ISSN 2686-9993 (print)
ISSN 2686-7931 (online)
12+

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

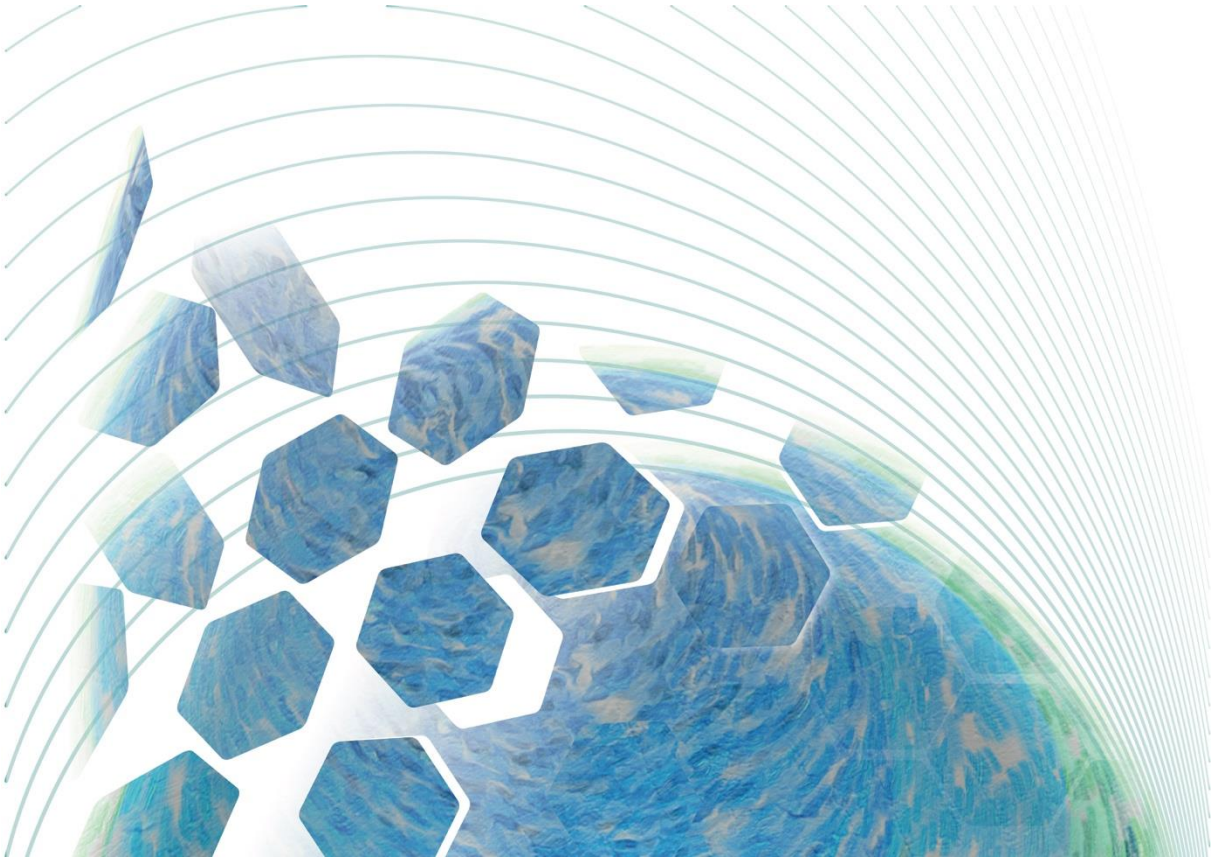
Том
Vol. 43 № 2 2020

# EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Том 43 № 2 2020
Vol.

# EARTH SCIENCES AND SUBSOIL USE



**Р е д а к ц и о н н ы й  с о в е т**

**Кузьмин М.И.**, академик РАН, Институт геохимии СО РАН (г. Иркутск, Россия)
**Гладкочуб Д.П.**, член-корр. РАН, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
**Скляров Е.В.,** 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)
**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)
**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)
**Ши Гуаньхай,** проф., Геммологический институт Китайского геологического университета (г. Пекин, Китай)
**Чжао Цзюньмэн,** проф., Институт изучения Тибетского плато Китайской академии наук (г. Пекин, Китай)
**Чжан Юнчжань,** проф., Нанкинский университет (г. Нанкин, Китай)
**Шигин А.О.,** д-р техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)
**Семинский К.Ж.,** д-р геол.-минерал. наук, Институт земной коры СО РАН (г. Иркутск, Россия)
**Корняков М.В.,** д-р техн. наук, доцент, ректор, Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
**Тимофеева С.С.,** д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
**Зелинская Е.В.,** д-р техн. наук, проф., Иркутский национальный исследовательский технический университет (г. Иркутск, Россия)
**Морин А.С.,** д-р техн. наук, проф., Сибирский федеральный университет (г. Красноярск, Россия)

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

**Р е д а к ц и о н н а я  к о л л е г и я**

*Главный редактор:*
**Лобацкая Р.М.**, д-р геол.-минерал. наук, проф., зав. кафедрой ювелирного дизайна и технологий, 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 «Науки о Земле и недропользование» имеет государственную регистрацию и **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, ВИНИТИ РАН. Журнал включен в научную электронную библиотеку CyberLeninka, в базы данных открытого доступа DOAJ, OAJI, в международный каталог периодических изданий Ulrich's Periodicals Directory, в базу данных EBSCO. Журнал распространяется по подписке в каталоге агентства ЗАО ИД «Экономическая газета» «Объединенный каталог. Пресса России. Газеты и журналы», подписной индекс – 41538 (ОК+ЭК) (адрес агентства ЗАО ИД «Экономическая газета»: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). Статьи, опубликованные в журнале, реферируются и рецензируются. В журнал принимаются статьи по научному направлению «Науки о Земле».

Журнал создан в 2004 г. на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых», который издавался с 1973 г. В 2004–2017 гг. журнал выходил под названием «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений», в 2017–2019 гг. – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых». В 2019 г. журнал переименован в «Науки о Земле и недропользование».

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 № ФС77-76110 от 24.06.2019 г.

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

© ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», 2020

**E d i t o r i a l  C o u n c i l**

**Kuzmin M.I.**, Academician of the Russian Academy of Sciences, 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)
**Sklyarov E.V.,** 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, SB RAS (Ulan-Ude, Russia)
**Korolkov A.T.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Irkutsk State University (Irkutsk, Russia)
**Makarov V.A.**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
**Ochir Gerel**, Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Professor, Mongolian University of Science and Technology (Ulan Bator, Mongolia)
**Talgamer B.L.**, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
**Shi Guanghai,** Professor, School of Gemmology, Institute of China University of Geosciences (Beijing, China)
**Zhao Junmeng,** Professor, Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (Beijing, China)
**Zhang Yongzhan,** Professor, Nanjing University (Nanjing, China)
**Shigin A.O.,** Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)
**Seminsky K.Zh.,** Dr. Sci. (Geol. & Mineral.), Institute of the Earth's Crust, SB RAS (Irkutsk, Russia)
**Kornyakov M.V.,** Dr. Sci. (Eng.), Rector, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
**Timofeeva S.S.,** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
**Zelinskaya E.V.,** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)
**Morin A.S.,** Dr. Sci. (Eng.), Professor, Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

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

**E d i t o r i a l  B o a r d**

*Editor-in-Chief*
**Lobatskaya R.M.**, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Professor, Head of the Jewelry Design & Technology 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, Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

The journal "Earth sciences and subsoil use" is officially registered and **is on the current List of publications on the main results of candidate's and doctoral theses, the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Russian Federation.** It is included in the Scientific Electronic Library (eLIBRARY.RU) in order to create the Russian Science Citation Index. It is circulated to the Russian Book Chamber and the All-Russian Institute for Scientific and Technical Information of the Russian Academy of Sciences. The journal is included in Cyber-Leninka (the scientific electronic library), DOAJ, OAJI (open-access databases), Ulrich's Periodicals Directory, and EBSCO database. It is distributed through the catalog of JSC "Economic Newspaper" Publishing House "The united catalog. Russian press. Newspapers and journals", the subscription index 41538 (OK+EC) (address of JSC "Economic Newspaper" Publishing House: 8 (499) 1520989; izdatcat@ideg.ru). The articles published in the journal are abstracted and peer-reviewed. The journal accepts articles related to the "Earth sciences" direction.

The journal was founded in 2004 on the basis of the Inter-university collected papers "Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits" that had been published since 1973. In 2004–2017, the journal was published under the title "Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits", and in 2017–2019, "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". Since 2019, the title of the journal is "Earth sciences and subsoil use".

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. FS77-76110 of June 24, 2019

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

© Federal State Budget Educational Institution of Higher Education "Irkutsk National Research Technical University", 2020

# С О Д Е Р Ж А Н И Е

**Содержание**..... 141

**Колонка главного редактора**..... 143

## Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых

**Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Дамдинова Л.Б., Избродин И.А., Рампилов М.О., Савченко А.А., Посохов В.Ф.** Флюорит-бастнезитовые породы Улан-Удэнского редкоземельного проявления – новый тип карбонатитов (Россия, Западное Забайкалье)..... 145

**Блинов А.В., Тарасова Ю.И.** Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан..... 160

**Иванов П.Ф., Хмельницкая Т.И.** Апокимберлиты реки Вакунайки: новые данные и перспективы..... 177

**Кобелев М.М., Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А.** Азимутальная анизотропия Саяно-Байкальской складчатой области по приемным функциям далеких землетрясений..... 194

## Разведка и разработка месторождений полезных ископаемых

**Кравченко А.А., Пашевин А.М., Лаврентьева А.Е.** Перспективы нефтегазоносности рифовых отложений на юге Вилюйской синеклизы по геофизическим данным..... 209

**Кокарев П.Н., Диких И.А.** Разделение коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения на литотипы с использованием материалов геофизических исследований скважин..... 220

**Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Бутакова Л.А.** Влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистых суспензий..... 230

## Геоэкология

**Тимофеева С.С., Дроздова И.В., Тимофеев С.С.** Современные требования к оценке профессиональных рисков на объектах золотодобычи..... 242

## Результаты полевых исследований

**Аузина Л.И., Чжан Юнчжань, Устюжанин А.О., Ярощук И.А., Масликов О.С., Ковтун К.К.** Условия формирования основных экзогенных процессов в юго-западной части Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточной части Южно-Китайского блока (Китай)..... 256

## Персоналия

**Корольков А.Т.** Человек дела (к 85-летию профессора Жана Вячеславовича Семинского)..... 271

**К сведению авторов**..... 277

# C O N T E N T S

**Contents**..... 142

**Chief Editor's Column**..... 144

## Geology, Prospecting and Exploration of Mineral Deposits

**Ripp G.S., Lastochkin E.I., Damdinova L.B., Izbrodin I.A., Rampilov M.O., Savchenko A.A., Posokhov V.F.** Fluorite-bastnaesite rocks of the Ulan-Ude rare earth occurrence as a new type of carbonatites: Western Transbaikalia, Russia..... 145

**Blinov A.V., Tarasova J.I.** Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit..... 160

**Ivanov P.F., Khmelnitskaya T.I.** Altered kimberlites of the Vakunaika river: new data and prospects..... 177

**Kobelev M.M., Khritova M.A., Mordvinova V.V., Kobeleva E.A.** Azimuthal anisotropy of the Sayan-Baikal fold region by the receiving functions of distant earthquakes..... 194

## Exploration and Development of Mineral Deposits

**Kravchenko A.A., Pashevin A.M., Lavrenteva A.E.** Oil-and-gas potential of the reef deposits in the Vilyuy syneclise south..... 209

**Kokarev P.N., Dikih I.A.** Division of the Parfenovsky horizon reservoirs in the Kovykta field into lithotypes using the well survey data..... 220

**Averkina E.V., Shakirova E.V., Butakova L.A.** Influence of flocculant reagents on the parameters of clay suspensions..... 230

## Geoecology

**Timofeeva S.S., Drozdova I.V., Timofeev S.S.** Modern requirements for occupational risk assessment at gold mining sites..... 242

## Results of Field Studies

**Auzina L.I., Zhang Yongzhan, Ustyuzhanin A.O., Yaroshchuk I.A., Maslikov O.S., Kovtun K.K.** Conditions of the formation of the main exogenous processes in the southwest part of the Baikal rift system (Russia) and in the eastern part of the south China block (China)..... 256

## Personalia

**Korolkov A.T.** Man of action: on the 85th anniversary of Professor Zhan Vyacheslavovich Seminsky..... 271

**Information for the Authors**..... 277

## Дорогие коллеги!

Мы продолжаем нашу работу, и, несмотря на форс-мажорные обстоятельства, вызванные пандемией, перед Вами очередной номер журнала с интересными, содержательными статьями по разным направлениям геологических исследований. Мы благодарим наших постоянных и новых авторов за сотрудничество и надеемся на дальнейшие плодотворные контакты на благо развития геологической науки. Все Вы присылаете нам продуманные и качественные статьи, однако без квалифицированной работы рецензентов они не смогли бы быстро дойти до читателей. Редколлегия журнала выражает рецензентам за их кропотливый труд особую благодарность.

Наше издание начало свой путь к читателям почти полвека назад под другим, актуальным на тот момент названием «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых». Годы шли, жизнь менялась – и углублялись задачи геологической науки, а вместе с тем расширялась и тематика издания, изменялось его название, корректировались рубрики. И вот в 2019 году оно был переименовано и теперь выходит как журнал «Науки о Земле и недропользование».

Корректировать и расширять тематику готового журнала – дело нужное, однако не слишком сложное. Оно никак не может сравниться с тем первым шагом, который был сделан в 1973 году и положил начало регулярно выходящему в свет периодическому изданию. Энтузиастам, стоящим у истоков любой инициативы, должно достать смелости и энергии для ее воплощения в жизнь на долговременную перспективу. Первопроходцам всегда нелегко!

Именно таким энтузиастом-первопроходцем, основателем нашего журнала является его первый – бессменный на протяжении 45 лет – главный редактор, а ныне председатель редакционного совета профессор Иркутского национального исследовательского технического университета Жан Вячеславович Семинский. Крупный ученый с огромным багажом не только научного, но и производственного опыта, он создал печатное издание, которое внесло значимый вклад как в развитие сибирской геологии, так и в подготовку высококвалифицированных кадров для производственных, научных и образовательных организаций обширного региона от Урала до Дальнего Востока.

11 мая Жану Вячеславовичу Семинскому – умному, деятельному человеку, талантливому ученому и педагогу – исполнилось 85 лет. Для людей склада, подобного нашему юбиляру, возраст не в счет. Он полон сил, занят своими творческими планами и их плодотворной реализацией в статьях и монографиях, как и подобает ученому такого ранга.

Этот номер журнала завершается статьей, написанной Алексеем Тихоновичем Корольковым, в которой он прослеживает творческий путь своего учителя, раскрывая перед нами разные грани его таланта. А мы, соратники юбиляра, продолжатели начатого Жаном Вячеславовичем дела, сердечно поздравляем его и желаем долгих, счастливых лет в науке и образовании!

**От имени редакционной коллегии**
**Лобацкая Раиса Моисеевна,**
**главный редактор**

## Dear colleagues!

We continue our work and in spite of the force majeure circumstances caused by the pandemic, we have prepared another issue of the journal with interesting and informative articles on different directions of geological research. We are thankful to our regular and new authors for their cooperation, and we hope to continue the fruitful contacts for the development of geological science. As the thought-through and quality articles that the authors submit could not reach the audience without the qualified work of the reviewers, the Editorial Board are especially thankful to the reviewers for their laborious work.

Our edition started its way to the readers almost half a century ago with the title “Geology, prospecting and exploration of ore mineral deposits” that was relevant at that time. Years were passing, the life was changing, the tasks of geological science were deepening, the subject matter of the edition was expanding, and its columns were being modified. So in 2019, the journal was renamed and now it is published under the tittle “Earths sciences and subsoil use”.

Editing and expanding the subject matter of the prepared journal is important but not so difficult. It cannot compare with the first step that was made in 1973 and initiated the publishing of a regular edition. The enthusiasts who were at the origin of an initiative should have enough courage and energy to make it a long-term. It is not an easy thing to be a pioneer!

Zhan Vyacheslavovich Seminsky, the founder of the journal, is such an enthusiastic pioneer. He has been Editor-in-Chief of the journal for 45 years, and he is currently Chairperson of the Editorial Board, Professor of Irkutsk National Research Technical University. A higher-level scientist with a huge research and production expertise, he established a print publication that contributed a lot to the development of Siberian geological science and training of the highly qualified specialists for the production, scientific and educational organizations in the vast region from the Urals to the Far East of Russia.

On May 11, 2020, Zhan Vyacheslavovich Seminsky had his 85$^{th}$ anniversary. For the people like Professor Seminsky, age does not count. He is full of power, busy with his plans and ideas and their fruitful realization in his articles and monographs, as befits a scientist of this level.

The present issue of the journal concludes with the article by Alexei Tikhonovich Korolkov who traces the scientific way of his teacher, uncovering the different facets of his talent. And we, the jubilee man’s associates, heartily congratulate professor Seminsky and wish him long and happy years in science and education!

**On behalf of the Editorial Board,**
**Raisa Moiseevna Lobatskaya,**
**Editor-in Chief**

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 552.331**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-145-159**

# Флюорит-бастнезитовые породы Улан-Удэнского редкоземельного проявления – новый тип карбонатитов (Россия, Западное Забайкалье)

**© Г.С. Рипп[a], Е.И. Ласточкин[b], Л.Б. Дамдинова[c], И.А. Избродин[d], М.О. Рампилов[e], А.А. Савченко[f], В.Ф. Посохов[g]**
[a–g]Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ, Россия

***Резюме:*** Целью работы является подтверждение магматической природы бастнезит-флюоритовых пород Улан-Удэнского проявления, представляющих собой специфический тип карбонатитов. Минералы были изучены с помощью электронной микроскопии, термометрии и анализа стабильных изотопов. Содержание флюорита и бастнезита в них нередко достигает 50 % (каждого). По времени образования (134,2±2,6 млн лет) данные породы близки к карбонатитам Западно-Забайкальской провинции. Температуры образования бастнезита и флюорита в них превышают 500 °С. В породах присутствуют фенокристы флюорита, бастнезита, тетраферрифлогопита. Кристаллизация их начиналась в промежуточном очаге. Матрица, сложенная тонкозернистым флюоритом с мелкими табличками бастнезита, формировалась в близповерхностных условиях и фиксируется закаленностью пород. Особенностью карбонатитов является «сухость» их расплава. Это определило крайне низкое проявление гидротермальных процессов, изменения ксенолитов и ранее образованных минералов. Свидетельством пониженной флюидонасыщенности является отсутствие во флогопите воды в позиции А, заполненной только фтором. Карбонатиты характеризуются повышенным содержанием сульфатов, представленных тенардитом, глауберитом, плюмбоярозитом, коркитом, присутствующих в составе солевых расплавов, выделившихся на поздней стадии кристаллизации расплава.

***Ключевые слова:*** флюорит, бастнезит, карбонатит, глауберит, плюмбоярозит

***Благодарности:*** Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Геологического института СО РАН (базовый проект IX.129.1.2, № АААА-А16-116122110027-2) и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-1014.2019.5).

***Информация о статье:*** Дата поступления 14 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 25 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Дамдинова Л.Б., Избродин И.А., Рампилов М.О., Савченко А.А. [и др.]. Флюорит-бастнезитовые породы Улан-Удэнского редкоземельного проявления – новый тип карбонатитов (Россия, Западное Забайкалье). *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 145–159. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-145-159

# Fluorite-bastnaesite rocks of the Ulan-Ude rare earth occurrence as a new type of carbonatites: Western Transbaikalia, Russia

**© German S. Ripp[a], Evgeny I. Lastochkin[b], Lyudmila B. Damdinova[c], Ivan A. Izbrodin[d], Mikhail O. Rampilov[e], Alena A. Savchenko[f], Viktor F. Posokhov[g]**
[a–g]Geological Institute, SB RAS, Ulan-Ude, Russia

***Abstract:*** The aim of the study is to show evidence confirm the magmatic nature of the bastnaesite-fluorite rocks of the Ulan-Ude occurrence that represent a specific type of carbonatites. The minerals have been studied using electron microscopy, thermometry, and analysis of stable isotopes. In many cases, the content of both fluorite and bastnaesite in the studied rocks reaches 50%. The rocks formation time (134.2 ± 2.6 Ma) is close to that of the carbonatites in the Western Transbaikalia province. The temperature of bastnaesite and fluorite formation in the rocks exceeds 500 C. The studied rocks contain phenocrysts of fluorite, bastnaesite, and tetraferriflogopite. Their crystallization began in the intermediate focus. The fine-grain fluorite matrix with small bastnaesite scales was formed in near-to-the-surface conditions and fixed by the hardening of the rocks. The carbonatites feature melt “dryness”, which determines an extremely low occurrence of the hydrothermal processes, changes in the xenoliths

and previously formed minerals. The low fluid saturation level is confirmed by the absence of phlogopite water in position A, filled with fluorine only. The carbonatites are characterized by a higher content of sulfates represented by tenardite, glauberite, plumbojarosite, and corkite that are present in the composition of the salt melts released at the later stage of the melt crystallization.

***Keywords:*** fluorite, bastnaesite, carbonatite, glauberite, plumboyarozite

***Acknowledgements:*** The study has been conducted within the framework of the Fundamental Research Program of the Geological Institute, SB RAS (base project IX.129.1.2, № АААА-А16-116122110027-2) and with a financial support of the Presidential grant of the Russian Federation (МК-1014.2019.5).

***Information about the article:*** Received April 14, 2020; accepted for publication May 25, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Ripp GS, Lastochkin EI, Damdinova LB, Izbrodind IA, Rampilov MO, Savchenko AA., et al. Fluorite-bastnaesite rocks of the Ulan-Ude rare earth occurrence as a new type of carbonatites: Western Transbaikalia, Russia. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):145–159. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-145-159

## Введение

Улан-Удэнское рудное проявление находится в пределах г. Улан-Удэ в бортовой части р. Селенги. Оно состоит из трех участков. Один из участков был обнаружен при проходке траншеи для коммунальных коммуникаций, два других – в котлованах строящихся домов и береговом обнажении. Изначально, подобно большинству описанных в литературе карбонатитов с флюоритом и редкоземельной минерализацией, проявление было отнесено к гидротермальному типу [1]. После получения первых результатов термобарогеохимического изучения [2] было высказано предположение о карбонатитовой природе изученных пород. Более детальное термобарогеохимическое изучение проявления привело к выводу о магматическом происхождении флюорит-бастнезитовых пород. В дополнение к приведенным материалам [2] в статью включена информация о специфике сульфатной минерализации и некоторым аспектам образования пород.

Проявление расположено в пределах эрозионного окна в позднемезозойских (юрских) терригенных отложениях. Фрагменты вскрытых коренных выходов ограничены, имеют площадь 300×200 м$^2$. Позднемезозойские отложения выполняют котловину рифтогенной впадины, обрамленную с севера ультраметаморфическим комплексом пород, сложенных гнейсами, кристаллическими сланцами. Возраст подобных биотит-амфиболовых гнейсов в северном борту впадины равен 282 млн лет [3]. По данным Rb-Sr геохронологического изучения в период 277–314 млн лет они были прорваны гранитами и гнейсо-гранитами[1]. Южный борт впадины обрамлен позднепалезойскими гранитами.

