств в результате водонасыщения	Предел прочности при растяжении σ_p , %	22	32	30
	Предел прочности при сжатии $\sigma_{сж}$, %	9	25	54
	Сцепление τ , %	9	24	48

породы обладают пониженной морозостойкостью, то есть размягчаемость является косвенным признаком способности пород сопротивляться воздействию периодически замерзающей и оттаивающей воды. Поэтому обнажения размягчаемых горных пород в переходных зонах мерзлых пород в талые в случае их техногенного растепления быстро разрушаются.

Так, сравнительно недавно на Иркиндинском руднике при введении в эксплуатацию новых технологий (использование самоходного оборудования вместо электротранспорта) произошло локальное оттаивание ранее мерзлых горизонтов. На наиболее трещиноватых участках с видимыми прослоями льда резко понизилась устойчивость горных выработок, отмечены факты разрушения их кровли и стенок.

Учитывая то, что многие рудные месторождения в многолетнемерзлых поро-

дах обрабатываются системами с открытым очистным пространством, в техногенно растепленных участках повышается опасность лавинообразно формирующегося обрушения больших обнажений кровли очистных камер. В ранее устойчивых неудароопасных массивах становятся возможными проявления горных и горно-тектонических ударов.

Установлено, что на верхних горизонтах рудников, в мерзлых породах как прочность горных пород, так и устойчивость их обнажений повышается вследствие цементирующего фактора мерзлоты [1–9]. В переходных областях мерзлых пород в талые прочностные свойства пород, а следовательно, и устойчивость горных выработок и целиков значительно уменьшаются. При понижении горных работ до области талых пород при технологическом или сезонном растеплении горных выработок их устойчивость ухудшается.

Количественную оценку прочности массива горных пород в криолитозоне предлагается производить, корректируя исходные характеристики (предел прочности на одноосное сжатие, растяжение и др.) с помощью дифференцированного коэффициента структурного ослабления пород [1, 2, 4–6, 8, 15 и др.]. Используя эту методику, представляется возможным оценить коэффициенты запаса прочности горных пород при их различных обнажениях и определить допустимые техногенные напряжения в них.

Коэффициент структурного ослабления K_c для горных пород криолитозоны по этой методике предлагается определять с учетом дифференцированного поправочного коэффициента, учитывающего влияние отрицательных температур из выражения:

$$K_c = \frac{1}{0,53(l/l_{\text{бл}} + 1,175)} + 0,315 + \Delta,$$

где l – линейный размер оцениваемого на прочность участка массива, м; $l_{\text{бл}}$ – линейный размер структурного блока, м; Δ – дифференцированный поправочный коэффициент, учитывающий влияние отрицательных температур.

Величина l в этом случае равна максимальному линейному размеру

оцениваемого на устойчивость обнажения породы (стенки камеры, мощности целика, высоте выработки). Значения коэффициента Δ принимаются дифференцированно: для мерзлых пород – 0,4; переходных зон мерзлых пород в талые – 0,1–0,2; талых пород – 0.

Линейные размеры структурного блока $l_{\text{бл}}$ удобно оценивать по фотодокументации керна. Фотодокументированный керн является достоверным надежным источником первичной геологической информации о структуре массивов горных пород рудных месторождений.

Методика оценки размера структурного блока принимается следующая. Вначале по скважинам определяется интенсивность трещиноватости (удельная трещиноватость), выражаемая в количестве трещин на один погонный метр. Выделяется 5–10 статистически значимых классов, затем вычисляются средневзвешенное по массиву значение удельной трещиноватости и средневзвешенный размер структурного блока.

В качестве примера приведем оценку прочностных свойств массива горных пород для условий отработки верхних горизонтов Кедровского золоторудного месторождения (табл. 5, рис. 2).

Таблица 5

**Распределение удельной трещиноватости
в массиве горных пород Кедровского месторождения**

Table 5

**Distribution of specific rock fracturing
in the Kedrovskoye deposit**

Класс интенсивности трещиноватости, количество трещин на 1 м (от и до)		Распределение по классам, м	Распределение по классам, %
1	3	217	25
4	6	425	49
7	9	130	15
10	12	61	7
13	И более	35	4
Средневзвешенная по массиву интенсивность трещиноватости, количество трещин на 1 м		5,5	
Средний размер структурного блока, м		0,18	

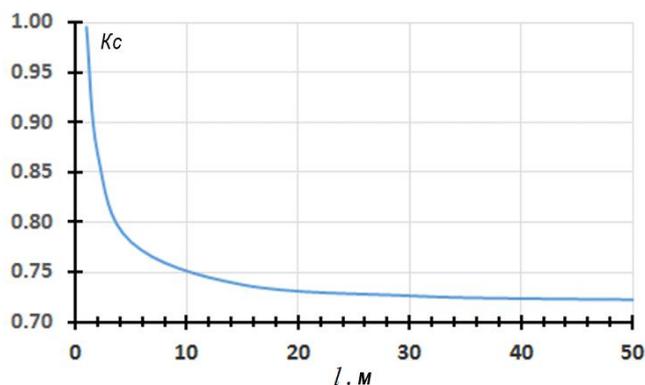


Рис. 2. Коэффициент структурного ослабления массива K_c многолетнемерзлых горных пород Кедровского месторождения при различных пролетах горных выработок и очистных камер l , м
Fig. 2. Structure slackening coefficient for the K_c permafrost rock mass (the Kedrovskoye deposit) at various spans of mine workings and treatment chambers l , m

Получены следующие характеристики параметров трещиноватости массива горных пород. Среднестатистическое значение интенсивности трещиноватости равно 5,54 трещин на один погонный метр, Среднее расстояние между трещинами (средний размер структурного блока) равно 18 см. Породы на действующих горизонтах мерзлые до глубин 250–300 м. Минимальный коэффициент структурного ослабления K_c равен 0,72 (см. рис. 2). Средняя прочность горных пород верхних горизонтов месторождения: на сжатие – 91,2 МПа, на растяжение – 19,7 МПа [3]. Таким образом, в наиболее неустойчивых условиях прочность массива на сжатие составит 65,7 МПа, на растяжение – 13,8 МПа. Естественно, при растеплении горных пород под действием природных или техногенных факторов прочность массива этих же горных пород значительно уменьшится.

Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

При разработке рудных месторождений, расположенных в криолитозоне, можно выделить три устойчивых типа геомеханических условий по криогенному состоянию пород: зона постоянной

мерзлоты, переходная зона мерзлых пород в талые и зона постоянно талых пород. Наиболее простые геомеханические условия наблюдаются в постоянно мерзлых породах. Лед цементирует горные породы, сами породы находятся в наиболее прочном естественно-сухом состоянии, природные напряжения соответствуют гидростатической гипотезе Гейма. Геомеханические условия в переходных зонах мерзлых пород в талые усложняются: появляется тектоническая составляющая природного напряженного поля, горные породы размягчаются под воздействием растаявшего льда, постепенно разрушаются от периодического фазового перехода воды из льда и обратно при температурном режиме, близком к 0 °С. В этих областях при оценке геомеханических условий необходимо учитывать как степень размягчаемости пород при водонасыщении, так и их морозостойкость. В постоянно талых породах из влияющих факторов остается только размягчаемость пород под действием воды.

В общем случае прочностные и деформационные свойства горных пород при оценке геомеханических условий рудных месторождений рекомендуется определять дифференцированно:

– для условий постоянной криолитозоны – в естественно-сухом состоянии пород;

– для условий переходных пород в талые – в водонасыщенном состоянии после не менее 25 циклов замораживания-оттаивания (согласно стандарту на испытания морозостойкости пород); такие результаты будут наиболее близки к производственным;

– для условий постоянно талых пород – в зависимости от гидрогеологических характеристик в естественно-сухом и водонасыщенном состоянии.

Переход от прочностных свойств горных пород в образцах к их свойствам в массиве предлагается производить на основе дифференцированного коэффициента структурного ослабления с учетом факторов мерзлоты, трещиноватости и геометрических размеров обнажений горных выработок [1, 4–6].