В пределах эрозионного окна распространено две группы пород. Западную часть его слагают биотитовые гнейсы, кристаллические сланцы, восточную – разнозернистые брекчии, образованные по метаморфическим породам. Гнейсы сложены плагиоклазом (олигоклаз № 18) и биотитом. В качестве редких и акцессорных минералов присутствуют магнетит, апатит, циркон, роговая обманка, титанит. Полоса брекчий вытянута вдоль восточного борта р. Селенги. Эти разнообломочные породы в смеси с гнейсами интенсивно альбитизированы, биотитизированы, калишпатизированы. Ширина зоны брекчий достигает 50 м. К восточной части тектонической зоны приурочены участки с флюорит-бастнезитовым оруденением. Эта ассоциация в основном слагает цемент брекчированных пород. Количество обломочного материала варьирует в широком диапазоне (рис. 1). Размер обломков колеблется

[1] Платов В.С., Савченко А.А., Игнатов А.М., Гороховский Д.В., Шор Г.М., Алексеенко В.Д. [и др.]. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000 000 (третье поколение). Алдано-Забайкальская серия. Лист М-48 – Улан-Удэ. Объяснительная записка. 2009. 271 с.

от долей миллиметра до десятков сантиметров. В пределах ассоциации встречаются маломощные (до нескольких десятков сантиметров) тела массивных карбонатитов. Матрица породы сложена тонкозернистым флюоритовым агрегатом, в котором неравномерно распределены фенокристы бастнезита, флюорита и флогопита. В матрице флюорита рассеяны мелкие таблитчатые кристаллы поздней генерации бастнезита. Образование карбонатитов (Ar/Ar, флогопит) произошло в период 134,2±2,6 млн лет.

## Материалы и методы исследований

Изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите определены в ЦКП «Аналитический центр минералого-геохимических и изотопных исследований» Геологического института СО РАН, г. Улан-Удэ (аналитик В.Ф. Посохов). Карбонаты были разложены ортофосфорной кислотой с использованием опции Gasbench при температуре 60–70 °С в течение 2–4 ч. Измерения проведены на масс-спектрометре Thermo Finnigan MAT 253 в режиме постоянного потока гелия. Калибровка для карбонатов проведена по стандартам NBS-18, NBS-19. Величины $\delta^{13}C$(PDB) и $\delta^{18}O$(SMOW) определены с погрешностью ±0,05 и ±0,1 ‰ (1σ) соответственно.

Микроструктурные особенности, взаимоотношения и однородность минералов изучались на электронном микроскопе LEO-1430 с энергодисперсионным спектрометром Inca Energy-300 Е.А. Хромовой.

Флюидные включения в минералах исследовались методами термометрии. Для определения температур гомогенизации, температур эвтектики и плавления льда водных растворов, температур растворения дочерних фаз использовалась микротермокамера THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений от -196 до +650 °С. Стандартная аппаратурная ошибка измерений составляет ±0,1 в отрицательной и ±5 °С в положительной области температур.

## Результаты исследований

*Минеральный состав карбонатитов.* В составе карбонатитов установлено около двух десятков минеральных видов. Главными из них являются бастнезит и флюорит. Количество бастнезита обычно составляет 20–40 %, иногда достигает 50 %. Установлено четыре временных стадии образования этого минерала. Наиболее ранняя из них представлена фенокристами размером до 0,5–1 см, содержащими большое количество включений образовавшихся минералов (рис. 2, 3). В их составе присутствуют флогопит, калиевый полевой шпат, альбит, циркон, ильменит, рутил. Матрица на этой стадии была обогащена силикатными минералами (флогопиом, калишпатом, альбитом). Второй тип бастнезита

***Рис. 1. Типичное строение брекчиевых пород Улан-Удэнского редкоземельного проявления***
*(темное – тонкозернистая флюоритовая матрица)*
***Fig. 1. Typical structure of the breccia rocks, the Ulan-Ude rare earth occurrence***
*(dark is a fine-grain fluorite matrix)*

образовался позднее и также представлен фенокристами. Зерна его обычно катаклазированы (см. рис. 2, 3). Третий тип фенокристов сопровождается сульфатными минералами (тенардит, коркит, плюмбоярозит, глауберит), присутствующими в составе солевых расплавных включений. В завершающую стадию в мелкозернистой флюоритовой матрице образовалось большое количество мелких таблитчатых кристаллов бастнезита (см. рис. 2, *e*), не содержащих включений других минералов. В фенокристах бастнезита, а также в монаците (см. рис. 3, *c*) участками присутствует до 3 % $ThO_2$, что привело к облучению флюорита и появлению фиолетовой окраски этого минерала. Ни в одном случае в наблюдавшихся зернах бастнезита не установлено замещения вторичными минералами. В них до десятых долей процента присутствует кальций. Автономно в виде одиночных таблитчатых кристаллов среди флюорита встречен паризит (см. рис. 2, *f*).

Флюорит представлен двумя морфологическими типами. Один из них слагает фенокристы размером до 0,5–1,5 см. Кроме флогопита он не содержит включений других минералов. Внешняя оболочка зерен его в результате радиоактивного облучения имеет темно-фиолетовую (до черной) окраску. Ширина зоны обычно менее 1 мм. Второй тип флюорита слагает матрицу карбонатита. Количество его достигает 40–50 %, а размер зерен варьирует от долей миллиметра до 1–1,5 мм. В нем рассеяны зерна бастнезита, флогопита, полевых шпатов. В результате радиоактивного облучения флюорит приобрел неравномерную темно-фиолетовую окраску.

Флогопит относится к числу типоморфных минералов карбонатитов. Он сопровождает ассоциации от начальных до завершающих стадий образования пород, распространен в околоконтактовых ореолах минерализованных брекчий, а вдоль контактов жил карбонатитов слагает зоны ослюденения (фенитизация) мощностью до 1–3 см. Флогопит сопровождает фенокристы флюорита, бастнезита, присутствует в составе флюоритовой матрицы, в том числе в виде достаточно крупных таблитчатых фенокристов. Кроме того, встречаются скопления мелкочешуйчатых агрегатов. Большая часть минерала относится к тетраферрифлогопиту, содержащему до 18 % MgO, пониженные количества FeO (6–10 %) и $Al_2O_3$ (7–10 %). Ранние генерации минерала характеризуются более высокими содержаниями MgO (до 20 %). Минерал не содержит в своем составе кристаллизованной воды, а позиция A полностью заполнена фтором (до 7–8 масс. %).

Среди сульфатов наиболее распространены плюмбоярозит и глауберит. Реже встречаются ярозит, тенардит, коркит. Все они выделились на поздней стадии кристаллизации расплава. Глауберит встречен в виде изометричных включений в бастнезите (см. рис. 3, *a*). Агрегаты его сложены таблитчатыми зернами. С ним ассоциирует тенардит. В составе глауберита постоянно отмечаются примеси стронция (0,35–2,6 %), калий (0,2–0,4 %), хлор (0,5–1,26 %), фтор (1,5–3,5 %).

Ярозиты являются наиболее распространенными сульфатами. Они представлены в основном плюмбоярозитом, собственно ярозит встречается редко. Состав плюмбоярозита неоднороден. Содержание свинца в нем колеблется от 5,5 до 21,3 %. В большинстве проб присутствует $P_2O_5$, количество которого в отдельных случаях достигает нескольких процентов. Включения плюмбоярозита в бастнезите имеют овальную, изометричную форму (см. рис. 3, *b–d*), сложены агрегатами таблитчатых кристаллов (см. рис. 3, *c*) иногда в ассоциации с коркитом. Во включениях с ним отмечается захваченный из матрицы мелкозернистый флюорит. Нередко во флюоритовой матрице плюмбоярозит слагает шлиры размером до 1–2 см (см. рис. 3, *d*). Он цементирует дробленные участки карбонатитов (см. рис. 3, *e–f*).

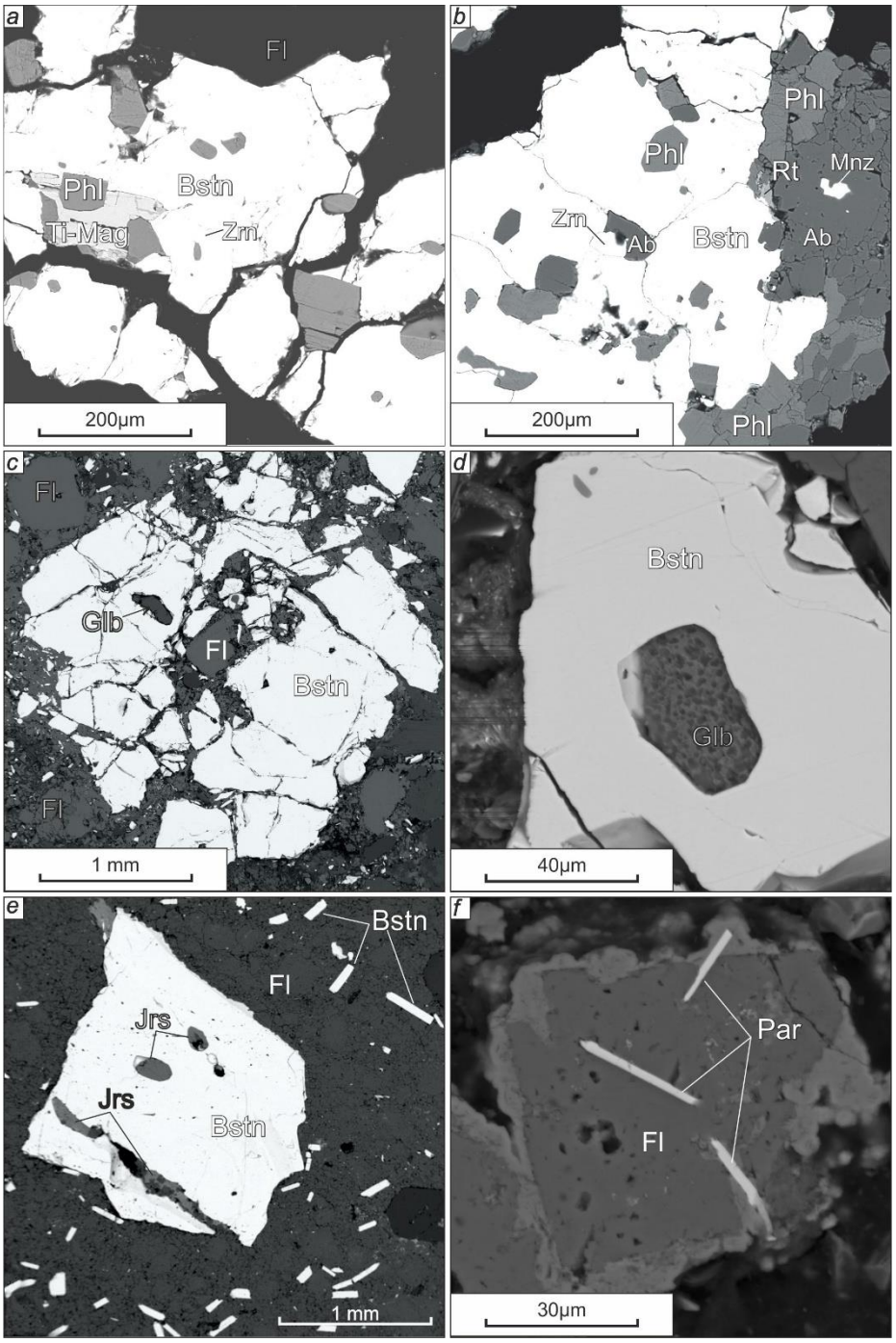



***Рис. 2. Характер выделений редкоземельной минерализации Улан-Удэнского проявления:***
*a, b – фенокристы бастнезита ранней стадии формирования карбонатитов: c – дробленный фенокрист бастнезита, сцементированный тонкозернистой флюорит-бастнезитовой матрицей; d – фенокрист бастнезита промежуточной стадии кристаллизации с включением глауберита; e – фенокрист бастнезита в агрегате тонкозернистого флюорита и таблитчатых кристаллов бастнезита; f – таблитчатые кристаллы паризита в агрегате флюорита: Ti-Mag – титаномагнетит, Zrn – циркон, Ab – альбит, Mnz – монацит, Bstn – бастнезит, Phl – флогопит, Glb – глауберит, Jrs – ярозит, Rt – рутил, Fl – флюорит, Par – паризит*

***Fig. 2. The nature of the of rare-earth mineralization discharge, the Ulan-Ude occurrence:***
*a, b – bastnaesite phenocrysts, the early stage of carbonatite formation; c – crushed bastnaesite phenocryst cemented with a fine-grain fluorite-bastnaesite matrix; d – bastnaesite phenocryst, the intermediate crystallization stage with the inclusion of glauberite; e – bastnaesite phenocryst in the aggregate of the fine-grain fluorite and scaly bastnaesite; f – scaly crystals of parisite in the fluorite aggregate: Ti-Mag – titan-magnetite, Zrn – zircon, Ab – albite, Mnz – monazite, Bstn – bastnaesite, Phl – phlogopite, Glb – glauberite, Jrs – jarosite, Rt – rutile, Fl – fluorite, Par – parisite*

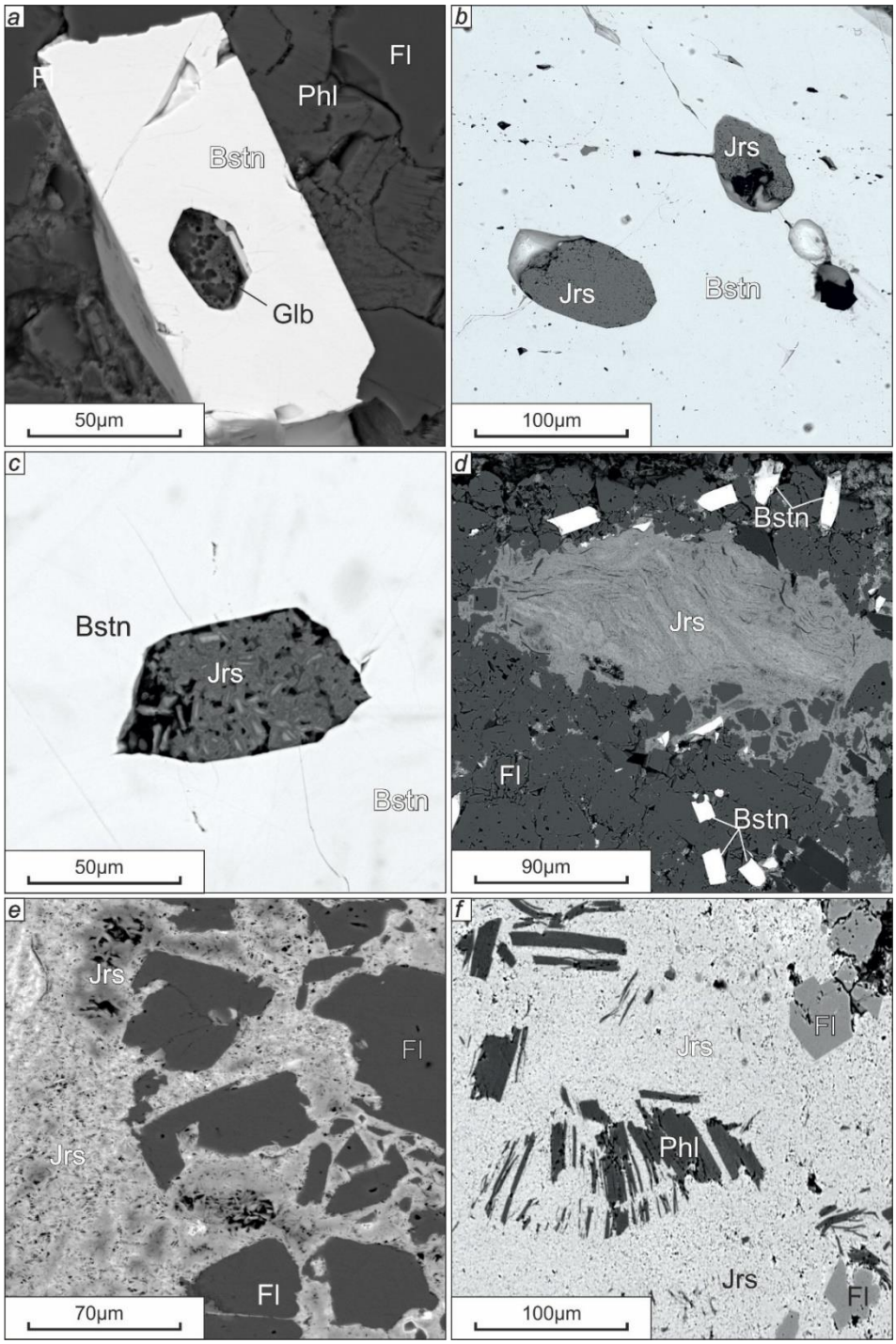



***Рис. 3. Характер выделений сульфатных минералов в карбонатитах:***
*a – фенокрист бастнезита с включением глауберита (темное – мелкозернистая флюоритовая матрица); b – включения плюмбоярозита в фенокристе бастнезита; c – агрегат мелкотаблитчатых кристаллов плюмбоярозита в фенокристе бастнезита; d – шлировое скопление плюмбоярозита во флюоритовой матрице; e – дробленный мелкозернистый карбонатит, сцементированный плюмбоярозитом; f – дробленные участки флогопита и флюорита, сцементированные плюмбоярозитом: Fl – флюорит, Phl – флогопит, Bstn – бастнезит, Glb – глауберит, Jrs – ярозит*

***Fig. 3. The nature of the sulfate mineral precipitation in carbonatites:***
*a – bastnaesite phenocryst with the inclusion of glauberite (dark is a fine-grain fluorite matrix; b – inclusion of plumbojarosite in the bastnaesite phenocryst; c – aggregate of fine-scale crystals of plumbojarosite in the bastnaesite phenocryst; d – schlieren accumulation of plumbojarosite in the fluorite matrix; e – crushed fine-grain carbonatite cemented by plumbojarosite; f – crushed sections of phlogopite and fluorite cemented by plumbojarosite: Fl – fluorite, Phl – phlogopite, Bstn – bastnaesite, Glb – glauberite, Jrs – jarosite*

Коркит встречается совместно с плюмбоярозитом в участках, обогащенных монацитом. Во включениях бастнезита он слагает агрегаты таблитчатых зерен вместе с плюмбоярозитом.

*Последовательность минералообразования.* Последовательность образования минералов показана на рис. 4. Начало кристаллизации карбонатита возникало в промежуточном очаге, фиксируется присутствием фенокристов бастнезита, флюорита и флогопита. В это время вместе с ними образовались циркон, флогопит, ильменит, рутил, альбит, калиевый полевой шпат (см. рис. 4). При перемещении расплава на верхний уровень часть фенокристов была дроблена и цементировалась тонкозернистой бастнезит-флюоритовой матрицей (см. рис. 2, *c*). Бастнезит, образовавшийся позднее, содержит только включения флогопита. В еще более поздних бастнезитах фиксируются включения сульфатных минералов. Образование карбонатитов завершилось мелкозернистым флюоритом с рассеянными таблитчатыми кристаллами поздней генерации бастнезита. (см. рис. 2, *e*). Образование флогопита происходило в течение всего периода кристаллизации расплава. Наиболее ранним являются околоконтактовые фенитоподобные образования. На поздней стадии произошло выделение сульфатных минералов.

*Геохимические особенности пород.* Изотопные составы кислорода и углерода бастнезита, ограниченные полем квадрата первичных магматических карбонатитов (PIC) (рис. 5), свидетельствуют об их глубинном происхождении.

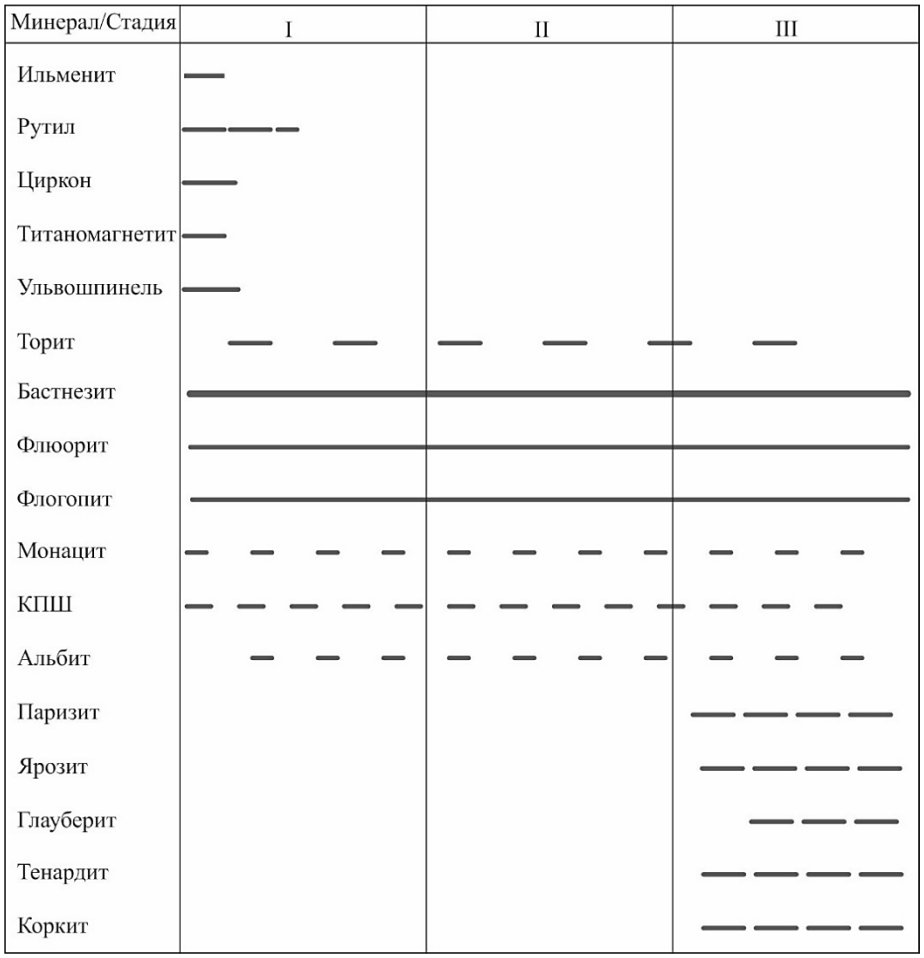



***Рис. 4. Последовательность формирования минералов в карбонатитах Улан-Удэнского редкоземельного проявления***
***Fig. 4. Sequence of mineral formation in the carbonatites of the Ulan-Ude rare earth occurrence***

В большинстве случаев их значения не выходят за пределы этого поля, отклонение может быть вызвано влиянием поздних постмагматических процессов. Составы редкоземельных элементов флюорит-бастнезитовых руд мало отличаются от составов в позднемезозойских карбонатитах Западно-Забайкальской провинции [2]. Особенностью пород является повышенная радиоактивность (20–50 мкР/ч), связанная с присутствием тория в бастнезите, монаците и вкрапленности торита.

*Результаты термобарогеохимического изучения.* На проявлении проведено термобарогеохимическое изучение минералов разновременных стадий кристаллизации. Были изучены первичные включения в фенокристах бастнезита и флюорита начальной стадии и флюорите из матрицы завершающего этапа. Установлены расплавные, кристаллофлюидные и газово-жидкие включения. В бастнезите изучены расплавные включения размером от 7 до 25 мк (рис. 6, *а–с*). Форма включений овальная, изометричная, иногда в виде неправильного многоугольника. Встречаются как одиночные включения, так и включения в виде групп. Включения содержат газовую (25–30 %) и твердую (70–75 %) фазы. Нередко газовый пузырь во включениях отсутствует. Минеральная фаза наблюдается в виде кристалликов неправильной формы, при прогреве включений часть из них растворяется при температуре 220–240 °С. При нагреве включений в фенокристах бастнезита минерал-хозяин начинал темнеть при температурах ≥450 °С, в связи с этим видимость становилась нулевой и эксперименты завершались. При этом объем нерастворившейся газовой фазы составлял 80–85 %.

Для установления температуры образования этого минерала нами использован титаномагнетит (около 15 % титана), присутствующий в бастнезите. Известные результаты изучения титаномагнетитов [5–7] из быстро остывавших пород показали корреляцию температур с содержанием титана в них. Расчет температуры образования такого магнетита в нашем случае показал 630 °С, что, вероятно, соответствует реальной температуре образования бастнезита.

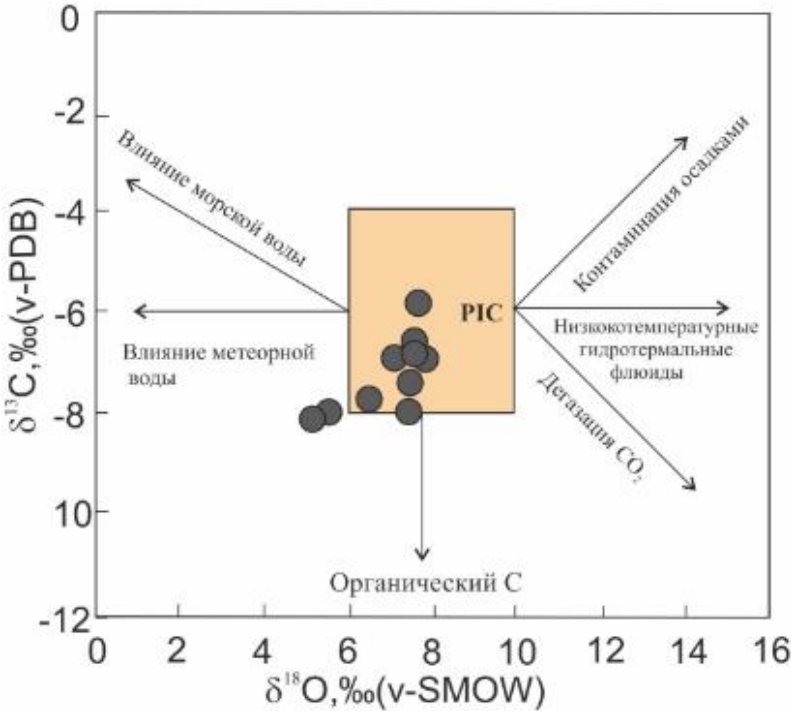



***Рис. 5. Изотопные составы кислорода и углерода в бастнезитах Улан-Удэнского проявления***
*Поле PIC и тренды вовлечения вещества различных источников представлены по работе [4]*
***Fig. 5. Isotopic compositions of oxygen and carbon in the bastnaesites, the Ulan-Ude occurrence***
*PIC field and trends in substance involvement are represented according to [4]*

Фенокристы флюорита, образованные на ранней стадии кристаллизации, имеют размер от 0,5 до 1,5 см. В них установлены первичные включения размером от 2–3 до 30 мк (рис. 6, *d–f*). Отмечаются как единичные включения, так и их группы. Количество газовой фазы в них составляет 15–25 %, количество минеральной фазы, представленной соприкасающимися зернами изометричной формы, достигает 55–65 %. При нагревании до 580 °С во включениях сохраняется нерастворенная газовая фаза (60–70 %). Гомогенизация некоторых включений происходит при ≥565–80 °С. Растворение твердых минеральных фаз отмечается при температурах ≥250–350 °С, в одном случае – при температуре 450 °С.

Флюорит, слагающий матрицу карбонатита, имеет темно-фиолетовую окраску, что затрудняет поиск пригодных включений, размер зерен флюорита обычно не более 1 мм. Включения в нем встречаются редко, имеют, как правило, изометричную или вытянутую форму (рис. 6, *g–i*). Их размер варьирует от 8 до 20 мк. В этих включениях присутствуют зерна твердой фазы. При термометрических экспериментах эти включения нагревались до 580 °С, при этом объем газового пузыря уменьшился всего на 10–20 %. Гомогенизация некоторых включений зафиксирована в диапазоне ≥450–550 °С. Растворение твердой фазы происходило при 300–350 °С.

Редко в некоторых зернах флюоритов встречаются газово-жидкие включения (рис. 6, *j–l*). Некоторые из них содержат твердые фазы, размер таких включений варьирует в основном в пределах 5–8 мк, редко достигает 15–17 мк. Форма их чаще изометричная, прямоугольная, реже вытянутая. При нагревании до ≥290–350 °С часть включений декрепитировала, в отдельных включениях при 345 °С зафиксирована гомогенизация.

## Обсуждение результатов

Особенностью пород Улан-Удэнского проявления является высокая концентрация флюорита, достигающая 50 %, а в некоторых участках – более 50 %. Присутствие флюорита в карбонатитах – явление достаточно распространенное. Этот минерал нередко сопровождается редкоземельной минерализаций. Случаи экстремально высоких содержаний флюорита в карбонатитах достаточно редки. К ним относятся карбонатиты Большетагнинского месторождения [8–10], месторождений Мато Прето [11], Галлинас Маунтинс [12], Кызылджоарен [13], Амба Донгар [14], Спива [15]. Из всех вышеперечисленных месторождений по данным термометрического изучения магматические температуры установлены для месторождений Большетагнинское и Мато Прето [11]. Известные в природных объектах бастнезитсодержащие карбонатиты вместе с ассоциирующим флюоритом обычно идентифицируются как гидротермалиты [12, 16–18]. По составу, близкому к Улан-Удэнскому проявлению, в бастнезит-флюоритовых месторождениях Галлинас Маунтинс и Кызылджоарен отмечена высокая роль гидротермальных процессов.

Нужно полагать, высокие концентрации флюорита на Улан-Удэнском проявлении обусловлены специализацией региона. Здесь в позднем мезозое сформировался Центрально-Азиатский флюоритоносный пояс с сотнями эпитермальных кварц-флюоритовых проявлений и месторождений. В мезозое также образовались флюорит-фенакит-бертрандитовые месторождения (Ермаковское, Ауник, Амандак) с содержанием 20–70 % флюорита, молибден-вольфрамовые месторождения (Джидинское, Булуктаевское) с рудами и метасоматитами, содержащими до 10–15 % флюорита. В количестве до 5–10 % флюорит присутствует в некоторых позднемезозойских карбонатитах месторождений (Аршан, Южное, Жарчиха).

Магматическое происхождение, как и карбонатный состав, является главным признаком принадлежности пород к карбонатитам. Роль карбонатного компонента в нашем случае выполняет бастнезит.

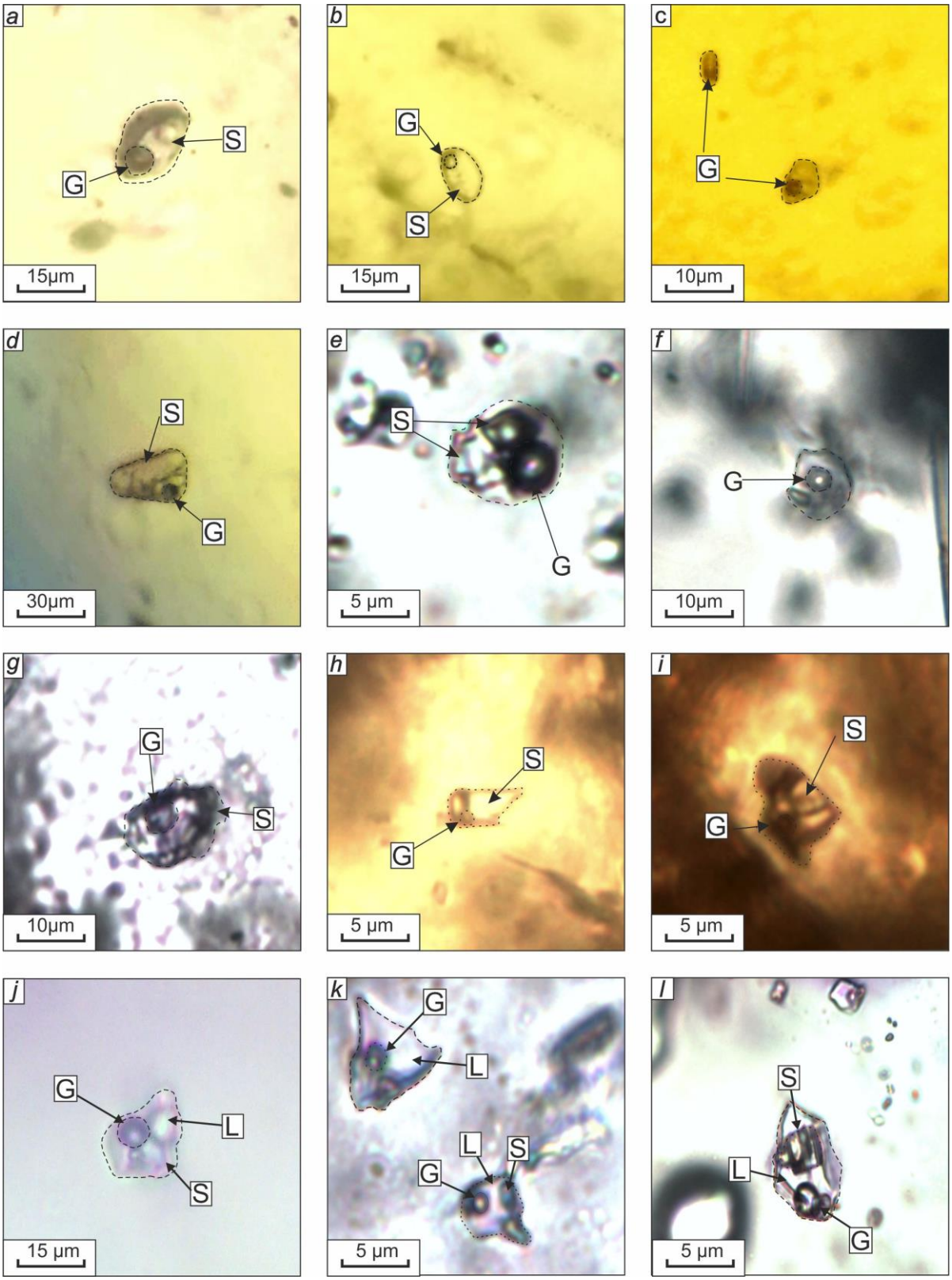



***Рис. 6. Первичные включения бастнезита (a–c), флюорита (d–f) и флюоритов из тонкозернистой матрицы карбонатита (g–i) в фенокристах; газово-жидкие включения (j–l) во флюоритах:***
*G – газовая фаза; S – твердая фаза; L – жидкая фаза*

***Fig. 6. Primary inclusions in the phenocrysts: bastnaesite (a–c), fluorite (d–f), and fluorites from the fine-grain carbonatite matrix (g–i); gas-liquid inclusions (j–l) in fluorites:***
*G is a gas phase; S is a solid phase; L is a liquid phase*

Температуры, полученные при термобарогеохимических исследованиях, соответствуют заключению о принадлежности изученных пород к карбонатитам. Геохимические особенности пород, изотопные составы кислорода и углерода в бастнезите, состав редкоземельных элементов [2] также соответствуют этому предположению. Тонкая зернистость минералов матрицы свидетельствует об их быстрой кристаллизации, связанной с близповерхностными условиями образования.

Текстурно-структурные особенности пород свидетельствуют о формировании их в двух очагах. На раннем более глубинном этапе формировались крупнозернистые минералы (фенокристы бастнезита, флюорита, флогопита). Образование флюоритовой тонкозернистой матрицы происходило в близповерхностных условиях.

Особенностью карбонатитов является «сухость» карбонатитового расплава. Ксенолиты и ранее образованные минералы в них не несут сколько-нибудь заметных гидротермальных изменений. О низкой концентрации флюида свидетельствует отсутствие его в позиции А флогопита, полностью заполненной фтором. Газово-жидкие включения не характерны как для флюорита, так и для бастнезита.

Уменьшение концентрации флюида на поздней стадии частично было связано с содержанием в расплаве лигандов плюмбоярозита. Это соединение при температурах выше 370–400 °С не содержит воду [19], а при понижении температуры поглощает ее из расплава. Значения изотопных составов кислорода и углерода бастнезита, не выходящие за пределы квадрата PIC, также свидетельствуют об отсутствии выделения флюидной фазы и вовлечения ее из других источников.

Как и в карбонатитах Западного Забайкалья [20], в породах Улан-Удэнского проявления повышены содержания сульфатной серы. Помимо сульфатных минералов (глауберит, ярозит, коркит) сера присутствует в апатите (4,2 %), монаците (3–4 %). Наличие сульфатной фазы предполагает повышенную фугитивность кислорода при образовании пород. Характер выделений сульфатов свидетельствует о присутствии их в виде солевых расплавов, включений в бастнезите и агрегатных скоплений во флюоритовой матрице. Сульфаты начинали появляться на более поздней стадии кристаллизации расплава, сегрегируясь в автономные скопления. На завершающей фазе они цементировали дробленные участки ранее образованных карбонатитов.

## Заключение

Минеральный состав, геохимические особенности, высокие температуры позволили доказать принадлежность изученных пород к карбонатитам. Их структурно-текстурные особенности свидетельствуют о формировании в двух резервуарах. Начало кристаллизации протекало в промежуточном очаге, где произошел рост фенокристов флюорита, бастнезита, флогопита. Перемещение расплава к верхним горизонтам сопровождалось брекчированием, цементацией раскристаллизованных фрагментов расплава мелкозернистой матрицей. Особенностью карбонатитов является присутствие повышенных концентраций сульфатов. Последние образовались на поздней стадии кристаллизации. Особенностью карбонатитов является также «сухость» их расплава, определившая «ущербность» гидротермальных процессов, замещения вмещающих пород и ранее выделившихся минералов.

**Библиографический список**

1. Рипп Г.С., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Дорошкевич А.Г., Хромова Е.А. Новый тип редкоземельного оруденения в Западном Забайкалье // Отечественная геология. 2018. № 3. С. 9–21.

2. Рипп Г.С., Прокопьев И.Р., Избродин И.А., Ласточкин Е.И., Рампилов М.О., Дорошкевич А.Г. [и др.]. Бастнезит-флюоритовые породы Улан-Удэнского проявления (минеральный состав, геохимические особенности, проблемы

генезиса) // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 12. С. 1754–1774. https://doi.org/10.15372/GiG2019122

3. Рипп Г.С., Дорошкевич А.Г., Ласточкин Е.И., Избродин И.А. Изотопно-геохимические особенности пород Ошурковского апатитоносного массива (Западное Забайкалье) // Геохимия. 2014. № 4. С. 302–318. https://doi.org/10.7868/S0016752514020071

4. Demeny A., Sitnikova M.A., Karchevsky P.I. Stable C and O isotope compositions of carbonatite complexes of the Kola Alkaline Province: phoscorite-carbonatite relationships and source compositions // Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province / eds. F. Wall, A.N. Zaitsev. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland, 2004. P. 407–431.

5. Рамдор П. Рудные минералы и их срастания / пер. с нем. М.: Издательство иностранной литературы, 1962. 1132 с.

6. Charilaou M., Löffler J.F., Gehring A.U. Fe-Ti-O exchange at high temperature and thermal hysteresis // Geophysical Journal International. 2011. Vol. 185. Iss. 2. P. 647–652. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04981.x

7. Jackson M., Bowles J.A. Curie temperatures of titanomagnetite in ignimbrites: effects of emplacement temperatures, cooling rates, exsolution, and cation ordering // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2014. Vol. 15. P. 4343–4368. https://doi.org/10.1002/2014GC005527

8. Андреева И.А., Коваленко В.И., Кононкова Н.Н. Натровые карбонатитовые расплавы Большетагнинского массива, Восточный Саян // Доклады Академии наук. 2006. Т. 408. № 1. С. 78–82.

9. Корытов Ф.Я., Фролов А.А., Багдасаров Ю.А. О температурах формирования флюоритсодержащих карбонатитов Большетагнинского массива // Геология месторождений редких элементов. Вып. 35. М.: Недра, 1972. С. 106–108.

10. Соколов С.В. Флюоритовые карбонатиты Большетагнинского массива (Восточный Саян, Россия) // Геохимия магматических пород: материалы XXV Всерос. семинара с уч. стран СНГ. СПб., 2008. С. 144–145.

11. Santos R.V., Dardenne M.A., Gouveia de Olivera C. Rare earth elements geochemistry of fluorite from the Mato Preto carbonatite complex, Southern Brasil // Revista Brasilera de Geociências. 1996. Vol. 26. No. 2. P. 81–86.

12. Williams-Jones A.E., Samson I.M., Olivo G.R. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico // Economic Geology. 2000. Vol. 95. Iss. 2. P. 327–342. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.2.327

13. Никифоров А.В., Öztürk H., Altuncu S., Лебедев В.А. Рудоносный карбонатит-содержащий комплекс Кызылджаорен: время формирования и минеральный состав пород (Северо-Западная Анатолия, Турция) // Геология рудных месторождений. 2014. Т. 56. № 1. С. 41–69. https://doi.org/10.7868/S0016777014010055

14. Viladkar S.G. Geology of the carbonatite-alkalic diatreme of Amba Dongar Gujarat: monograph. Ahmedabad: GMDC Science and Research Centre, 1996. 74 p.

15. Alvin M.P., Dunphy J.M., Groves D.I. Nature and genesis of a carbonatite-associated fluorite deposit at Speewah, East Kimberley region, Western Australia // Mineralogy and Petrology. 2004. Vol. 80. P. 127–153. https://doi.org/10.1007/s00710-003-0015-3

16. Liu S., Fan H-R., Yang K-F., Hu F-F., Wang K-Y., Chen F., et. al. Mezoproterozoic and Paleozoic hydrothermal metasomatism in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: constrains from trace elements and Sr-Nd isotope of fluorite and preliminary thermodynamic calculation // Precambrian Research. 2018. Vol. 311. P. 228–246. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.021

17. Fang T., Qiu Y., Qiu X. Carbon and oxygen isotopic characteristics of REE-fluorcarbonate minerals and their genetic implications, Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China // Chinese Journal of Geochemistry. 1996. Vol. 15. P. 82–86. https://doi.org/10.1007/BF03166799

18. Andersson U.B., Holtstam D., Broman C. Additional data on the age and origin of the Bastnäs-type REE deposits, Sweden // Mineral Deposit Research for a High World: 12th SGA Biennial Meeting Conference. 2013. Vol. 4. P. 1639–1642.

19. Frost R.L., Locke A.J., Martens W.N. Thermal analysis of beaverite in comparison with plumbojarosite // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2008. Vol. 92. P. 887–892. https://doi.org/10.1007/s10973-007-8702-7

20. Дорошкевич А.Г., Кобылкина О.В., Рипп Г.С. Роль сульфатов в образовании карбонатитов Западного Забайкалья // Доклады Академии наук. 2003. Т. 388. № 4. С. 535–538.

## References

1. Ripp GS, Izbrodin IA, Lastochkin EI, Rampilov MO, Doroshkevich AG, Chromova EA. A new type of rare metal mineralization in the Western Transbaikalia. *Otechestvennaya geologiya*. 2018;3:9–21. (In Russ.)

2. Ripp GS, Prokopyev IR, Izbrodin IA, Lastochkin EI, Rampilov MO, Doroshkevich AG., et al. Bastnaesite and fluorite rocks of the Ulan-Ude occurrence (mineral composition, geochemical characteristics, and genesis issues). *Geologiya i geofizika*. 2019;60(12):1754–1774. (In Russ.) https://doi.org/10.15372/GiG2019122

3. Ripp GS, Doroshkevich AG, Lastochkin EI, Izbrodin IA. Isotope-geochemical features of the rocks in the Oshurkovsky apatite-bearing massif, Western Transbaikalia.

*Geokhimiya*. 2014;4:302–318. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0016752514020071

4. Demeny A, Sitnikova MA, Karchevsky PI. Stable C and O isotope compositions of carbonatite complexes of the Kola Alkaline Province: phoscorite-carbonatite relationships and source compositions. In: Wall F, Zaitsev AN (eds.). *Phoscorites and carbonatites from mantle to mine: the key example of the Kola Alkaline Province*. London: Mineralogical Society of Great Britain & Ireland; 2004. p.407–431.

5. Ramdohr P. *Ore minerals and their intergrowths*. Moscow: Foreign Languages Publishing House; 1962. 1132 p. (In Russ.)

6. Charilaou M, Löffler JF, Gehring AU. Fe-Ti-O exchange at high temperature and thermal hysteresis. *Geophysical Journal International*. 2011;185(2):647–652. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.04981.x

7. Jackson M, Bowles JA. Curie temperatures of titanomagnetite in ignimbrites: effects of emplacement temperatures, cooling rates, exsolution, and cation ordering. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2014;15:4343–4368. https://doi.org/10.1002/2014GC005527

8. Andreeva IA, Kovalenko VI, Kononkova NN. Nanocarbonatite melts of the Bolshetagninsk massif, Eastern Sayan. *Doklady Akademii nauk*. 2006;408(1):78–82. (In Russ.)

9. Korytov FYa, Frolov AA., Bagdasarov YuA. On the temperatures of the formation of the fluorite-containing carbonatites in the Bolshetagninsky massif. In: *Geologiya mestorozhdenii redkikh elementov* = Geology of rare element deposits. Iss. 35. Moscow: Nedra; 1972. p.106–108. (In Russ.)

10. Sokolov SV. Fluorite carbonatites of the Bolshetagninsky massif (East Sayan, Russia). In: *Geokhimiya magmaticheskikh porod: materialy XXV Vserossiiskogo seminara s uchastiem stran SNG* = Geochemistry of Igneous Rocks: Proceedings of the 25th All-Russian Seminar with the CIS participation. Saint Petersburg; 2008. p.144–145. (In Russ.)

11. Santos RV, Dardenne MA, Gouveia de Oliveira C. Rare earth elements geochemistry of fluorite from the Mato Preto carbonatite complex, Southern Brasil. *Revista Brasilera de Geociências*. 1996;26(2):81–86.

12. Williams-Jones AE, Samson IM, Olivo GR. The genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico. *Economic Geology*. 2000;95(2):327–342. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.95.2.327

13. Nikiforov AV, Öztürk H, Altuncu S, Lebedev VA. Ore-bearing carbonatite-containing complex of Kyzyljaoren: rocks' formation time and mineral composition (North-West Anatolia, Turkey). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2014;56(1):41–69. https://doi.org/10.7868/S0016777014010055

14. Viladkar SG. *Geology of the carbonatite-alkalic diatreme of Amba Dongar Gujarat*. Ahmedabad: GMDC Science and Research Centre; 1996. 74 p.