Оценку потенциальной удароопасности массивов горных пород и склонности горных пород к хрупкому разрушению

рекомендуется производить с учетом их криогенного состояния:

– для многолетнемерзлых пород – по прочностным свойствам, определенным в естественно-сухом состоянии;

– для талых пород – в водонасыщенном состоянии;

– для переходных зон мерзлых пород в талые – после соответствующей процедуры замораживания-оттаивания водонасыщенных пород.

В зависимости от решаемой инженерно-геомеханической задачи склонность пород к хрупкому разрушению рекомендуется оценивать на основе базовых методов: по критерию Г.Н. Кузнецова, по критерию запредельного деформирования или комбинированным способом.

По результатам исследований разработан ряд методических и нормативных документов по управлению горным давлением и определению параметров подземных геотехнологий для условий разработки рудных месторождений, расположенных в криолитозоне [15].

Библиографический список

1. Сосновский Л.И., Павлов А.М., Филонюк В.А., Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н., Рубцов Л.Г. Управление геомеханическими процессами при разработке наклонных жил в условиях многолетней мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. С. 77–83.

2. Сафьянов А.С., Сосновская Е.Л. Геомеханические условия массива горных пород Коневинского золоторудного месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 11 (94). С. 98–103.

3. Сосновская Е.Л., Авдеев А.Н. Прогноз потенциальной удароопасности Кедровского золоторудного месторождения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 11 (106). С. 50–56.

4. Павлов А.М., Семенов Ю.М. Управление горным давлением в криолитозоне при обработке наклонных маломощных жил на примере Ирокиндинского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 11. С. 30–34.

5. Семенов Ю.М. Температурный режим горного массива в криолитозоне на руднике «Ирокинда» // Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. С. 228–231.

6. Павлов А.М., Семенов Ю.М., Сосновский Л.И. Определение параметров устойчивых целиков и обнажений камер при разработке наклонных жил в криогенных зонах в условиях Ирокиндинского золоторудного месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 5. С. 142–147.

7. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов. Новосибирск: Наука, 1975. 175 с.

8. Разумов Е.А., Еременко В.А., Зяятдинов Д.Ф., Матвеев А.С., Гречишкин П.В., Позолотин А.С. Методика расчета параметров анкерной крепи подземных горных выработок в условиях вечной мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 9. С. 39–47.

9. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost // Proceedings of the 10th International symposium on cold regions development. Alaska, 2013. P. 175–190.

10. Kight G., Harris M., Gorski B., Udd J.E. Frozen backfill research for Canadian mines. Canada: Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994. 21 p.

11. Katsikadelis J.T. Boundary elements: theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2002. 336 p.

12. Wardle L.J., Crotty J.M. Two-dimensional boundary integral equation analysis for non-

homogeneous mining applications // Recent advances in boundary element methods. London: Pentech, 1978. P. 233–252.

13. Reddy J.N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004. 488 p.

14. Kattan P.I., Voyiadjis G.Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002. 113 p.

15. Неганов В.П., Сосновский Л.И., Сосновская Е.Л., Давиденко А.А. Опыт проектирования подземных рудников в ОАО «Иргиредмет» // Горный журнал. 2011. № 4. С. 16–18.

References

1. Sosnovskii L.I., Pavlov A.M., Filonyuk V.A., Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N., Rubtsov L.G. Control of geotechnical processes when mining inclined veins in permafrost conditions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2006, no. 11, pp. 77–83. (In Russ.).

2. Saf'yanov A.S., Sosnovskaya E.L. Geotechnical conditions of the Konevinskoe gold field. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2014, no. 11 (94), pp. 98–103. (In Russ.).

3. Sosnovskaya E.L., Avdeev A.N. Forecast of potential rock-burst hazard of Kedrovskoye gold mine. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. (106), pp. 50–56. (In Russ.).

4. Pavlov A.M., Semenov Yu.M. Control of rock pressure in permafrost when mining inclined low-thickness veins: Irokindinskoye field case. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2007, no. 11, pp. 30–34. (In Russ.).

5. Semenov Yu.M. *Temperaturnyi rezhim gornogo massiva v kriolitozone na rudnike «Irokinda»* [Temperature conditions of permafrost rock mass at "Irokinda" mine]. *Problemy osvoeniya mineral'noi bazy Vostochnoi Sibiri* [Development of Eastern Siberia's mineral resources]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2009, pp. 228–231. (In Russ.).

6. Pavlov A.M., Semenov Yu.M., Sosnovskii L.I. Evaluation of parameters of stable pillars and room roofs in underlay lode mining in cryogenic zones in terms of the Irokindinsky gold deposit. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2008, no. 5, pp. 142–147. (In Russ.).

7. Votyakov I.N. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva merzlykh i ottaivayushchikh gruntov* [Physical-mechanical properties of frozen and thawing soils]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1975, 175 p. (In Russ.).

8. Razumov E.A., Eremenko V.A., Zayatdinov D.F., Matveev A.C., Grechishkin P.V., Pozolotin A.C. Calculation of rock bolting parameters for mine roadways in permafrost rocks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin], 2013, no. 9, pp. 39–47. (In Russ.).

9. Cluff D.L., Kazakidis V.N. Opportunities and constraints of engineering frozen backfill for underground mining applications in permafrost. Proceedings of the 10th International symposium on cold regions development. Alaska, 2013, pp. 175–190.

10. Kight G., Harris M., Gorski B., Udd J.E. Frozen backfill research for Canadian mines. Canada: Canada Centre for Mineral and Energy Technology, 1994, 21 p.

11. Katsikadelis J.T. Boundary elements: theory and applications. Amsterdam: Elsevier, 2002, 336 p.

12. Wardle L.J., Crotty J.M. Two-dimensional boundary integral equation analysis for non-homogeneous mining applications. Recent advances in boundary element methods. London: Pentech, 1978, pp. 233–252.

13. Reddy J.N. An introduction to nonlinear finite element analysis. Oxford: Oxford University Press, 2004, 488 p.

14. Kattan P.I., Voyiadjis G.Z. Damage mechanics with finite elements: practical application with computer tools. Berlin: Springer, 2002, 113 p.

15. Неганов В.П., Сосновский Л.И., Сосновская Е.Л., Давиденко А.А. Experience of designing of underground mines at "IRGIREDMET" public corporation. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2011, no. 4, pp. 16–18. (In Russ.).

Критерии авторства / Authorship criteria

Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Болотнев А.Ю., Батжаргал Долгурсурэн написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Arkady N. Avdeev, Elena L. Sosnovskaya, Alexander Yu. Bolotnev, Batjargal Dolgorsuren are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Сведения об авторах / Information about the authors



Авдеев Аркадий Николаевич,

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Arkady N. Avdeev,

Cand. Sci. (Eng.),
Senior Researcher,
Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamina-Sibiryaka st., Yekaterinburg, 620075, Russia,
e-mail: avdeev0706@mail.ru



Сосновская Елена Леонидовна,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, 58, Россия,
e-mail: avdeev0706@mail.ru

Elena L. Sosnovskaya,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher,
Mining Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
58, Mamina-Sibiryaka st., Yekaterinburg, 620075, Russia,
e-mail: avdeev0706@mail.ru



Болотнев Александр Юрьевич,

кандидат технических наук,
технический руководитель лаборатории геомеханики и физики горных пород кафедры разработки месторождений полезных ископаемых,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: abolotnev@mail.ru

Alexander Yu. Bolotnev,

Cand. Sci. (Eng.),
Technical Director at the Laboratory of Geomechanics and Rock Physics,
Department of Mineral Deposit Mining,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: abolotnev@mail.ru



Батжаргал Долгорсурэн,
горный инженер,
аспирант,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: Doogii.do@mail.ru

Batjargal Dolgorsuren,
Mining Engineer,
Post-graduate student,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: Doogii.do@mail.ru

Уважаемые авторы!

Изложенные ниже требования к оформлению научных статей разработаны редакцией журнала и призваны помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать самых распространенных ошибок.