15. Alvin MP, Dunphy JM, Groves DI. Nature and genesis of a carbonatite-associated fluorite deposit at Speewah, East Kimberley region, Western Australia. *Mineralogy and Petrology*. 2004;80:127–153. https://doi.org/10.1007/s00710-003-0015-3

16. Liu S, Fan HR, Yang KF, Hu FF, Wang KY, Chen F, et. al. Mezoproterozoic and Paleozoic hydrothermal metasomatism in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit: constrains from trace elements and Sr-Nd isotope of fluorite and preliminary thermodynamic calculation. *Precambrian Research*. 2018;311:228–246. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.021

17. Fang T, Qiu Y, Qiu X. Carbon and oxygen isotopic characteristics of REE-fluorcarbonate minerals and their genetic implications, Bayan Obo deposit, Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Geochemistry*. 1996;15:82–86. https://doi.org/10.1007/BF03166799

18. Andersson UB, Holtstam D, Broman C. Additional data on the age and origin of the Bastnäs-type REE deposits, Sweden. *Mineral Deposit Research for a High World: 12th SGA Biennial Meeting Conference*. 2013;4:1639–1642.

19. Frost RL, Locke AJ, Martens WN. Thermal analysis of beaverite in comparison with plumbojarosite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008;92:887–892. https://doi.org/10.1007/s10973-007-8702-7

20. Doroshkevich AG, Kobylkina OV, Ripp GS. The role of sulfates in the formation of carbonatites in Western Transbaikalia. *Doklady Akademii nauk*. 2003;388(4):535–538. (In Russ)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Рипп Г.С., Ласточкин Е.И., Дамдинова Л.Б., Избродин И.А., Рампилов М.О., Савченко А.А., Посохов В.Ф. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

German S. Ripp, Evgeny I. Lastochkin, Lyudmila B. Damdinova, Ivan A. Izbrodin, Mikhail O. Rampilov, Alena A. Savchenko, Viktor F. Posokhov are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

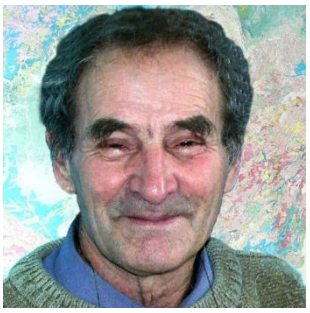
**Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*
*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

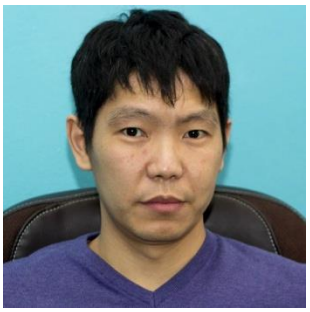


**Рипп Герман Самуилович,**
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: last@ginst.ru
**German S. Ripp,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: last@ginst.ru

**Ласточкин Евгений Иванович,**
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
✉ e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru
**Evgeny I. Lastochkin**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
✉ e-mail: gin-buryatia-07@yandex.ru

**Дамдинова Людмила Борисовна,**
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: ludamdinova@mail.ru
**Lyudmila B. Damdinova,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: ludamdinova@mail.ru

**Избродин Иван Александрович,**
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: izbrodin@ginst.ru
**Ivan A. Izbrodin,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: izbrodin@ginst.ru



**Рампилов Михаил Олегович,**
кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: mrampilov@mail.ru
**Mikhail O. Rampilov,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: mrampilov@mail.ru

**Савченко Алена Алексеевна,**
младший научный сотрудник лаборатории петрологии,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: njandani@yandex.ru
**Alena A. Savchenko,**
Junior Researcher, Petrology Laboratory,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: njandani@yandex.ru

**Посохов Виктор Федорович,**
старший научный сотрудник лаборатории инструментальных методов анализа,
Геологический институт СО РАН,
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия,
e-mail: vitaf1@yandex.ru
**Viktor F. Posokhov,**
Senior Researcher, Laboratory of Instrumental Analysis Methods,
Geological Institute, SB RAS,
6a Sakhynova St., Ulan-Ude 670047, Russia,
e-mail: vitaf1@yandex.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 550.4:550.8**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176**

# Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан

**© А.В. Блинов[a], Ю.И. Тарасова[b]**
[a,b]Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, Россия
[b]Иркутский научный центр СО РАН, г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** В статье рассмотрены минералого-петрографические и геохимические характеристики золоторудного месторождения Угахан с целью создания схемы формирования минералогических ассоциаций, вписанной в общую геодинамическую эволюцию Бодайбинского региона. Исследования проведены на основе авторского материала, полученного на месторождении Угахан во время полевых работ. Непосредственно минералого-петрографические и аналитические работы выполнены в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН. По минералого-петрографическим исследованиям установлены три генерации карбонатных минералов, образованные в разное время и связанные с различными этапами формирования месторождения. В пределах месторождения повсеместно отмечается развитие агрегатов регенерационного кварца. Особенно масштабно данное явление наблюдается в верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных кварцевыми песчаниками. Развитие минеральных ассоциаций на месторождении происходило в следующем порядке: на ранней низкотемпературной стадии формировался фрамбоидальный и мелкий идиоморфный пирит (I и II), позже развивалась ассоциация высокотемпературных минералов, включающая арсенопирит, пирротин, пирит-III, самородное золото, галенит, сфалерит, блеклые руды, на пострудной стадии происходила кристаллизация пирита-IV в кварц-карбонатной оторочке. Аналогичная последовательность образования минеральных ассоциаций наблюдается на месторождениях Красный и Сухой Лог, что позволяет предполагать формирование рудной минерализации месторождений сухоложского типа в результате сходных рудообразующих процессов. Приуроченность месторождения Угахан к бужуихтинской свите позволяет считать данное стратиграфическое подразделение перспективным для дальнейших поисков в нем месторождений золота. Содержание мышьяка в отложениях бужуихтинской свиты как основного сопутствующего золоту элемента в пределах Бодайбинского региона на порядок ниже, что предполагает его исключение из поисковых характеристик в границах данного стратоуровня.

***Ключевые слова:*** золото, Бодайбинский регион, месторождение Угахан, минералогия, петрография, геохимия

***Благодарности:*** Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту IX.130.3.1 (№ 0350-2019-0010). Работа осуществлена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

***Информация о статье:*** Дата поступления 27 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Блинов А.В., Тарасова Ю.И. Минералого-петрографическая характеристика месторождения Угахан. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 160–176. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176

# Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit

**© Anton V. Blinov[a], Julia I. Tarasova[b]**
[a,b]Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russia
[b]Irkutsk Scientific Center, SB RAS, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** The article considers the mineralogical-petrographic and geochemical characteristics of the Ugahan gold ore deposit with the aim of creating a scheme of the mineralogical associations' formation that is inscribed in the general geodynamic evolution of the Bodaibo region. The study has been carried out on the copyright material obtained in the research area during the fieldwork. The mineralogical-petrographic and analytical work has been

carried out at the Research Sharing Center “Isotope-geochemical studies” of Vinogradov Institute of Geochemistry, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The mineralogical and petrographic research has identified three generations of carbonate minerals, formed at different times and associated with different stages of the field formation. Within the deposit, the development of the regenerative quartz aggregates is widely observed. The phenomenon is especially widespread in the upper members of the Buzhuikhta formation that are composed of quartz sandstones. The development of the mineral associations in the deposit took place in the following order. At the early low-temperature stage, the framboid and small idiomorphic pyrite were formed (I and II). Later, the high-temperature minerals association developed, that included arsenopyrite, pyrrhotite, pyrite-III, native gold, galena, sphalerite, and gray copper ores. At the post-ore stage, the pyrite-IV crystallization in a quartz-carbonate rim occurred. A similar sequence of mineral association formation is observed at the Krasny and Sukhoy Log deposits, which suggests that the formation of ore mineralization of the Sukhoy Log type deposits is a result of similar ore-forming processes. The confinement of the Ugahan deposit to the Buzhuikhta formation allows us to consider this stratigraphic unit as promising in terms of further exploration for gold deposits. The content of arsenic (as the main gold-accompanying element in the Bodaibo region) in the deposits of the Buzhuikhta formation is an order of magnitude lower, which suggests that it should be excluded from the search characteristics within the boundaries of this stratigraphic level.

***Keywords:*** gold, Bodaibo region, Ugahan deposit, mineralogy, petrography, geochemistry

***Acknowledgements:*** The study is part of the State assignment, Project IX.130.3.1 (№ 0350-2019-0010). The work has been carried out using the scientific equipment of the Research Sharing Center "Isotopic Geochemical Research", Institute of Geochemistry, SB RAS, Irkutsk.

***Information about the article:*** Received April 27, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Blinov AV, Tarasova JI. Mineralogical and petrographic characteristics of the Ugahan deposit. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):160–176. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-160-176

## Введение

Проблема генезиса месторождений золота Бодайбинского региона, в том числе и таких месторождений-гигантов, как Сухой Лог и Вернинское, остается очень актуальной, несмотря на значительные сдвиги в областях аналитической и изотопной геохимии, а также в расшифровке геодинамических событий в эволюции региона.

В настоящее время большая часть геологов разделяет мнение о едином процессе формирования рудной минерализации для всех месторождений Бодайбинского региона, имеющих экономическую рентабельность для извлечения золота [1–8]. Тем не менее практически все месторождения имеют свои отличительные признаки, которые базируются на принадлежности к той или иной свите, локализации в различных областях метаморфической зональности, различном сочетании литологических подразделений (песчаник, алевролит, карбонат, филлитовидный сланец), насыщении органическим веществом и т. д. Среди работ последних двух десятилетий можно выделить в качестве наиболее значимых минералогические исследования R.R. Large с соавторами [9] и Ю.И. Тарасовой с соавторами [8]. В них были продемонстрированы наиболее типичные характеристики месторождений Сухой Лог (хомолхинская свита) и Красный (аунакитская свита). В своей статье Ю.И. Тарасова, базируясь на представлениях предшественников [5, 6, 9–11], представила принципиальную схему формирования месторождений сухоложского типа. В числе принципиальных этапов становления месторождений авторы выделяют: конседиментационный (610–590 млн лет), катагенный (550 млн лет) и два метаморфогенных этапа, первый из которых (450 млн лет) являлся собственно рудным, а второй (320–290 млн лет) – наложенным метаморфическим событием, в значительной степени затушевавшим первые три этапа. Впервые для региона авторы показали схему формирования минералогических ассоциаций, вписав ее в геодинамическую эволюцию региона. Относительно этой схемы будет построено данное исследование по изучению вещественного состава месторождения Угахан.

## Объект и методы исследования

Уникальность месторождения Угахан заключается в том, что оно является единственным описанным золоторудным объектом Бодайбинского региона, локализованным в пределах бужуихтинской свиты. Данный факт делает изучение этого месторождения максимально перспективным с точки зрения как генетического понимания его происхождения, так и оценки перспективности бужуихтинской свиты для поиска в ней новых золоторудных объектов в целом.

В структурном плане месторождение Угахан расположено в северной части Бодайбинского синклинория в Хомолхинской подзоне. В геологическом строении территории принимают участие отложения палеопротерозойской эры эдиакарского периода [12–15] дальнетайгинской серии (бужуихтинская, угаханская, хомолхинская и имняхская свиты), прорванные магматическими породами конкудеро-мамаканского комплекса.

Оруденение приурочено непосредственно к висячему крылу Верхне-Угаханской антиклинальной структуры, которая сложена отложениями бужуихтинской свиты, разделенной на пять подсвит [16]. Непосредственно рудные тела приурочены к контакту филитовидных углеродистых сланцев средней части с кварцевыми песчаниками верхней части разреза свиты. Мощность свиты не превышает 700–750 м. Детальная изотопно-геохимическая информация по отложениям бужуихтинской свиты приведена в ряде статей [17–19].

*Минералого-петрографические исследования.* Вмещающие породы месторождения Угахан представлены переслаиванием углеродсодержащих метапесчаников и алевролитов. В составе обломочного материала присутствуют зерна кварца и полевых шпатов, обломки зерен карбоната, а также более поздние, чем основная ткань, железомагнезиальные карбонаты.

Методом рентгеноструктурного анализа подтверждены карбонатные минералы трех разновидностей:

1. В основной ткани вмещающих пород в виде мелких обломков установлены кальцит и доломит (рис. 1, *a*).

2. По периферии сульфидных агрегатов развиваются тонкие чешуйки сидерита, являющегося синрудным (рис. 1, *c*).

3. Имеет место широкое развитие более поздних пойкилобластов анкерита и сидерита, образующихся позже основной ткани (рис. 1, *d*). Такие пойкилобласты развиваются в основном по цементу и включают мелкие зернышки кварца, полевого шпата, чешуйки серицита и частицы углеродистого вещества, но иногда и обломки более крупных зерен кварца.

В основной ткани преобладают обломки зерен кварца удлиненной линзовидной формы, по длинной оси расположенные по сланцеватости. Зерна кварца подвержены регенерации, что заметно по частицам углеродистого вещества, оставшимся от цемента в разросшихся зернах кварца. Наиболее широко этот процесс проявляется в верхних пачках кварцевых песчаников бужуихтинской свиты, перекрывающих месторождение (рис. 1, *b*). В разных количествах встречаются более мелкие зерна плагиоклаза и калиевого полевого шпата таблитчатой формы с обильными включениями частиц углеродистого вещества. По полевым шпатам начинают развиваться чешуйки серицита и карбонат.

В пределах бужуихтинской свиты повсеместно отмечаются мелкие – 0,05 мм – реликты микрофитолитов, сложенные кальцитом и доломитом, насыщенным частицами углеродистого вещества (рис. 2). Сами по себе находки микрофитолитов в хорошей сохранности являются признаком относительно низкого метаморфизма в пределах месторождения.

Несмотря на повсеместную сульфидизацию отложений бужуихтинской свиты, максимальное развитие сульфидной минерализации приурочено к контакту пелитовой и песчаной разностей. На месторождении установлены четыре морфологические разновидности пирита (рис. 3).

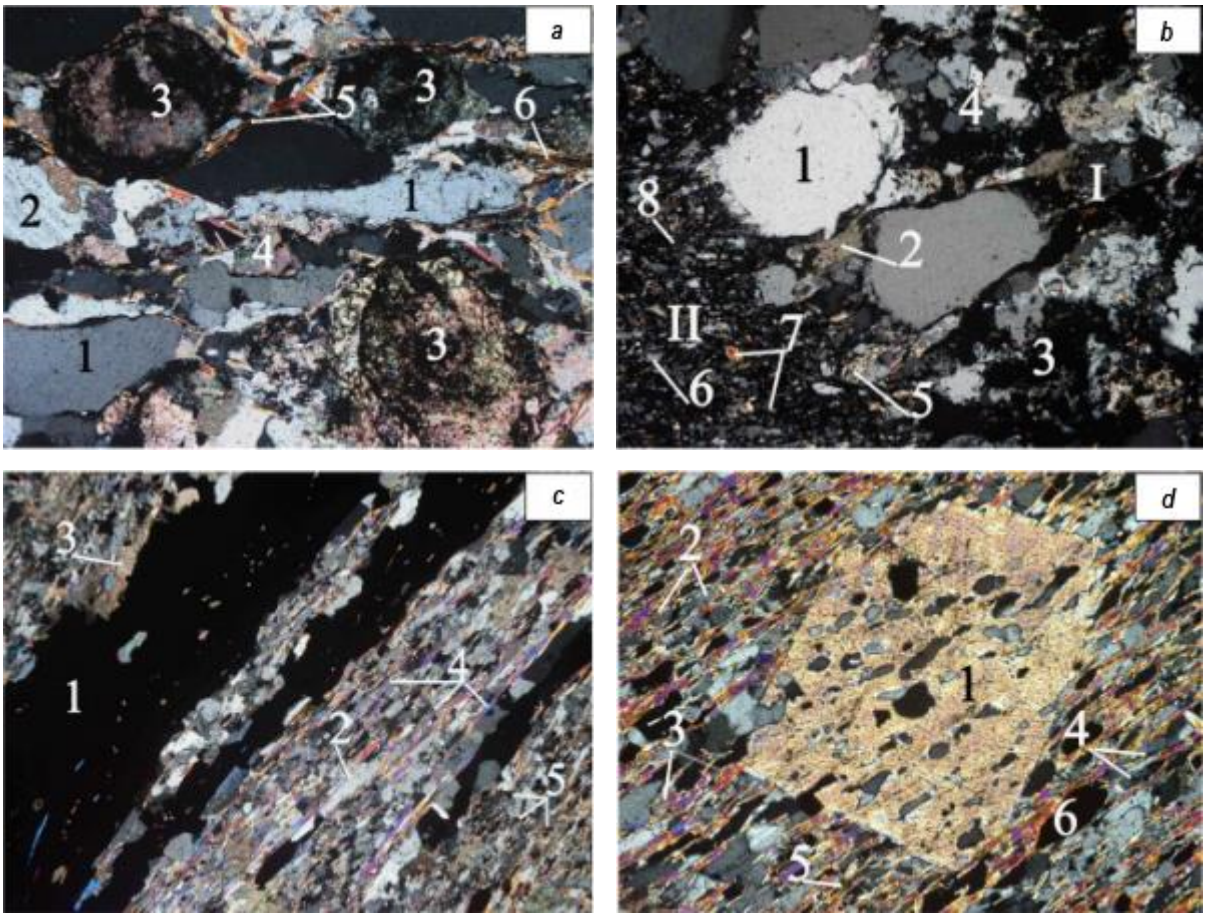



***Рис. 1. Шлифы, содержащие карбонатные минералы трех разновидностей:***
*a – рассланцованный крупно-среднезернистый углеродсодержащий кварцевый известковистый метапесчаник с микрофитолитами и большим содержанием карбоната:*
*1 – обломки зерен кварца, 2 – обломки зерен плагиоклаза, по которым развивается карбонат, 3 – микрофитолиты, сложенные карбонатом и углеродистым веществом, 4 – зернышки карбоната, предположительно кальцита, в цементе, 5 – чешуйки серицита, 6 – углеродистое вещество*
*Поле зрения по горизонтали – 1,4 мм. Николи +*
*b – углеродсодержащий метапесчаник (I), углеродистый филлитовидный сланец (II):*
*I: 1 – обломки зерен кварца подвергаются регенерации, 2 – обломки карбоната, 3 – скопления углеродистого вещества в реликтах микрофитолитов, 4 – обломок кварцита (кремня) с примесью углеродистого вещества, 5 – серицит и углеродистое вещество в цементе;*
*II: 6 – зернышки кварца, 7 – чешуйки серицита, 8 – частицы углеродистого вещества*
*Поле зрения по горизонтали – 1,4 мм. Николи +*
*c – линзовидные вкрапления сульфидных сростков в алевросланце, расположенные согласно сланцеватости и сопровождаемые кварцем и карбонатом в более крупных зернах, чем в породе:*
*1 – сростки зерен пирротина, 2 – кварц, 3 – сидерит, 4 – чешуйки серицита-мусковита, 5 – частицы углеродистого вещества*
*Поле зрения по горизонтали – 3,5 мм. Николи +*
*d – рассланцованный углеродсодержащий метаалевропесчаник с прослоями углеродистого карбонатизированного алевросланца слюдисто-кварцевого состава:*
*1 – пойкилобласт анкерита ромбовидной формы, 2 – удлиненные зерна кварца, 3 – чешуйки сидерита в участках с сульфидной вкрапленностью, 4 – углеродистое вещество, 5 – акцессорный турмалин, 6 – вкрапленность сульфидных минералов*
*Поле зрения по горизонтали – 0,8 мм. Николи +*

***Fig. 1. Sections containing carbonate minerals of three varieties***
*a – interstratified coarse-grain carbon-containing quartz calcareous metasandstone with microphytolites and high carbonate content:*
*1 – fragments of quartz grains, 2 – fragments of plagioclase grains along which the carbonate develops, 3 – microphytoliths composed of carbonate and carbonaceous substance, 4 – grains of carbonate, presumably calcite, in cement, 5 – sericite flakes, 6 – carbonaceous substance*
*Horizontal field of view is 1.4 mm. Nicoli +*

*b – Carbon-containing metasandstone (I), carbonaceous phyllite schist (II):*
*I: 1 – fragments of quartz grains undergoing regeneration, 2 – fragments of carbonate,*
*3 – accumulations of carbonaceous matter in microphytolith relics, 4 – fragment of quartzite (flint)*
*with an admixture of carbonaceous substance, 5 – cement and carbonaceous substance in cement;*
*II: 6 – grains of quartz, 7 – flakes of sericite, 8 – particles of carbonaceous substance*
*Horizontal field of view is 1.4 mm. Nicoli +*
*c – lenticular inclusions of sulfide aggregates in the silt shale, arranged according*
*by schistosity and accompanied with quartz and carbonate in larger grains than in the rock:*
*1 – intergrowths of pyrrhotite grains, 2 – quartz, 3 – siderite, 4 – flakes of sericite-muscovite,*
*5 – carbon substance particles*
*Horizontal field of view is 3.5 mm. Nicoli +*
*d – interstratified carbon-containing metaaleuro-sandstone with interbeds*
*of carbonaceous carbonated siltstone of micaceous-quartz composition:*
*1 – poikiloblast of diamond-shaped ankerite, 2 – elongated quartz grains, 3 – siderite flakes*
*in sulfide impregnation areas, 4 – carbonaceous substance,*
*5 – accessory tourmaline, 6 – impregnation of sulfide minerals*
*Horizontal field of view is 0.8 mm. Nicoli +*

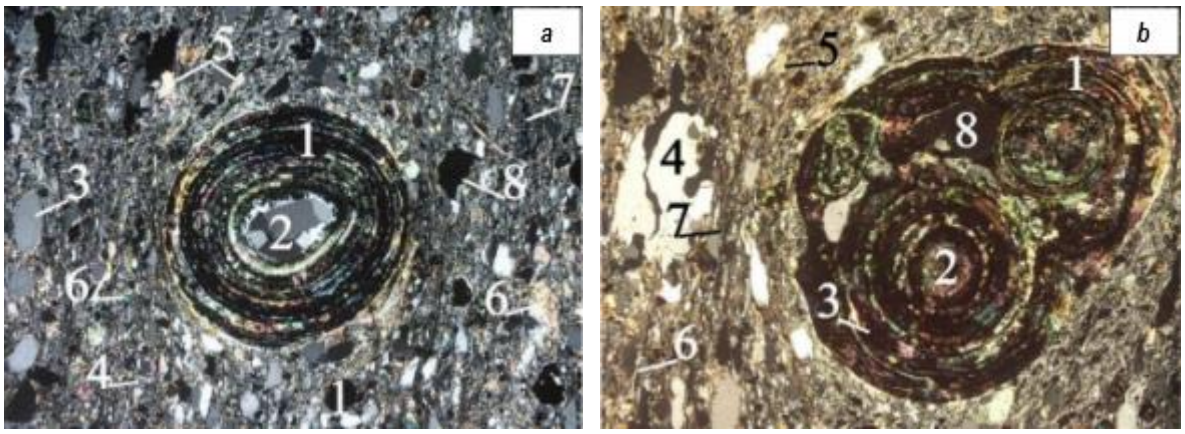



***Рис. 2. Рассланцованный углеродсодержащий известковистый метапесчаник с хорошо сохранившимися микрофитолитами, мелкими линзовидными вкраплениями пирротина и вкрапленностью пирита:***
*a – рассланцованный углеродсодержащий известковистый метапесчаник с микрофитолитом:*
*1 – микрофитолиты, сложенные карбонатом – чередуются светлые и темные слои,*
*обогащенные углеродистым веществом, 2 – в центре микрофитолита карбонат замещен кварцем,*
*3 – обломки зерен кварца, 4 – зерна плагиоклаза, 5 – обломки карбоната, 6 – серицит в цементе,*
*7 – углеродистое вещество, 8 – вкрапленность пирротина;*
*b – рассланцованный углеродсодержащий известковистый метапесчаник*
*с микрофитолитом сложного строения:*
*1 – микрофитолит сложного строения, 2 – карбонат в микрофитолите, 3 – углеродистое вещество*
*в микрофитолите, 4 – обломки зерен кварца, 5 – мелкие обломки карбоната, 6 – серицит в цементе,*
*7 – углеродистое вещество, 8 – более поздняя вкрапленность пирротина*
*Поле зрения по горизонтали – 4 мм. Николи +*

***Fig. 2. Interstratified carbon-bearing calcareous metasandstone with well-preserved microphytoliths, small lenticular inclusions of pyrrhotite, and disseminated pyrite***
*a – Interstratified carbon-bearing calcareous metasandstone with microphytoliths:*
*1 – carbonate microphytoliths – light and dark layers enriched in carbonaceous substance,*
*2 – carbonate replaced by quartz in the center of the microphytolite,*
*3 – fragments of quartz grains, 4 – plagioclase grains, 5 – carbonate fragments, 6 – sericite cement,*
*7 – carbonaceous substance, 8 – impregnation of pyrrhotite;*
*b – Interstratified carbon-bearing calcareous metasandstone with microphytolith of complex structure:*
*1 – microphytolith of complex structure, 2 – carbonate in microphytolite, 3 – carbonaceous matter*
*in microphytolith, 4 – fragments of quartz grains, 5 – small fragments of carbonate, 6 – sericite in cement,*
*7 – carbonaceous substance, 8 – later dissemination of pyrrhotite*
*Horizontal field of view is 4 mm. Nicoli +*

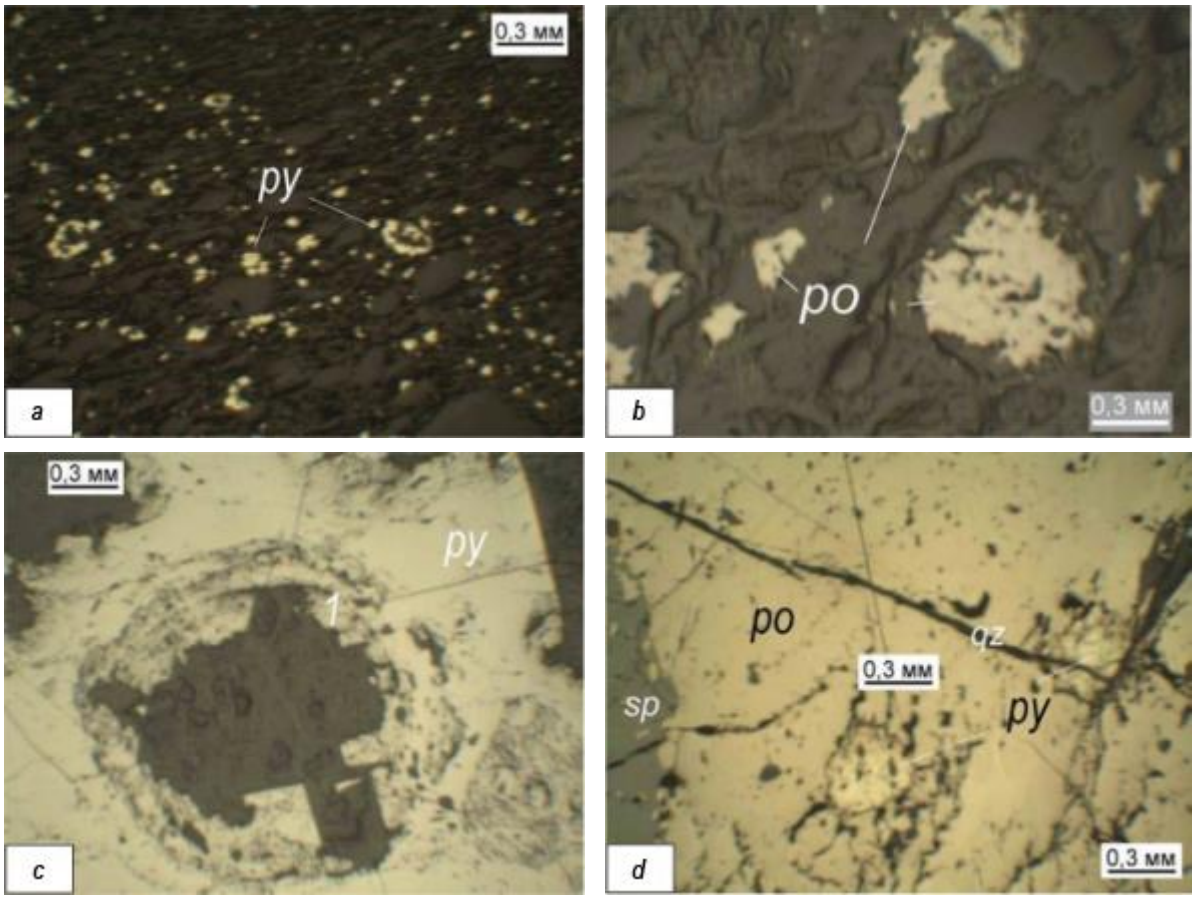



***Рис. 3. Морфологические разновидности пирита и пирротина:***
*a – рассеянная порфирометазернитая вкрапленность мелко- и тонкозернистого (глобулярного) пирита (py) в полосах сульфидизации в окварцованном песчанике;*
*b – тонковкрапленный пирротин (po) – псевдоморфозы пирита-I;*
*c – агрегат пирита-III; видны реликты пирита-I и пирита-II;*
*d – агрегаты метазернистого пирита (py) и выделение сфалерита (sp) в пирротине (po); у пирита отмечена тонкопластинчатая отдельность; границы пирита с пирротином неровные; тонкие прожилки кварца (qz) секут пирит и пирротин*
*Микроскоп. Николи II*

***Fig. 3. Morphological varieties of pyrite and pyrrhotite:***
*a – dispersed granular impregnation of fine and fine-grain (globular) pyrite (py) in sulfidization zones of silicified sandstone;*
*b – finely disseminated pyrrhotite (po) – pseudomorphs of pyrite-I;*
*c – pyrite-III aggregate; visible relicts of pyrite-I and pyrite-II;*
*d – aggregates of metagrain-rich pyrite (py) and sphalerite (sp) precipitation in pyrrhotite (po); pyrrhotite (po) veinlets in pyrite; uneven boundaries between pyrite with pyrrhotite; thin veins of quartz (qz) cutting pyrite and pyrrhotite*
*Microscope. Nicoli II*

Пирит-I представляет собой наиболее раннюю морфологическую разновидность пирита в виде мелких глобулей размером до 200 мкм (см. рис. 3, *a*). Первичный пирит-I частично или полностью замещается пирротином-I, образуя при изоморфном замещении округлые выделения во вмещающих породах (см. рис. 3, *b*). Реликты пирита-I видны в более поздних разновидностях пирита (см. рис. 3, *c*) и в агрегатах пирротина-II (рис. 3, *d*).

Пирит-II представляет собой мелкие идиоморфные кристаллы, редко встречающиеся во вмещающих породах, а также наблюдается в виде реликтов в пирите-III (см. рис. 3). Размер кристаллов пирита-II составляет около 100 мкм. Кристаллы пирита-II встречаются на месторождении Угахан крайне редко – значительно реже, чем на других золоторудных месторождениях Бодайбинского района.

Пирит-III представляет собой аллотриоморфные, изометричные метаагрегаты размером до 2–3 см. Пирит-III является рудоносным пиритом, золото находится по трещинам. В пирите-III отмечаются включения более ранних минералов – пирита-I, пирита-II (см. рис. 3, *c*), халькопирита и пирротина-I. Наложенная полиметаллическая ассоциация развивается по агрегатам пирита-III и по трещинам в нем. По периферии в виде каймы и по трещинам пирита-III установлены участки более тонкозернистого пирита (порфирометазернистая структура) – кристаллического пирита-IV. В пирите-III установлены захваченные агрегаты пирротина-I.

Пирит-IV наблюдается в виде единичных крупных идиоморфных кристаллов кубического облика (преимущественно таблитчато-призматический в разрезе). Размер агрегата пирита-IV – около 4–5×7–8 мм. Крупные метаагрегаты включают в себя реликты более ранних мелких разновидностей пирита – глобулярного пирита-I, мелких идиоморфных кристаллов пирита-II – и обрастают метаагрегатами пирита-III. Пирит-IV захватывает тонкие включения нерудных минералов – кварца, слюды, ксенолитов вмещающих пород, рутила. Особо следует отметить развитие пирита-IV по агрегату пирротина-II, где видна реликтовая структура агрегата пирротина и частички незамещенного пирротина. Трещины и иногда периферия пирротина-II обрастают тонкими зернами пирита-IV (рис. 4, *a*).

Установлены две морфологические разновидности пирротина. Пирротин-I представляет собой результат частичного или полного псевдоморфного замещения глобулярного пирита-I и встречается в виде округлых выделений во вмещающих породах (рис. 4, *b*). Размеры вкрапленных выделений пирротина-I в основном менее 0,1–0,3 мм. Выделения пирротина ксеноморфные, изометричные, с изрезанными краями, отмечается кайма рутила. Часто пирротин-I отмечается в виде включений в агрегатах пирита-III, -IV (см. рис. 3).

Пирротин-II представлен крупными (до нескольких сантиметров) линзовидными или прожилковидными массивными агрегатами (см. рис. 4). Структуры пирротиновых агрегатов аллотриоморфно-, гипидиоморфнозернистые. Линзы пирротина-II ориентированы субсогласно вмещающим породам. Агрегаты пирротина-II рассланцованы по простиранию. В пирротине отмечены тонкие включения карбоната, рутила, встречаются мелкие концентрически-зональные реликты пирита-I (см. рис. 4, *b*).

Полиметаллическая ассоциация в пределах месторождения Угахан представлена галенитом, халькопиритом, сфалеритом, арсенопиритом и носит наложенный характер относительно пирита-III и пирротина-II.

Галенит наблюдается в виде выделений ксеноморфных агрегатов, прожилков, по тонким трещинам, интерстициям в пирите-III или в агрегатах пирита-III и пирротина-II. Размеры выделений изменяются от микронов до 0,2 мм. В ассоциации с галенитом повсеместно встречаются халькопирит и сфалерит. Выделения самородного золота наиболее часто установлены в совместных выделениях с галенитом.

Результаты минераграфических исследований показывают, что на месторождении Угахан установлены две разновидности халькопирита. Халькопирит-I установлен в ассоциации с пирротином-I в виде мелких включений в пирите-III. Выделения пирротина-I и халькопирита-I имеют чаще округлую вытянутую форму. Халькопирит-II ассоциирует с пирротином-II. Преобладающей формой выделения халькопирита-II является обрастание агрегатов пирротина-II. Форма агрегатов пирротина-II и халькопирита-II чаще всего неправильная, угловатая. Размер кайм халькопирита-II достигает первых миллиметров, мощность – первые десятые доли миллиметров.

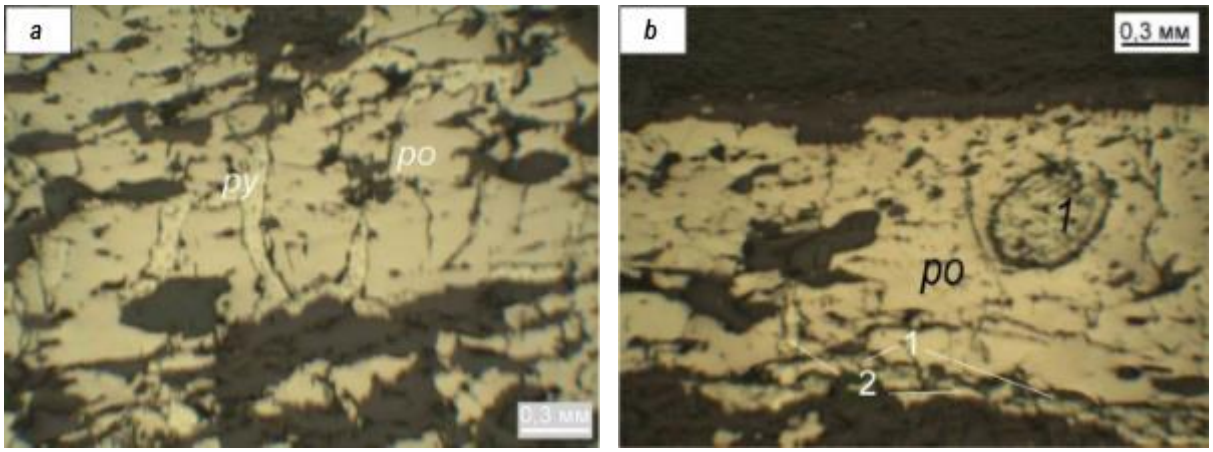



***Рис. 4. Контакты метакристаллического пирита с пирротином:***
*a – сульфидная пятнисто-вкрапленная, почти массивная минерализация пирротина (po) в виде линзовидных, полосчатых агрегатов;*
*в пирротине пирит (py) наблюдается в виде мелких зернистых агрегатов, секущих мелких метапрожилков и каемок;*
*b – в полосчатых агрегатах пирротина (po) структуры ситовидные, гранобластовые;*
*в пирротине наблюдаются концентрически-зональные агрегаты пирита (1);*
*тонкозернистые корочки пирита по пирротину (2) и зональному пириту (1)*
*Микроскоп. Николи II*

***Fig. 4. Contacts of metacrystalline pyrite with pyrrhotite:***
*a – sulfide spotted-disseminated, massive mineralization of pyrrhotite (po) in the form of lenticular, streaked aggregates;*
*presence of pyrite (py) in pyrrhotite in the form of small granular aggregates, small cutting meta-veins and rims;*
*b – streaked aggregates of pyrrhotite (po), the structures are sieve, granoblast;*
*concentric-zonal aggregates of pyrite observed in pyrrhotite (1);*
*fine-grain pyrite rims (2) along pyrrhotite and zonal pyrite (1)*
*Microscope. Nicoli II*

Сфалерит представляет собой идиоморфные, гипидиоморфные мелко-, тонкозернистые агрегаты. Чаще всего сфалерит наблюдаются по трещинам и периферии пирротина-II и пирита-III. Сфалерит замещает пирротин, развивается по нему. В сфалерите отмечены ксенолиты пирротина-I. Размер зернистых агрегатов сфалерита – до 0,6×1,5 мм. В ассоциации с пирротином одновременно со сфалеритом отмечены мелкие зернистые выделения халькопирита и галенита, развивающихся по пирротину-II.

Арсенопирит встречается крайне редко в виде мелких единичных игольчатых кристаллов во вмещающих породах или захвачен агрегатами пирита-III и пирротина-II.

Золото развивается в основном по трещинам и пустотам в пирите-III, реже – в виде интерстициальных выделений в совместных агрегатах пирита-III и пирротина-II. Наиболее часто золото заполняет трещины в пирите (рис. 5). Частицы самородного золота характеризуются высокой отражательной способностью. Цвет их – светло-желтый, наиболее часто встречаются размеры золотин 5×5 и 5×10 мкм, в единичных случаях они достигают размера 90×210 мкм. Золото тонкодисперсное. Форма зерен золота соответствует форме трещин и пустот, в которых оно развивается.

Минералого-петрографические исследования проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН методами рентгеноструктурного анализа, рентгеноспектрального микроанализа, также на цифровых поляризационных микроскопах Altami Polar 312 и Micromed Polar 3 с цифровыми фотокамерами Toupcam для получения фотоснимков и их анализа.

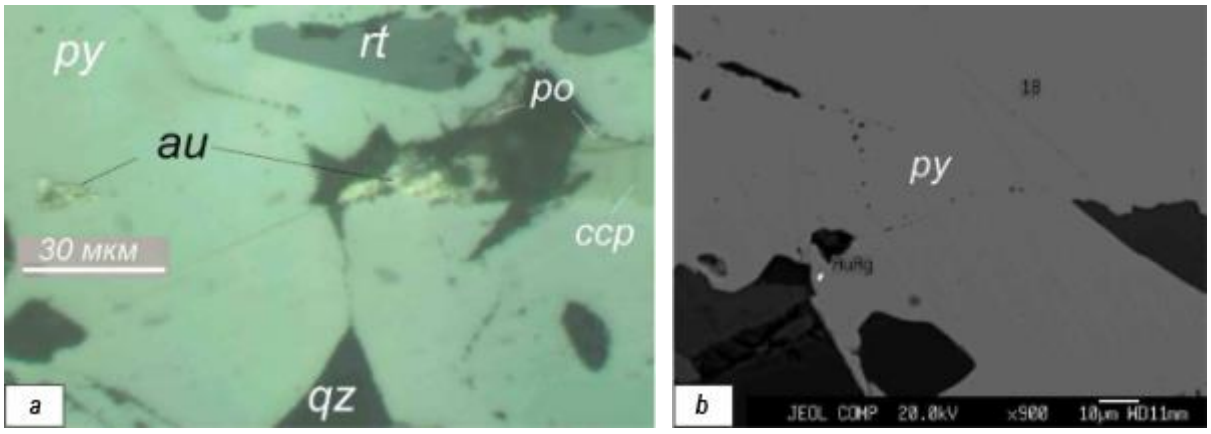



***Рис. 5. Золото в пирите:***
*a – в пирите по интерстициям отмечается золото (au) – изометрично-комковатый агрегат (3–5×13 мкм) и сросток золота (2–5×20 мкм) с пирротином в интерстициях между зернами пирита Микроскоп. Николи II*
*b – весьма низкопробное, высокосеребристое золото (AuAg) (~1×2 мкм) в пирите Изображение получено методом рентгеноспектрального микроанализа*
***Fig. 5. Gold in pyrite:***
*a – gold (au) observed in pyrite: isometric lumpy unit (3–5×13 μm) and gold splice (2–5×20 μm) with pyrrhotite in the interstices between the grains of pyrite Microscope. Nicoli II*
*b – very low-grade gold with a high content of silver (AuAg) (~1×2 μm), in pyrite The image obtained by electron-probe microanalysis*

*Геохимическая характеристика пород и руд.* Химический состав месторождения Угахан изучен на основании 56 проб, отобранных из керна скважин в пределах месторождения, и 26 сколковых проб, отобранных на удалении от месторождения. Аналитические исследования проводились в Центре коллективного пользования «Изотопно-геохимических исследований» Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН следующими методами: титриметрический, гравиметрический (НСАМ № 3-Х, НСАМ № 50-Х) методы – на определение общей серы ($S_{total}$); рентгенофлуоресцентный анализ – на определение петрогенных элементов; сцинтилляционная атомно-эмиссионная спектроскопия с дуговым разрядом – на определение золота и серебра; масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой – на определение редких земель. Полученные данные приведены в табл. 1, 2. Черносланцевые породы, вмещающие рудную минерализацию (пачки $bz_2^2$ и $bz_3^1$), схожи по средним содержаниям макрокомпонентов, редких элементов как между собой, так и с вмещающими породами бужуихтинской свиты, отобранными на значительном расстоянии от месторождения.

**Таблица 1**

**Содержание петрогенных компонентов месторождения Угахан, %**

**Table 1**

**Content of petrogenic components in the Ugahan deposit, %**

| Зона | Компонент | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $TiO_2$ | $Fe_2O_3$ | $S_{total}$ | $P_2O_5$ | CaO | MgO | $K_2O$ | $Na_2O$ | MnO |
| Рудная зона (25 проб) | 57,9 | 13,99 | 0,76 | 8,87 | 3,42 | 0,1 | 3,4 | 1,15 | 2,88 | 1,86 | 0,04 |
| Зона минерализации (31 проба) | 60,8 | 12,11 | 0,68 | 5,47 | 1,76 | 0,1 | 5,3 | 1,25 | 2,53 | 1,83 | 0,05 |
| Бужуихтинская свита (26 проб) | 55,7 | 13,91 | 0,56 | 4,67 | 1,57 | 0,08 | 8,09 | 1,04 | 2,72 | 1,77 | 0,04 |

**Таблица 2**

**Содержание редких элементов месторождения Угахан, г/т**

**Table 2**

**Content of rare elements in the Ugahan deposit, g/t**

| Зона | Элемент | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Au | Ag | Co | Ni | Cu | Pb | Zn | As |
| Рудная зона (25 проб) | 0,998 | 0,82 | 25,24 | 71,14 | 83,09 | 19,83 | 129,21 | 4,78 |
| Зона минерализации (31 проба) | 0,013 | 0,57 | 18,12 | 54,5 | 53,42 | 13,43 | 103,41 | 4,4 |
| Бужуихтинская свита (26 проб) | 0,009 | 0,1 | 8,01 | 38,4 | 36,57 | 13,9 | 74,6 | 5,2 |
| Зона | Элемент | | | | | | | |
| | V | Cr | Rb | Sr | Mo | Sn | Ba | U |
| Рудная зона (25 проб) | 140,16 | 88,51 | 100,8 | 504,3 | 6,88 | 2,44 | 1363 | 4,46 |
| Зона минерализации (31 проба) | 112,63 | 69,84 | 89,27 | 604,1 | 6,24 | 1,51 | 1145 | 4,04 |
| Бужуихтинская свита (26 проб) | 165,76 | 93,44 | 93,8 | 840 | 8,72 | 2,11 | 1360 | 3,61 |

В пробах с промышленно значимым содержанием золота двукратно возрастают содержания $Fe_2O_3$, общей серы, в меньшей степени – $P_2O_5$. Кроме железа и серы в пробах с повышенным содержанием золота увеличено содержание редких элементов сидеро-халькофильной группы (серебро, кобальт, никель, медь, свинец, цинк), что согласуется с увеличением в рудной зоне сульфидной минерализации, представленной пиритом в ассоциации с полиметаллической сульфидной минерализацией (сфалерит, галенит, халькопирит, пентландит).

Прочие элементы либо абсолютно инертны к рудному процессу, либо проявляют тенденцию к уменьшению. Содержания CaO и MgO в отложениях бужуихтинской свиты значительно превышают стандарт для отложений Бодайбинского региона SCHS-1 [20], что согласуется с высоким содержанием карбонатного вещества в породе. В пределах рудной зоны содержание кальция резко снижается с 8 % на удалении до 5 % в околорудной зоне и до 3 % непосредственно в пределах рудных тел месторождения.

Несмотря на появление кварцевых прожилков в пределах рудной зоны и зоны околорудной минерализации, содержание кремнезема остается на стабильном уровне в пределах 59–61 %, что сопоставимо со стандартом SCHS-1. В верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных углеродистыми кварцевыми песчаниками, содержание $SiO_2$ достигает 80 %.

Вариации содержания щелочных элементов ($Na_2O$, $K_2O$, литий, рубидий, цезий) в рудных зонах относительно безрудных отложений как в пределах месторождения, так и на удалении от него крайне малы. Незначительное увеличение содержания калия в пробах с рудным содержанием золота может говорить о локальном перераспределении вещества в пределах рудной зоны месторождения. При этом среднее содержание калия и натрия в целом на месторождении абсолютно сопоставимо с таковым за пределами месторождения, что отвергает идею щелочного метасоматоза за счет внешнего источника.