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;
- физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
- геоинформационные технологии в науках о Земле;
- технологии и техника буровзрывных работ;
- технологии и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
- технологии и техника обогащения и переработки минерального сырья;
- геммология;
- гидрогеология и инженерная геология;
- маркшейдерское обеспечение горных работ;
- безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
- геоэкология;

а также другие работы в рамках научного направления 25.00.00.

2. Статьи принимаются от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

3. Рекомендуемый объем статьи – примерно 20000 знаков, включая пробелы.

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 предоставляется два экземпляра в распечатанном виде на листах формата А4 по адресу: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ауд. Ж-04. 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. К статье прилагаются:

- электронная версия (скан) авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи, авторского договора и сопроводительного письма;
- акт экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
- сведения обо всех авторах на русском и английском языках: название вуза, организации, учреждения, должность и структурное подразделение, наличие ученой степени, ученого звания, контактные рабочий или мобильный телефоны (для связи), почтовый и

электронный адреса (просим Вас указать реальные и работающие адреса электронной почты индивидуально для каждого соавтора статьи);

– цветные портретные фотографии авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в электронной версии в формате *.JPG, формат фото – квадрат;

– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профиль в РИНЦ, профиль в ORCID, профиль в Scopus, профили в других системах цитирования, можно предоставить ссылку на личную страницу в Интернете, включая страницы в социальных сетях).

Обращаем Ваше внимание, что вся перечисленная выше информация публикуется в журнале в открытом доступе!

6. 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).

7. Аннотация по объему – до 200–250 слов, содержит следующие разделы: цель, методы, предмет, объект исследования, результаты, выводы. Аннотация должна отражать содержание статьи, поскольку для большинства читателей она будет главным источником информации о данном исследовании. Не ссылайтесь в аннотации на таблицы или рисунки, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не разрешены и ссылки на использованную литературу. Не используйте в аннотации формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул. Не повторяйте в аннотации фразы из текста статьи и ее заголовка. Убедитесь, что информация аннотации соответствует основному тексту статьи.

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 20. При этом самоцитирование автора не должно превышать 25 % от общего количества источников и полностью исключается самоцитирование журнала. Не допускаются ссылки на законы, государственные стандарты, положения, диссертации и авторефераты, учебники и учебные пособия, справочники, словари и энциклопедии, а также геологические карты (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 в системе РИНЦ, осуществив поиск по ключевым словам. Также в списке литературы должно быть не менее 30 % ссылок на иностранные источники.

13. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов, не сокращая их до 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.

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 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 источников на русском языке заканчивается указанием 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. Стоимость печатного авторского экземпляра журнала – 500 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: geo_info@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

Минералогическо-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, Россия

^бИркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

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-порфирового 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-щепнистые и щепнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щепнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щепнистых 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

Благодарности:

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, Russia

^бIrkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: Purpose. The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoye 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. **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

Acknowledgements:

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).

Сведения об авторах / Information about the authors



Фото
автора

Курчевская Елена Михайловна,
старший научный сотрудник,
НИиПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru

Elena M. Kurchevskaya,
Senior Researcher,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: kurchevskaya@tomsgroup.ru



Фото
автора

✉ **Яхно Марина Владиславовна,**
старший преподаватель кафедры геологии и геохимии полезных ископаемых,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ymar@istu.edu

Marina V. Yakhno,
Senior Lecturer of the Department of Geology and Geochemistry of Minerals,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
e-mail: ymar@istu.edu



Фото
автора

Сенченко Аркадий Евгеньевич,
генеральный директор,
НИиПИ «Технологии обогащения минерального сырья»,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83а, Россия,
e-mail: senchenko@tomsgroup.ru

Arkady E. Senchenko,
CEO,
Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”,
83a, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russia,
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

№ 2 (67) 2019

12+

Редактор Ф.А. Посысоева
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой
Перевод на английский язык Е.Н. Петровой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 27.06.2019 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 18,25.
Тираж 500 экз. Зак. 157. Поз. плана 4н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»,
адрес типографии: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

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