## Результаты исследования и их обсуждение

В результате проведенных минералого-петрографических исследований пород и руд месторождения Угахан можно сделать следующие выводы:

1. Установлены три генерации карбонатных минералов, образованные в разное время и связанные с различными этапами формирования месторождения:

– кальцит, доломит чаще всего присутствуют в обломочном материале в породе;

– чешуйки синрудного сидерита присутствуют в основной зоне рудообразования в ассоциациях с сульфидными агрегатами (вероятно, формирование такой минерализации связано с восстановлением кислого флюида на сульфидных агрегатах, однако такой парагенезис на месторождении Угахан является исключением, а данный процесс не носит масштабного характера);

– поздние пойкилобласты анкерита и сидерита носят наложенный характер относительно рудного процесса.

2. В пределах месторождения повсеместно отмечается развитие агрегатов регенерационного кварца. Особенно масштабно данное явление наблюдается в верхних пачках бужуихтинской свиты, сложенных кварцевыми песчаниками. Во временном срезе поэтапного развития месторождения процесс регенерации кварца завершился до появления синрудного сидерита, который зачастую корродирует и обрастает кварцевыми зернами. Согласно данным, приведенным в статье О.В. Андреевой [21], верхняя пачка бужуихтинской свиты могла выполнять функцию покрышки на этапе развития катагенных процессов, которые, согласно работе Ю.И. Тарасовой [8], проходили здесь примерно 550 млн лет назад.

3. Развитие минеральных ассоциаций на месторождении происходило в следующем порядке: на ранней низкотемпературной стадии формировался фрамбоидальный и мелкий идиоморфный пирит (I и II), позже развивалась ассоциация высокотемпературных минералов, включающая арсенопирит, пирротин, пирит-III, самородное золото, галенит, сфалерит, блеклые руды, на пострудной стадии происходила кристаллизация пирита-IV в кварц-карбонатной оторочке.

Аналогичная последовательность образования минеральных ассоциаций выявлена на месторождениях Красный [8] и Сухой Лог [9, 11]. Это позволяет предполагать формирование рудной минерализации месторождений сухоложского типа в результате сходных рудообразующих процессов.

Тем не менее месторождение Угахан имеет ряд индивидуальных характеристик, связанных с расположением месторождения и его приуроченностью к бужуихтинской свите. Так, отмечается хорошая сохранность реликтов микрофитолитов относительно вышележащих горизонтов, что указывает на низкую степень метаморфического преобразования обломочных пород. Еще одной особенностью месторождения является слабое развитие арсенопирита, связанное с тем, что содержание мышьяка во вмещающих отложениях бужуихтинской свиты значительно ниже, чем в отложениях хомолхинской и аунакитской свит.

Наиболее значимой геохимической характеристикой месторождения Угахан является резкое увеличение содержания железа и серы в виде сульфидной минерализации (пирит, пирротин, галенит, халькопирит) в рудной зоне (рис. 6) [16]. При этом корреляция обоих элементов с золотом достигает +0,7. Важно отметить, что коррелирует именно закисное железо, характеризующее процесс сульфидизации, в то время как его окисная форма, связанная, по всей видимости, с железо-магнезиальными карбонатами (сидерит, анкерит), корреляции с золотом не имеет (+0,07).

В пределах рудной зоны месторождения Угахан содержания группы щелочных элементов ($K_2O$ и $Na_2O$), а также редких элементов (рубидий, литий, цезий) (см. рис. 6, *b*), которые традиционно считаются типичными элементами-гранитофилами, не проявляют какой-либо активности. Корреляционная связь данной группы элементов с золотом в рудных телах месторождения резко отрицательная (от -0,03 до -0,37), что аналогично их

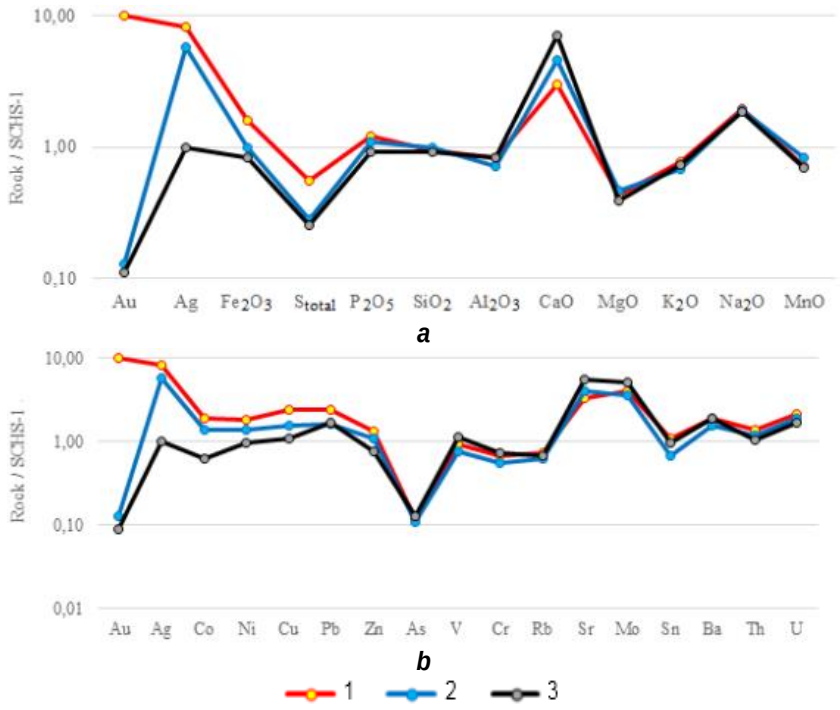



***Рис. 6. Распределение петрогенных (a) и редких (b) элементов на месторождении Угахан***
*(нормировано к SCHS-1 [20]):*
*1 – рудный материал; 2 – вмещающие породы; 3 – фон*
***Fig. 6. Distribution of petrogenic (a) and rare (b) elements in the Ugahan deposit***
*(normalized to SCHS-1 [20]):*
*1 – ore material; 2 – host rocks; 3 – background*

поведению в валовых пробах месторождений Красный и Сухой Лог [5, 8]. Это противоречит гипотезе о синрудном калий-натриевом метасоматозе, являющемся источником рудного вещества [22], и в целом отвергает идею рудоносного флюида, связанного со становлением гранитоидного батолита, предполагаемого по геофизическим данным на глубине [23, 24].

Несмотря на то что кварц является наиболее распространенным жильным минералом рудной зоны месторождения, общее содержание кремнезема в рудных и безрудных интервалах пород близко. Это также говорит об отсутствии привноса $SiO_2$ в зону рудоотложения из внешних источников. Аналогичные выводы сделаны ранее для месторождений Красный, Сухой Лог, Голец Высочайший, [8, 25].

Учитывая явное обогащение рудной зоны элементами сидеро-халькофильной группы, а также органическим углеродом, которые, согласно представлениям Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис [26], имеют высокую степень связи, можно предположить их совместную миграцию на этапе катагенного перераспределения с концентрированием в антиклинальных структурах. В многочисленных работах [27–32] этот факт подтверждается экспериментальными данными, опубликованными в крайне важном исследовании I. Sugiyama [33], показавшем возможность сорбции благородных металлов флюидом органического происхождения до содержаний, превышающих 1 г/т.

Резкое уменьшение содержаний CaO и $CO_2$ в интервалах с максимальными содержаниями золота, по всей вероятности, связано с их выносом за пределы месторождения, что предполагает формирование на этапе метаморфизма кислой среды за счет окисления органического вещества. При этом содержание $CO_2$ в рудной зоне снижается пропорционально снижению CaO, а их корреляция достигает 0,97. Данное предположение нашло подтверждение при изучении месторождения Голец Высочайший,

локализованного в залегающих выше отложениях хомолхинской свиты. В пределах рудной зоны месторождения Голец Высочайший по результатам изотопных исследований Sm-Nd и $\delta^{34}S$, проводившихся авторами данной статьи, установлено присутствие флюида, связанного с бужуихтинской свитой, при более чем трехкратном увеличении содержания $CO_2$. Таким образом, можно констатировать отсутствие концентрирования золота в рудной зоне месторождения Угахан за счет углекислотного метасоматоза. Соответственно, наложенная карбонатная минерализация не является поисковым критерием для руд данного месторождения.

Такая трактовка событий не противоречит модели формирования месторождений сухоложского типа за счет собственных ресурсов вмещающих отложений на этапе деструкции органического вещества при его взаимодействии с метаморфогенной водой. При этом фиксация золота связана с восстановлением метаморфогенного флюида на восстановительном барьере (формирование пирита-III), о чем свидетельствует развитие наночастиц самородного золота на поверхности пирита [34]. Таким образом, полученные данные предполагают низкую подвижность и ограниченное перераспределение рудных компонентов, включая золото, здесь же без переноса и дорудное концентрирование золота в метаосадках.

В пределах рудной зоны месторождения кроме непосредственно корреляции золота с $Fe_2O_3$ и общей серы также отмечается корреляционная связь с $Sb^{+0,7}$, $Pb^{+0,56}$, $Cu^{+0,51}$ и $Ag^{+0,32}$. В зоне околорудной минерализации корреляционная группа элементов полностью меняется. Здесь золото положительно коррелирует с $CO_2^{+0.5}$, $MgO^{+0.54}$, $CaO^{+0.39}$, $P2O5^{+0.37}$, $Sr^{+0.6}$. Такая смена ассоциации элементов также подтверждает предположение, что кислый флюид не привносил в рудные тела золото, а, возможно, наоборот, мигрировал из рудной зоны месторождения за его пределы, тем самым обедняя его. Особенностью месторождения являются крайне низкие содержания мышьяка как за пределами месторождения, так и в его рудной зоне, при этом корреляционная связь золота и мышьяка как в рудной зоне, так и за пределами месторождения варьирует от -0,03, до -0,21.

## Заключение

В результате проведенных геологических, минералого-петрографических и геохимических исследований можно сделать предварительный вывод относительно генетической принадлежности месторождения Угахан к сухоложскому типу, широко распространенному в пределах Бодайбинского синклинория.

Основание для отнесения месторождения Угахан к сухоложскому типу дают сопоставимость минералогических ассоциаций месторождения Угахан с детально изученными месторождениями Красный и Сухой Лог, а также отсутствие калий-натрового метасоматоза в пределах месторождения.

Приуроченность месторождения Угахан к бужуихтинской свите позволяет считать данное стратиграфическое подразделение перспективным для дальнейших поисков в нем месторождений золота.

Вынос углекислого флюида за пределы рудной зоны ограничивает масштабы концентрирования золота в отложениях бужуихтинской свиты, при этом обогащая вышележащие стратиграфические подразделения.

Содержание мышьяка в отложениях бужуихтинской свиты как основного сопутствующего золоту элемента в пределах Бодайбинского региона на порядок ниже, что предполагает его исключение из поисковых характеристик в рамках данного стратоуровня.

**Библиографический список**

1. Буряк В.А. Метаморфизм и рудообразование. М.: Недра, 1982. 256 с.

2. Буряк В.А. Источники золота и сопутствующих компонентов золоторудных месторождений в углеродсодержащих толщах // Геология рудных месторождений. 1986. № 6. С. 31–43.

3. Буряк В.А. Генетическая типизация месторождений золота в осадочных и вулканогенно-осадочных толщах // Доклады Академии наук СССР. 1988. Т. 299. № 3. С. 671–678.

4. Чернышев И.В., Чугаев А.В., Сафонов Ю.Г., Сароян М.Р., Юдовская М.А., Еремина А.В. Изотопный состав свинца по данным высокоточного MC-ICP-MS-метода и источники вещества крупномасштабного благороднометального месторождения Сухой Лог (Россия) // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 6. С. 550–559.

5. Немеров В.К., Спиридонов А.М., Развозжаева Э.А., Матель Н.Л., Будяк А.Е., Станевич А.М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов сухоложского типа // Отечественная геология. 2005. № 3. С. 3.

6. Немеров В.К., Станевич А.М., Развозжаева Э.А., Будяк А.Е., Корнилова Т.А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах байкало-патомского региона // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 5. С. 729–747.

7. Бабяк В.Н., Блинов А.В., Тарасова Ю.И., Будяк А.Е. Новые данные о геолого-структурных особенностях золоторудных месторождений Ожерелье, Ыканское, Угахан и Голец Высочайший // Науки о Земле и недропользование. 2019. Т. 42. № 4. С. 388–412. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412

8. Tarasova Yu.I., Budyak A.E., Chugaev A.V., Goryachev N.A., Tauson V.L., Skuzovatov S.Yu., et al. Mineralogical and isotope-geochemical (δ13C, δ34S and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits // Ore Geology Reviews. 2020. Vol. 119. P. 103365. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365

9. Large R.R., Maslennikov V.V., Robert F., DanyushevskY L.V., Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia // Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 2007. Vol. 102. No. 7. P. 1233–1267. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233

10. Буряк В.А., Хмелевская Н.М. Сухой Лог – одно из крупнейших золоторудных месторождений мира (генезис, закономерности размещения оруденения, критерии прогнозирования). Владивосток: Дальнаука, 1997. 156 с.

11. Meffre S., Large R.R., Scott R., Woodhead J., Chang Z., Gilbert S.E., et al. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2008. Vol. 72. Iss. 9. P. 2377–2391. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005

12. Powerman V., Shatsillo A., Chumakov N., Kapitonov I., Hourigan J. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia // Precambrian Research. 2015. Vol. 267. P. 39–71. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015

13. Yudovskaya M.A., Distler V.V., Prokofiev V.Yu., Akinfiev N.N. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits // Geoscience Frontiers. 2016. Vol. 7. Iss. 3. P. 453–481. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010

14. Будяк А.Е., Скузоватов С.Ю., Тарасова Ю.И., Ванг К.-Л., Горячев Н.А. Единая неопротерозойская – раннепалеозойская эволюция рудоносных осадочных комплексов юга Сибирского кратона // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 3. С. 335–339. https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339

15. Palenova E.E., Yudovskaya M.A., Frei D., Rodionov N.V. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization // Journal of Asian Earth Sciences. 2019. Vol. 174. P. 37–58. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.10.022

16. Parshin A.V., Budyak A.E., Babyak V.N. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: a case of additional flank exploration // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. P. 052079. https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079

17. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Скузоватов С.Ю. Геодинамические предпосылки формирования масштабного оруденения южного обрамления Сибирского кратона в протерозое // Доклады Академии наук. 2016. Т. 470. № 5. С. 562–565. https://doi.org/10.7868/S0869565216290181

18. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Шатагин К.Н., Олейникова Т.И., Тарасова Ю.И. [и др.]. Источники обломочного материала неопротерозойских метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) по Sm-Nd изотопным данным // Геохимия. 2017. № 1. С. 17–25.

19. Чугаев А.В., Будяк А.Е., Чернышев И.В., Дубинина Е.О., Гареев Б.И., Шатагин К.Н. [и др.]. Изотопные (Sm-Nd, Pb-Pb и $\delta^{34}S$) и геохимические характеристики метаосадочных пород Байкало-Патомского пояса (Северное Забайкалье) и эволюция осадочного бассейна в неопротерозойское время // Петрология. 2018. Т. 26. № 3. С. 213–244.

20. Petrov L.L., Kornakov Y.N., Korotaeva I.Ia., Anchutina E.A., Persikova L.A., Susloparova V.E., et al. Multi-element reference samples of black

shale // Geostandards and Geoanalytical Research. 2004. Vol. 28. No. 1. P. 89–102. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01045.x

21. Андреева О.В. Катагенез терригенных пород в осадочных внутрикратонных прогибах позднего протерозоя и его влияние на формирование U-оруденения типа «несогласия» // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 1. С. 49–70.

22. Русинов В.Л., Русинова О.В., Кряжев С.Г., Щегольков Ю.В., Алышева Э.И., Борисовский С.Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 1. С. 3–46.

23. Сафонов Ю.Г. Золоторудные и золотосодержащие месторождения мира – генезис и металлогенеческий потенциал // Геология рудных месторождений. 2003. Т. 45. № 4. С. 305–320.

24. Konstantinov M.M., Cherkasov S.V., Dankovtsov R.F., Egorkin A.V. Specific crustal features for large and superlarge endogenic gold deposits (Siberia and Far East regions) // Global Tectonics and Metallogeny. 1999. Vol. 7. No. 2. P. 143–147.

25. Будяк А.Е., Брюханова Н.Н. Селен, висмут и ртуть месторождений золота различных генетических типов в черносланцевых формациях // Геохимия. 2012. № 9. С. 881–888.

26. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.

27. Buchler J.W. Syntheses and properties of metalloporphyrins // The porphyrins / eds. D. Dolphin. Vol. I. New York: Academic Press, 1978. P. 389–483.

28. Manning D.A.C., Gize A.P. The role of organic matter in ore transport processes // Organic geochemistry: principles a. applications / eds. M.H. Engel, S.A. Macko. New York – London: Plenum press, 1993. P. 547–563.

29. Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Таусон В.Л., Будяк А.Е. Формы золота в геополимерах углистых сланцев (Патомское нагорье, Восточная Сибирь) // Геохимия. 2011. № 9. С. 998–1004.

30. Калинин Е.П. Геохимическая специфика нефти и ее природа // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. 2009. № 1 (169). С. 6–12.

31. Fuchs S., Schumann D., Williams-Jones A.E., Vali H. The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa // Chemical Geology. 2015. Vol. 393-394. P. 55–66.

32. Будяк А.Е., Горячев Н.А., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Соцкая О.Т., Брюханова Н.Н. Геохимия рассеянного органического вещества в золоторудных месторождениях черносланцевых формаций // Доклады Академии наук. 2015. Т. 463. № 6. С. 692–695. https://doi.org/10.7868/S0869565215240160

33. Sugiyama I. Metal transport by oil: application to ore genesis. Montreal: McGill University, 2015.

34. Таусон В.Л., Немеров В.К., Развозжаева Э.А., Спиридонов А.М., Липко С.В., Будяк А.Е. Парагенетические отношения пирита, углерода и золота на месторождении Сухой Лог и типоморфизм поверхности пирита // Доклады Академии наук. 2009. Т. 426. № 4. С. 528–532.

**References**

1. Buryak VA. *Metamorphism and ore formation*. Moscow: Nedra; 1982. 256 p. (In Russ.)

2. Buryak VA. Sources of gold and associated components of gold deposits in carbonaceous strata. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 1986;6:31–43. (In Russ.)

3. Buryak VA. Genetic typification of gold deposits in sedimentary and volcanic-sedimentary strata. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1988;299(3):671–678. (In Russ.)

4. Chernyshev IV, Chugaev AV, Safonov YG, Saroyan MR, Yudovskaya MA, Eremina AV. Isotopic composition of plumbum by the data of the high-fidelity MC-ICP-MS method, and the substance sources of the large-scale precious metal deposit (Sykhoi Log field, Russia). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2009;51(6):550–559. (In Russ.)

5. Nemerov VK, Spiridonov AM, Razvozzhayeva EA, Matel NL, Budyak AE, Stanevich AM. Major factors of ontogenesis of Sukhoi Log-type precious metals deposits. *Otechestvennaya geologiya*. 2005;3:3. (In Russ.)

6. Nemerov VK, Stanevich AM, Razvozzhaeva EA, Budyak AE, Kornilova TA. Biogenic sedimentation factors of ore formation in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region. *Geologiya i geofizika*. 2010;51(5):729–747. (In Russ.)

7. Babyak VN, Blinov AV, Tarasova JI, Budyak AE. New data on the geological and structural features of the Ozhereliye, Ykanskoye, Ugahan and Golets Vysochaishy gold fields. *Earth sciences and subsoil use.* 2019;42(4):388–412. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2019-42-4-388-412

8. Tarasova YuI, Budyak AE, Chugaev AV, Goryachev NA, Tauson VL, Skuzovatov SYu, et al. Mineralogical and isotope-geochemical (δ13C, δ34S and Pb-Pb) characteristics of the Krasniy gold mine (Baikal-Patom Highlands): constraining ore-forming mechanisms and the model for Sukhoi Log-type deposits. *Ore Geology Reviews*. 2020;119:103365. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103365

9. Large RR, Maslennikov VV, Robert F, DanyushevskY LV, Chang Z. Multistage sedimentary and metamorphic origin of pyrite and gold in the giant Sukhoi Log deposit, Lena Goldfield, Russia. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. 2007;102(7):1233–1267. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.102.7.1233

10. Buryak VA, Khmelevskaya NM. *Suknoy Log, one of the greatest gold ore deposits in the world (genesis, distribution patterns, prospecting criteria)*. Vladivostok: Dal'nauka; 1997. 156 p. (In Russ.)

11. Meffre S, Large RR, Scott R, Woodhead J, Chang Z, Gilbert SE, et al. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2008;72(9):2377–2391. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.03.005

12. Powerman V, Shatsillo A, Chumakov N, Kapitonov I, Hourigan J. Interaction between the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) and the Siberian craton as recorded by detrital zircon suites from Transbaikalia. *Precambrian Research*. 2015;267:39–71. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.05.015

13. Yudovskaya MA, Distler VV, Prokofiev VYu, Akinfiev NN. Gold mineralisation and orogenic metamorphism in the Lena province of Siberia as assessed from Chertovo Koryto and Sukhoi Log deposits. *Geoscience Frontiers*. 2016;7(3):453–481. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.07.010

14. Budyak AE, Skuzovatov SY, Tarasova YI, Wang KL, Goryachev NA. Common Neoproterozoic – early paleozoic evolution of ore-bearing sedimentary complexes in the southern Siberian craton. *Doklady Akademii nauk*. 2019;484(3):335–339. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/S0869-56524843335-339

15. Palenova EE, Yudovskaya MA, Frei D, Rodionov NV. Detrital zircon U–Pb ages of Paleo- to Neoproterozoic black shales of the Baikal-Patom Highlands in Siberia with implications to timing of metamorphism and gold mineralization. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019;174:37–58. https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.10.022

16. Parshin AV, Budyak AE, Babyak VN. Interpretation of integrated aerial geophysical surveys by unmanned aerial vehicles in mining: a case of additional flank exploration. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science*. 2020;459:052079. https://doi.org/10.1088/1755-1315/459/5/052079

17. Budyak AE, Goryachev NA, Skuzovatov SY. Geological background to the formation of the large-scale mineralization of the southern margin of the Siberian craton in the Proterozoic period. *Doklady Akademii nauk*. 2016;470(5):562–565. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869565216290181

18. Chugaev AV, Budyak AE, Chernyshev IV, Shatagin KN, Oleinikova TI, Tarasova YI, et al. The sources of the detritus of the Neoproterozoic metasedimentary rocks in the Baikal-Patom belt (Northern Transbaikalia) by Sm-Nd isotope data. *Geokhimiya*. 2017;1:17–25. (In Russ.)

19. Chugaev AV, Budyak AE, Chernyshev IV, Dubinina EO, Gareev BI, Shatagin KN, et al. Isotope (Sm-Nd, Pb-Pb, and $\delta^{34}S$) and geochemical characteristics of the meta-sedimentary rocks in the Baikal-Patom belt (Northern Transbaikalia) and Neoproterozoic evolution of the sedimentary basin. *Petrologiya*. 2018;26(3):213–244. (In Russ.)

20. Petrov LL, Kornakov YN, Korotaeva IIa, Anchutina EA, Persikova LA, Susloparova VE, et al. Multi-element reference samples of black shale. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2004;28(1):89–102. https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2004.tb01045.x

21. Andreeva OV. Catagenesis of terrigenous rocks in sedimentary intracratonic troughs of the Late Proterozoic and its influence on the formation of U-mineralization of the “disagreement” type. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2012;54(1):49–70. (In Russ.)

22. Rusinov VL, Rusinova OV, Kryazhev SG, Shchegol'kov YuV, Alysheva EI, Borisovsky SE. Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore district. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2008;50(1):3–46. (In Russ.)

23. Safonov YuG. World’s gold-ore and gold-bearing deposits: genesis and metallogenic potential. *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2003;45(4):305–320. (In Russ.)

24. Konstantinov MM, Cherkasov SV, Dankovtsov RF, Egorkin, AV. Specific crustal features for large and superlarge endogenic gold deposits (Siberia and Far East regions). *Global Tectonics and Metallogeny*. 1999;7(2):143–147.

25. Budyak AE, Bryukhanova NN. Selenium, bismuth and mercury of gold fields of different genetic types in black-slate formations. *Geokhimiya*. 2012;9:881–888. (In Russ.)

26. Yudovich YaE, Ketris MP. *Geochemistry of black shale*. Leningrad: Nauka; 1988. 272 p. (In Russ.)

27. Buchler JW. Syntheses and properties of metalloporphyrins. In: Dolphin D (eds.). *The porphyrins*. Vol. I. New York: Academic Press; 1978. p.389–483.

28. Manning DAC, Gize AP. The role of organic matter in ore transport processes. In: Engel MH, Macko SA (eds.). *Organic geochemistry: principles a. applications*. New York – London: Plenum press; 1993. p.547–563.

29. Razvozzhaeva EA, Spiridonov AM, Tauson VL, Budyak AE. Forms of gold in the carbonaceous shale geopolymers: Patom upland, Eastern Siberia. *Geokhimiya*. 2011;9:998–1004. (In Russ.)

30. Kalinin EP. Geochemical specificity of oil and its nature. *Vestnik Instituta geologii Komi nauchnogo tsentra Ural'skogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk* = Vestnik of the Institute of Geology of the Komi Science Centre UB RAS. 2009;1:6–12. (In Russ.)

31. Fuchs S, Schumann D, Williams-Jones AE, Vali H. The growth and concentration of uranium and titanium minerals in hydrocarbons of the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Chemical Geology*. 2015;393-394:55–66.

32. Budyak AE, Goryachev NA, Razvozzhaeva EA, Spiridonov AM, Sotskaya OT, Bryukhanova NN. Geochemistry of the scattered organic substance in gold fields of black-slate formations. *Doklady*

*Akademii nauk*. 2015;463(6):692–695. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0869565215240160

33. Sugiyama I. *Metal transport by oil: application to ore genesis*. Montreal: McGill University; 2015.

34. Tauson VL, Nemerov VK, Razvozzhaeva EA, Spiridonov AM, Lipko SV, Budyak AE. Paragenetic relations of pyrite, carbon and gold at the Sukhoi Log deposit and typomorphism of the pyrite surface. *Doklady Akademii nauk*. 2009;426(4):528–532. (In Russ.)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Блинов А.В., Тарасова Ю.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Anton V. Blinov, Julia I. Tarasova 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Блинов Антон Валерьевич,**
младший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия,
✉ e-mail: belor_cool@mail.ru
**Anton V. Blinov,**
Junior Researcher, Laboratory of Ore Formation Geochemistry and Geochemical Prospecting Methods,
Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS,
1a Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: belor_cool@mail.ru

**Тарасова Юлия Игоревна,**
кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник лаборатории геохимии рудообразования и геохимических методов поисков,
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия,
научный сотрудник,
Иркутский научный центр СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия,
e-mail: j.tarasova84@yandex.ru
**Julia I. Tarasova,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher, Laboratory of Ore Formation Geochemistry and Geochemical Prospecting Methods,
Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS,
1a Favorsky St., Irkutsk 664033, Russia,
Researcher,
Irkutsk Scientific Center, SB RAS,
134 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: j.tarasova84@yandex.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 549+551.21+552.4(470)**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-177-193**

# Апокимберлиты реки Вакунайки: новые данные и перспективы

**© П.Ф. Иванов[a], Т.И. Хмельницкая[b]**
[a,b]ООО «Ангарская инвестиционная компания», г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** С 1947 г. в Иркутской области были начаты поиски алмазов и их источников. После открытия крупных алмазных месторождений Якутии масштабные поиски алмазов в Иркутской области по ряду различных причин были практически прекращены, несмотря на многочисленные находки их кристаллов в аллювии крупных водотоков севера и юга региона. Общие поиски алмазов в платформенной части области проводились посредством групповой геологической съемки и тематических работ. К сожалению, несмотря на полувековую историю поисков, коренные источники алмазов в пределах платформенной части Иркутской области выявить не удалось. Описываемая территория входит в состав Нижне-Тунгусского (Непско-Чонского) алмазоносного района. Его алмазоносность обусловлена магматическим, литолого-стратиграфическим, структурно-тектоническим, минералогическим и геоморфологическим факторами. Перспектива алмазоносности площади была установлена в ходе многолетних геолого-разведочных работ Иркутского геологического управления (ПГО «Иркутскгеология»), Амакинской экспедиции (ПГО «Якутскгеология»), а также тематических работ научно-производственных организаций Советского Союза и Российской Федерации. При помощи метода шлихового опробования в большинстве водотоков площади были выявлены парагенетические минералы – спутники алмаза – пиропы и хромшпинелиды. С 2006 г. целенаправленные поисковые работы на алмазы в контурах Иркутской области, в том числе в Катангском районе, проводит ООО «Ангарская инвестиционная компания». Цель этих исследований заключается в поисках коренных источников алмазов. Объектом исследования является Верхнечонская лицензионная площадь (далее – Иркутская площадь). Методы проводимых исследований включают: поисковые маршруты, шлиховое, мелко-объемное и глубинное шлиховое опробование, наземную магнитометрию, проходку шурфов и скважин колонкового бурения для заверки геофизических и минералогических аномалий, выделенных по итогам предшествующих и собственных алмазопоисковых работ, аналитические, лабораторные работы и камеральную обработку полученных данных. Одним из наиболее значимых результатов проводимых исследований для этой территории стала находка пород кимберлитовой природы. Впервые на территории Сибирской платформы – на севере Иркутской области – были выявлены образования, которые по минералогическим, геохимическим и петрохимическим данным сопоставимы с кимберлитами. Образования получили рабочее название апокимберлиты. Породы подверглись интенсивным наложенным процессам, практически целиком изменившим их первичный облик и состав. Они слагают диатрему сложной морфологии, строение которой несет следы неоднократных тектонических подвижек. Структурно-тектоническое положение диатремы во многом аналогично кимберлитовым трубкам и дайкам Якутской алмазоносной провинции**.** Основным выводом проведенных исследований является то, что находка ультраосновных пород кимберлитовой группы позволит рассматривать перспективы коренной алмазоносности северных территорий Иркутской области как очень высокие.

***Ключевые слова:*** апокимберлиты, Иркутская площадь, диатрема, алмазоносность, кимберлитовые поля

***Информация о статье:*** Дата поступления 11 марта 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Иванов П.Ф., Хмельницкая Т.И. Апокимберлиты реки Вакунайки: новые данные и перспективы. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 177–193. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-177-193

# Altered kimberlites of the Vakunaika river: new data and prospects

**© Pyotr F. Ivanov[a], Tamara I. Khmelnitskaya[b]**
[a,b]LLC Angarsk Investment Company, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** Prospecting for diamonds and their sources started in the Irkutsk region in 1947. After the large diamond deposits were discovered in Yakutia, the high-scale diamond prospecting in the Irkutsk region was nearly abandoned for a number of reasons though there were numerous diamond crystals found in the alluvium of the major

watercourses in the north and south of the region. The general search for diamonds in the platform part of the region was conducted by geological survey and dedicated research projects. However, the half-century prospecting failed to identify primary diamond sources in the platform part of the Irkutsk region. The described territory belongs to the Lower-Tunguska (Nepa-Chona) diamond province. Its diamond content is attributable to the magmatic, lithologic-stratigraphic, tectonic, mineralogical, and geomorphological factors. The diamond-bearing prospects of the area were determined by the many-year exploration conducted by the Irkutsk Geology Directorate ("PGO Irkutskgeologia"), the Amakinskaya survey party ("PGO Yakutskgeologia"), and by the dedicated projects of the research-and-production organizations of the USSR and Russian Federation. The heavy mineral sampling identified pyropes and chromespinelides, the minerals that are paragenetically associated with diamonds, in most of the watercourses of the area. LLC Angarsk Investment Company has been prospecting for diamonds in the Irkutsk region including the Katangsky district, since 2006. The aim of the exploration is to identify primary diamond sources, the research object being Verkhnechonskaya license area (hereinafter, Irkutsk area). The research methods include reconnaissance traverse, heavy mineral sampling in small volumes and from depth, ground-based magnetometry, prospecting and core drilling to verify the geophysical and mineralogical anomalies identified by the previous diamond prospecting operations, analytical and laboratory studies, and processing of the obtained data. One of the most significant research results is the discovery of the rocks of kimberlite nature. For the first time, the search in the Siberian platform area has identified formations that resemble kimberlites by their mineralogical, geochemical and petrochemical data. The formations have been provisionally named altered kimberlites. The rocks had been subjected to the intensive superimposed processes that nearly completely altered their original appearance and composition. They form a diatreme of complex morphology, the structure of which shows the signs of repeated tectonic shifts. The structural and tectonic conditions of the diatreme are in many respects similar to those of the kimberlite pipes in the Yakutia diamond-bearing province. The main conclusion is that the discovery of the ultrabasic rocks of the kimberlite group allows us to consider the primary diamond potential of the northern areas in the Irkutsk region to be very high.

***Keywords:*** altered kimberlites, Irkutsk area, pipe, diamond-bearing, kimberlite fields

***Information about the article:*** Received March 11, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Ivanov PF, Khmelnitskaya TI. Altered kimberlites of the Vakunaika river: new data and prospects. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):177–193. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-177-193

## Введение

В 2010 г. в верхнем течении р. Вакунайки при проведении полевых поисковых работ был обнаружен небольшой коренной выход интенсивно измененных пород, которые в поле были диагностированы как «серпентиниты». Это зеленовато-серого цвета порода обломочно-пятнистого облика с фрагментами неоднородно-ячеистого строения, напоминающая бластоагломератовую структуру, с неясно выраженной сланцеватостью, очень вязкая (рис. 1). В ней наблюдаются обособления темно-зеленого и белого цвета, реже отмечаются прямоугольные реликты кристаллов, полностью замещенные глинистым веществом белого цвета (сапонитом?). Текстура образований неясно крупнообломочная, участками узловато-пятнистая. При ударе молотком порода раскалывается на неровные куски и плитки.

Первичный ультраосновной состав матрикса установлен по наличию оливина двух генераций, перовскита, характеру вторичных изменений (серпентинизации, карбонатизации), реликтов флогопита и развивающегося по нему вторичного хлорита. Сходство с кимберлитами обусловлено как близким химическим составом породы, так и структурно-текстурными особенностями.

В пределах выявленного тела широко развиты породы с брекчиевидной пятнисто-узорчатой текстурой. Структура пород – петельчатая, замещения и обломочная. Минералогический анализ проб показал весовые содержания серпентина, хромита, перовскита, оливина (форстерит), гроссуляра, кальцита, сульфидных минералов, барита, знаки флогопита, андрадита, шпинели. Алмазы, пиропы и пикроильмениты в породе выявлены не были.

По химическому составу породы относятся к ультраосновным. Сравнительные характеристики химического состава пород, пересчитанные по методу А.Н. Заварицкого, близки к эталонным образцам известных кимберлитовых тел.

Сравнение содержаний породообразующих окислов описываемых образований с содержаниями окислов образцов из трубки «Мир» и средними содержаниями известных кимберлитовых трубок Якутии позволяет соотнести описываемые породы с кимберлитами (табл. 1).

***Рис. 1. Полированный штуф апокимберлитов***
***Fig. 1. Polished lump of altered kimberlite***

**Таблица 1**

**Сравнительная таблица химических составов кимберлитов трубки «Мир» по данным И.П. Илупина и др. [1] и апокимберлитов Иркутской площади, %**

**Table 1**

**Comparison of the chemical composition of the “Mir” pipe kimberlites according to I.P. Ilupin et al. [1], and the altered kimberlites of the Irkutsk area, %**

| Окислы | Номер образца и глубина взятия из трубки «Мир» (в скобках), м | | | | | | Апокимберлит, среднее из 9 анализов |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ZM-42 (-300) | ZM-35 (-617) | ZM-54 | BM-1131 | BM-1146 | BM-1174 | |
| $SiO_2$ | 28,4 | 34,75 | 36,25 | 24,72 | 28,1 | 27,1 | 31,19 |
| $TiO_2$ | 1,34 | 0,67 | 0,93 | 2 | 1,43 | 2,04 | 0,48 |
| $Al_2O_3$ | 3 | 3,54 | 3,07 | 2,38 | 2,62 | 2,36 | 5,83 |
| $Fe_2O_3$ | 5,88 | 4,14 | 4,83 | 7,76 | 6,54 | 6,64 | 2,85 |
| FeO | 2,98 | 2,87 | 2,96 | 7,77 | 2,32 | 2,47 | 0,75 |
| $Cr_2O_3$ | 0,18 | 0,12 | 0,16 | 0,27 | 0,14 | 0,07 | Не опр. |
| $V_2O_3$ | 0,023 | 0,015 | 0,007 | 0,038 | 0,015 | | Не опр. |
| MnO | 0,17 | 0,08 | 0,16 | 0,16 | 0,17 | 0,17 | 0,12 |
| MgO | 25,72 | 29,06 | 32,08 | 29,46 | 31,63 | 29,27 | 30,78 |
| CaO | 12,41 | 7,94 | 4,01 | 10,36 | 7,79 | 9,99 | 9,16 |
| $K_2O$ | 2,21 | 1,39 | 1,97 | 0,56 | 0,89 | 1,1 | 0,1 |
| $Na_2O$ | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,08 | 0,11 | 0,22 | 0,23 |
| NiO | 0,14 | 0,15 | 0,1 | 0,13 | 0,13 | 0,15 | Не опр. |
| CoO | 0,02 | 0,018 | 0,024 | 0,02 | 0,02 | 0,022 | Не опр. |
| $P_2O_5$ | 0,87 | 0,35 | 0,43 | 0,71 | 0,6 | 0,6 | 0,027 |
| $SO_3$ | 0,16 | 2,47 | 0,16 | 0,08 | 0,04 | 0,5 | Не опр. |
| $CO_2$ | 7,52 | 2,24 | 1,95 | 3,08 | 0,28 | 6,03 | Не опр. |
| S | 0,33 | 0,22 | 0,064 | 0,01 | 0,03 | Не обн. | Не опр. |
| П.п.п. | Не обн. | Не обн. | 0,58 | 3,32 | 4,96 | 1,92 | 19,21 |

*Примечание.* П.п.п. – потери при прокаливании; не обн. – не обнаружено; не опр. – не определено.
*Note.* П.п.п. – losses due baking; не обн. – not found; не опр. – not identified.

## Материалы и методы исследования

С целью изучения выявленных образований, их структурно-тектонического положения и взаимоотношения с вмещающими породами в 2011–2012 гг. был проведен комплекс полевых исследований в контурах выделенного детального участка Северного. Было проведено колонковое бурение, осуществлены проходка канав, шурфов и расчисток и их шлиховое опробование, заверка элементов дешифрирования аэрофотоматериалов и интерпретация материалов аэромагнитной съемки, опробование всех магматических разновидностей ультраосновных и основных пород, составлена геологическая карта. Осуществлен ряд лабораторных и химико-аналитических испытаний вещества апокимберлитов, выполнены петрографические описания, минералогические и микрозондовые исследования. Изучение фазового и химического составов минералов было выполнено с использованием растрового электронного микроскопа в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии геологического факультета Московского государственного университета (МГУ). В данной статье результаты фазового и химического состава породообразующих минералов апокимберлитов не приводятся ввиду ограниченного объема публикации.

При изучении апокимберлитов Иркутской площади (ИП) применялись следующие виды анализов: силикатный количественный химический анализ, выполненный рентгенофлюоресцентным методом; микроэлементный рентгенофлюоресцентный анализ (15 элементов), методы масс-спектрометрии и атомно-эмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой (4 пробы, 31 элемент). Силикатные анализы 9 проб выполнены в химической лаборатории Института геохимии СО РАН г. Иркутска (прибор S4 Pioneer, Bruker), 4 проб – в химической лаборатории МГУ г. Москвы. Физические свойства апокимберлитов изучались следующим образом: остаточная намагниченность измерялась каппаметром по всем образцам из горных выработок и керну скважин, плотность образцов – в лаборатории. На основе всех полученных данных был проведен сравнительный анализ апокимберлитов ИП, кимберлитов Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) и других ультраосновных пород.

Кроме этого, были определены следующие параметры апокимберлитов: природная влажность – 0,355 %, пористость – 15,45 г/см$^3$, плотность частиц – 3 г/м$^3$. По всем значениям физических величин апокимберлиты ИП практически идентичны средним кимберлитам ЯАП.

Петрографические исследования проводились как собственными силами, так и с привлечением геологов, специализирующихся на изучении петрологии кимберлитов, лампроитов и ультраосновных пород. Петрографические определения пород выполнены В.М. Кулигиной (один из основателей петрографической школы иркутских геологов-съемщиков), Т.И. Хмельницкой (ООО «Ангарская инвестиционная компания» (ООО АИК)), Г.В. Орловой, К.Н. Егоровым (Институт земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН)), В.П. Корниловой (центральная аналитическая лаборатория Ботуобинской геологоразведочной экспедиции АК АЛРОСА (ЦАЛ БГРЭ АК АЛРОСА)), В.К. Гараниным, А.В. Бовкуном (геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова). Всего было просмотрено более 100 прозрачных шлифов и около 50 полированных штуфов из апокимберлитов.

## Результаты исследования и их анализ

В результате проведенных геологоразведочных работ получены данные, подтверждающие находку на севере Иркутской области – в бассейне р. Вакунайки – щелочных ультраосновных пород кимберлитового ряда. За породами закрепилось рабочее название апокимберлиты. Последние слагают сложнопостроенную диатрему, строение которой было нарушено неоднократными тектониче-

скими подвижками и внедрением более поздних щелочных долеритов. На участке широко проявлены гидротермально-метасоматические процессы, связанные с трапповым магматизмом.

Апокимберлиты отличаются от долеритов и палеобазальтов значительной степенью выветривания. В открытых горных выработках, пройденных по апокимберлитам, отмечаются лишь дресва и мелкие несвязанные их обломки. Плотные апокимберлиты были выявлены только в скважинах на глубине не менее 7–8 м от дневной поверхности и в единственном коренном выходе (точка наблюдения 1923) (рис. 2). Субгоризонтальные контакты апокимберлитов с долеритами установлены в скважинах, на поверхности они не наблюдались. С палеобазальтами апокимберлиты образуют контакты сложной извилистой формы и эруптивные брекчии. Пространство между обломками палеобазальтов заполнено апокимберлитами, а в самих палеобазальтах наблюдаются их многочисленные прожилки и просечки, что свидетельствует о формировании на ранней стадии дробления базальтов структур растяжения, современных внедрению кимберлитов, которые «залечивали» зияющие полости и трещины.

В скважине 9 был отмечен контакт апокимберлитов с породами литвинцевской свиты. Известняки в результате многостадийных гидротермально-метасоматических преобразований были превращены в известковистые скарны. Контакт палеобазальтов с известняками крепкий, «сваренный», участками брекчированный, линия контакта образует сложные прямолинейно-извилистые формы. Вдоль линии контакта развиваются зоны рассланцевания, зеркала скольжения и приуроченные к ним гидроокислы железа. Характер трещиноватости во всех породах различен. Для кимберлитов характерно сочетание пологих и крутых систем трещин. Пологие трещины северо-западного простирания подчеркивают своеобразную наклонную отдельность кимберлитов с углами падения 10–15° (см. рис. 2).

Подобный тип «пологой отдельности» является характерным для кимберлитов Якутии [2]. Иногда параллельно этой системе трещиноватости в кимберлитах развиваются пологие разрывные нарушения типа взбросо-надвигов субширотного и запад-северо-западного

***Рис. 2. Пологая наклонная трещиноватость (отдельность) в апокимберлитах (точка наблюдения 1923)***
*По этой системе трещин зафиксированы пологие разрывы взбросо-надвигового типа*
***Fig. 2. Mildly sloping inclined fracture (jointing) in the altered kimberlites (observation point 1923)***
*In this fracture system, sloping gaps of the thrust slice and slide type have been registered*

простирания[1]. В известняках отмечается хаотичная система нелинейной трещиноватости, а на контакте с базитами – псевдоскладчатость, сформированная двумя системами трещин.

В пределах диатремы наблюдаются маломощные разрывные нарушения небольшой амплитуды. Для всех пород, кроме долеритов, характерна мелкая сухая трещиноватость. Особенно ярко она проявлена в палеобазальтах в скважине 10, где с первых же метров проходки возникли трудности с подъемом керна и его документацией. При выходе из снаряда керн нередко «взрывался» и рассыпался на мелкие обломки размером от 1 до 3–5 см, словно находился под сильным давлением (глубинным) или напряжением, хотя глубина скважины не превышала 50 м.

Диатрема вскрывается в правом борту небольшого ручья, русло которого приурочено к осевой части разрывного нарушения северо-восточного простирания. Кимберлитовое тело приурочено к узлу пересечения разлома северо-восточного простирания (входящего в осевую систему субпараллельных разрывов Ангаро-Вилюйской зоны глубинных разломов) с разломом северо-западного простирания [3]. Узел сопряжения обоих разломов находится в сфере влияния мощной (около 20 км) тектонической зоны субширотного направления, выделенной по данным интерпретации аэромагнитной съемки и дешифрирования аэрофото- и космоснимков.

Наиболее детально петрографические и электронно-зондовые исследования были выполнены по просьбе руководства ООО АИК в лаборатории месторождений алмаза геологического факультета МГУ В.К. Гараниным и А.В. Бовкуном. Результаты электронно-зондового исследования породообразующих минералов апокимберлитов не рассматриваются в данной статье ввиду ограниченного объема публикации. Во многом наши собственные наблюдения полностью аналогичны выводам, полученным указанными авторами. Ниже приведены результаты петрографического изучения апокимберлитов. Отметим, что фотографии и описания шлифов выполнены В.К. Гараниным и А.В. Бовкуном. Мы включили эти описания и фотографии в статью, учитывая их отличное качество.

Исследованные образцы из скважины С1 представляют собой породу, значительно разубоженную ксенолитами вмещающих пород (ороговикованными алевролитами) (рис. 3). Объем ксенолитов составляет не менее 40 %, размер – до 1 см. Оставшиеся 60 % образца представлены кимберлитоподобной породой с порфировой структурой. Вкрапленники составляют около трети ее объема и представлены зернами округлой и идиоморфной (гексагональной) формы размерами 0,1–0,5 мм. Они сложены серпентином, образующим псевдоморфозы предположительно по оливину одной генерации. Наряду с оливином в породе, возможно, присутствовал монтичеллит, так как морфология некоторых зерен и их характерное расположение в виде плотно примыкающих друг к другу выделений не исключают такой возможности. Связующая масса породы представлена тонкозернистым серпентиновым агрегатом с примесью слюды, редкими выделениями карбоната и многочисленными мелкими (обычно до 50, редко – до 100 мкм) зернами рудных минералов.

Слюда встречается в виде игольчатых и таблитчатых выделений размерами 10–50, реже до 100 мкм и представлена в различной степени хлоритизированным флогопитом. Зерна слюды распределены неравномерно и локализованы вблизи обломков роговиков, что предполагает вторичную природу слюдистых минералов. Количество слюды на таких участках может достигать 20 % от связующей массы породы.

Кальцит образует единичные выделения неправильной формы размером до 100 мкм.

[1] Гладков А.С., Борняков С.А., Манаков А.В., Матросов В.А. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах: метод. пособие. М.: Научный мир, 2008. 175 с.

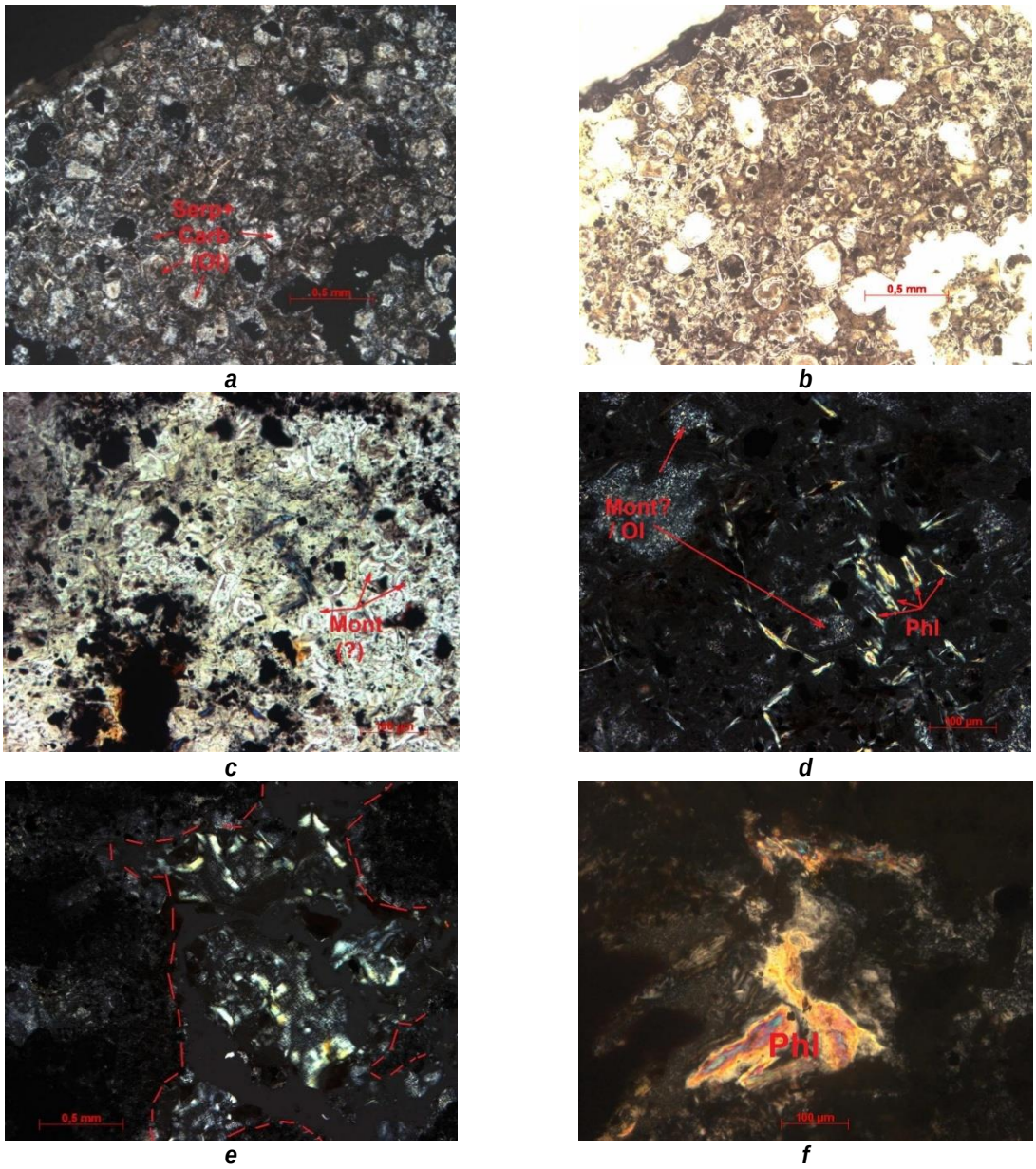



***Рис. 3. Общий вид кимберлитовой (?) породы из скважины С1 (образец С1/14,2) под микроскопом при скрещенных (a, c–f) и параллельных (b) николях***
***Fig. 3. General view of the kimberlite (?) rock from well C1 (sample C1/14,2) under the microscope with crossed (a, c–f) and parallel (b) Nicols***

Рудные минералы составляют порядка 5–7 об. % связующей массы и обычно представлены идиоморфными зернами размером до 50 мкм, реже зернами неправильной формы размером до 100 мкм.

В целом представленные образцы из скважины С1 и скважин С2 и С3 схожи, отличаются они главным образом количеством ксенолитов роговиков, вкрапленников оливина (псевдоморфоз по нему), зерен хлоритизированной слюды, выделений, похожих на монтичеллит, соотношением карбоната и серпентина в связующей массе. В шлифе С1/19,9 предполагается наличие оливина не одной, а двух генераций. В образце С2/28,5 присутствуют многочисленные обломки субщелочных базальтоидов трапповой формации.

Исследованные образцы из точки наблюдения 1923 (коренное обнажение) представлены породой, состоящей из крупных – до 1 см – выделений оливина, сцементированных серпентин-кальцитовым материалом. Ксенолиты вмещающих пород представлены преимущественно

роговиками, имеют размер до 2 см и составляют до 50 % образца (рис. 4).

Оливин в породе распределен неравномерно, нередко составляет 20–25 % от общего объема породы. Представлен оливин интенсивно трещиноватыми и дроблеными зернами округлой формы, а также их скоплениями. Частично серпентинизирован. Реликты неизмененного оливина составляют около половины или чуть более объема подобных образований.

Кальцит образует гнездовые и прожилковые выделения неправильной формы размером до 1 см. Количество кальцита составляет около 20 % от объема породы.

Серпентин слагает половину объема породы и представлен преимущественно мелкими (20–50, реже 100 мкм) округлыми зернами – это псевдоморфозы по оливину либо, предположительно, монтичеллиту. Его более крупные выделения (до 600 мкм) наблюдаются по периферии прожилков кальцита и в измененных участках оливиновых скоплений.

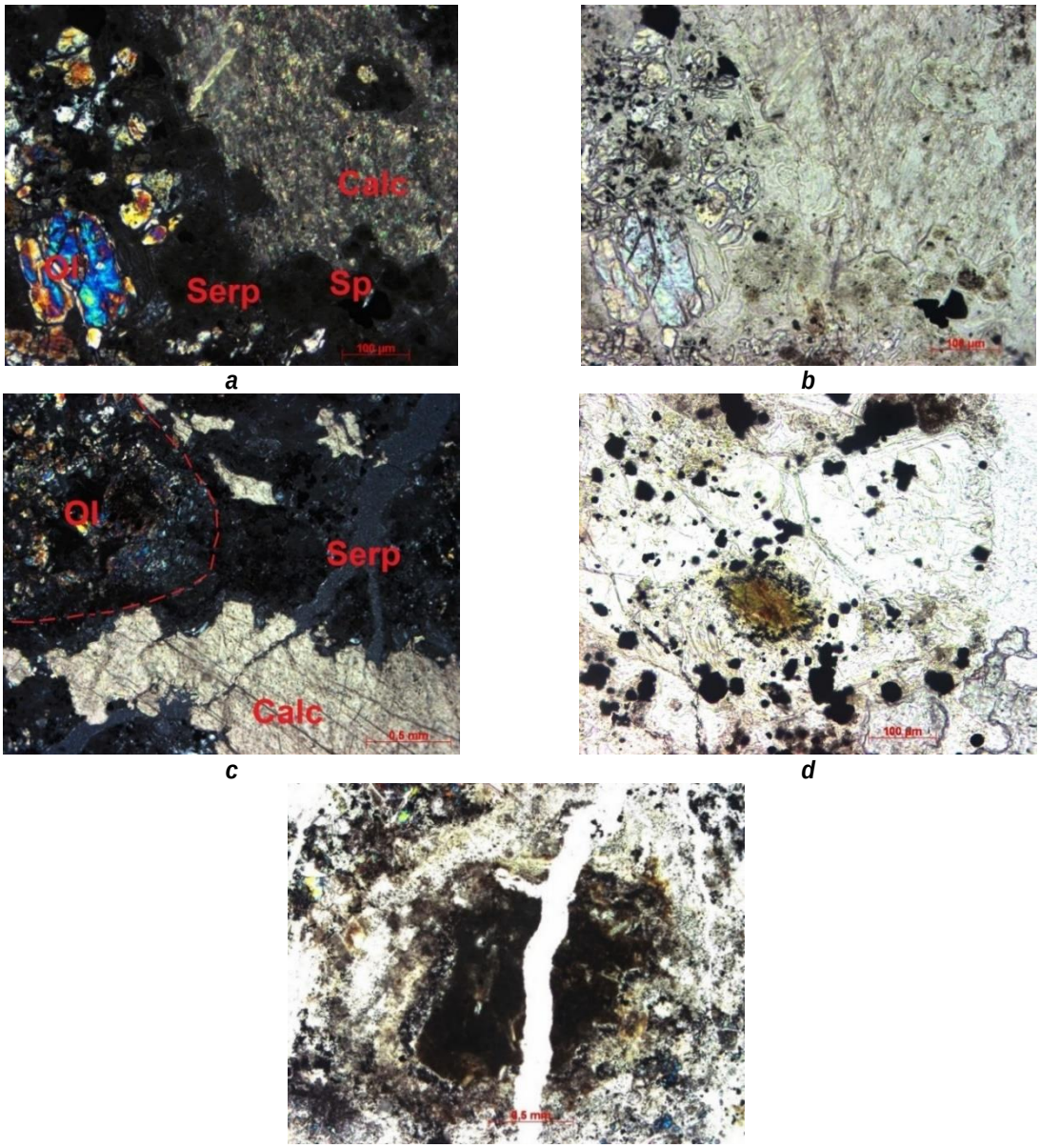



***Рис. 4. Общий вид породы. Образец 1923 под микроскопом при скрещенных (a, c) и параллельных (b, d, e) николях***
***Fig. 4. General view of the rock. Sample 1923 under the microscope with crossed (a, c) and parallel (b, d, e) Nicols***

Рудные минералы составляют порядка 3–5 % связующей массы пород и обычно имеют идиоморфный облик, их размер – до 50 мкм.

Химические анализы выполнены по всем разновидностям магматических пород ИП на участке Северном (апокимберлиты, палеобазальты и долериты). Наиболее полно были охарактеризованы апокимберлиты (табл. 2, 13 анализов). По долеритам и палеобазальтам было выполнено по два химических анализа. Поскольку базальты повсеместно образуют эруптивные брекчии с тонкими прожилками апокимберлитового состава, в пробу отбирались наименее измененные участки пород.

Апокимберлиты ИП по средним содержаниям оксидов аналогичны кимберлитам Сибирской платформы и незначительно отличаются от них пониженными содержаниями $TiO_2$, FeO, $Fe_2O_3$ и повышенными содержаниями $AL_2O_3$. Согласно одной из схем петрохимической классификации кимберлитов ЯАП (рис. 5) [4], по содержанию FeO, $TiO_2$, $K_2O$ апокимберлиты ИП близки к высокомагнезиальным, низкотитанистым и низкокалиевым

**Таблица 2**

**Химический состав апокимберлитов Иркутской площади**

**Table 2**

**Chemical composition of the altered kimberlites, Irkutsk area**

| Протокол химического анализа апокимберлитов Иркутской площади | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номер пробы | * | Содержание породообразующих окислов, % | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | $SiO_2$ | $AL_2O_3$ | $TiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | MnO | MgO | CaO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $P_2O_5$ | $S_{общ}$ | $CO_2$ | $H_2O$ | П.п.п. | Сумма |
| 1923 а | М | 27,6 | 7,72 | 0,89 | 2,85 | 0,94 | 0,056 | 28,2 | 12,8 | <1,0 | 0,031 | <0,5 | Н/о | Н/о | Н/о | 18,7 | 100 |
| С1/ 6,1 | М | 33,1 | 7,18 | 0,72 | 2,85 | 0,79 | 0,065 | 34,9 | 3,49 | 0,11 | 0,11 | <0,5 | Н/о | Н/о | Н/о | 16,6 | 100 |
| С8/ 48-48,5 | М | 35,1 | 4,5 | 0,39 | 2,23 | 0,47 | 0,078 | 35,5 | 4,12 | <1,0 | 0,02 | <0,5 | Н/о | Н/о | Н/о | 17,4 | 100 |
| С9/ 31-32 | М | 32 | 9,04 | 0,42 | 2,83 | 1,02 | 0,065 | 35,5 | 2,53 | <1,0 | 0,024 | <0,5 | Н/о | Н/о | Н/о | 16,4 | 100 |
| 1923 | И | 28,79 | 8,03 | 0,811 | 2,64 | 1 | 0,055 | 31,564 | 7,73 | 0,21 | 0,052 | 0,027 | Н/о | Н/о | Н/о | 19,6 | 100,51 |
| С8/ 20,6 | И | 33,41 | 9,26 | 0,767 | 4,46 | 0,79 | 0,078 | 29,79 | 6,86 | 0,13 | 0,053 | 0,05 | 0,51 | 2,78 | 12,65 | – | 101,59 |
| С8/ 4848,5 | И | 31,63 | 4,1 | 0,281 | 2,06 | 0,57 | 0,063 | 32,1 | 9,17 | 0,18 | 0,083 | 0,039 | 0,08 | 6,95 | 13,42 | – | 100,73 |
| С8/ 49-50 | И | 31,75 | 4,17 | 0,35 | 2,45 | 0,43 | 0,067 | 31,89 | 8,27 | 0,35 | 0,228 | 0,022 | 0,03 | 6,29 | 13,99 | – | 100,29 |
| С8/ 58-60 | И | 40,96 | 3,84 | 0,046 | 1,87 | 0,65 | 0,046 | 36,8 | 0,97 | 0,5 | 0,118 | 0,058 | 0,03 | 0,96 | 13,92 | – | 100,77 |
| С8/ 58-60/1 | И | 22,28 | 4,67 | 0,353 | 2,14 | 0,54 | 0,058 | 22,51 | 21,87 | 0,22 | 0,119 | 0,026 | 0,2 | 15,82 | 9,07 | – | 99,88 |
| С8/ 58-60/3 | И | 32,4 | 4,31 | 0,331 | 1,76 | 0,54 | 0,06 | 33,91 | 6,97 | 0,22 | 0,07 | 0,023 | 0,14 | 5,26 | 14,93 | – | 100,92 |
| 1923 а-1 | И | 28,78 | 7,83 | 0,895 | 3,75 | 0,93 | 0,055 | 30,59 | 8,65 | 0,15 | 0,095 | 0,025 | 0,09 | 5,86 | 12,98 | – | 100,68 |
| 1923 а(кон) | И | 28,38 | 8,47 | 0,873 | 4,35 | 1,26 | 0,058 | 28,71 | 10,55 | 0,11 | 0,05 | 0,034 | 0,12 | 6,47 | 11,83 | – | 101,26 |
| Средние содержания по 13 пробам, включая контроль | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Апоким-берлиты | | 31,24 | 6,39 | 0,55 | 2,79 | 0,76 | 0,06 | 31,69 | 8,00 | 0,22 | 0,08 | 0,03 | 0,15 | 6,30 | 12,85 | – | 100,51 |

*Примечание.* *М – московская лаборатория, и – иркутская лаборатория (Институт геохимии им А.П. Виноградова СО РАН). П.п.п – потери при прокаливании; н/о – не определено.

*Note.* *М – Moscow laboratory, и – Irkutsk laboratory (A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, SB RAS). П.п.п. – losses due baking; н/о – not identified.

кимберлитам южных алмазоносных полей, исключая Накынское поле.

Прямое сопоставление неизмененных кимберлитов и апокимберлитов ИП, казалось бы, не вполне правомерно, учитывая значительную степень контаминации и изменения последних, однако химический состав кимберлитов в отличие от минерального при контактовом метаморфизме относительно более стабилен. «По данным (Илупин и др., 1978; Харькив и др., 1991) считается, что относительно инертными оксидами при вторичных процессах являются $TiO_2$, $FeO_{сум}$, $K_2O$, $Al_2O_3$ и $P_2O_5$ (первые три оксида следует учитывать в первую очередь при сопоставлении составов кимберлитов). В пределах каждого кимберлитового поля как на севере, так и на юге Якутской провинции можно выделить трубочные тела и даже кусты трубок, выполненные кимберлитом с относительно высоким или низким содержанием $TiO_2$, $FeO_{сум}$ и $K_2O$. Например, в Малоботуобинском поле кимберлиты трубок Мир и Аномалия 21 характеризуются повышенным содержанием $TiO_2$ (среднее содержание 1,7 и 2,5 масс. % соответственно) и $FeO_{сум}$ (9,5 и 7,0 масс. % соответственно). Однако в обеих группах трубок они характеризуются относительно низким содержанием $K_2O$ (менее 1 масс. %)» [4].

В табл. 3 приведены особенности состава апокимберлитов ИП в сравнении с составом кимберлитов Сибирской платформы и разновидностей траппов ИП. Из таблицы видно, что ультраосновные породы (кимберлиты) практически

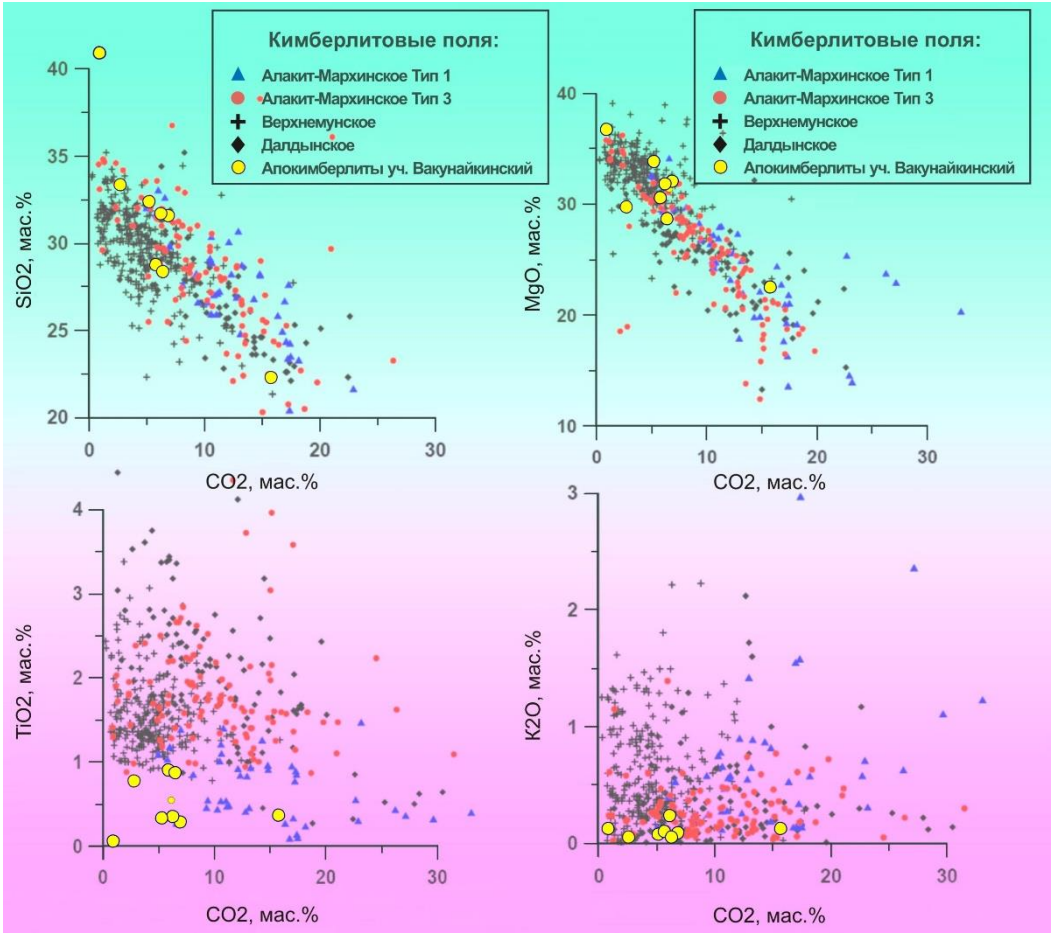



***Рис. 5. Диаграмма соотношения углекислоты с содержаниями породообразующих окислов ($SiO_2$, $TiO_2$, MgO, $K_2O$) кимберлитовых полей Якутской алмазоносной провинции и апокимберлитов Иркутской площади [4]***

***Fig. 5. Diagram of the correlation between the carbon dioxide and the content of the rock-forming oxides ($SiO_2$, $TiO_2$, MgO, $K_2O$): the kimberlite fields of the Yakutian diamond-bearing province and altered kimberlites of the Irkutsk area [4]***

идентичны. В апокимберлитах ИП пониженное содержание $TiO_2$, $Fe_{общ}$ и повышенное содержание глинозема. По содержанию остальных компонентов отличия не фиксируются или несущественны. Низкие концентрации титана рассматриваются рядом исследователей как показатель высокой вероятности того, что кимберлиты принадлежат к высокоалмазоносному типу [1]. Низкотитанистые кимберлиты характерны для высокоалмазоносного Накынского поля и отличаются содержаниями $TiO_2$ < 1 вес. %, Y – 5–15 ppm; Zr – 18–160 ppm; La – 9,31–119,45 ppm. Умереннотитанистые кимберлиты представлены в промышленноалмазоносных Мирнинском, Далдынском и Верхне-Мунском полях ($TiO_2$ – 1,1–2,7 вес. %; Y – 6–31 ppm; Zr – 51–457 ppm; La – 29,98–226,16 ppm) [5], и, как показывают геохимические данные, в том числе изотопия стронция, неодима, свинца, этот тип кимберлитов наиболее близок алмазоносным кимберлитам первой группы Южной Африки [6].

Апокимберлиты ИП по соотношению $TiO_2$ и содержаниям некоторых микроэлементов (уран, торий, иттрий, литий, ниобий и др.) близки алмазоносным и высокоалмазоносным кимберлитам Мирнинского и Накынского полей и занимают промежуточное положение между ними.

Анализ геохимических данных апокимберлитов ИП показал, что в них наблюдаются повышенные значения таких элементов-примесей индикаторов кимберлитов, как ниобий, цирконий, уран, торий и $CO_2$. Существенно ниже, чем в среднем в кимберлитах Якутии, содержания никеля, хрома, кобальта, стронция, однако в интенсивно измененных кимберлитах отмечаются те же значения указанных элементов [7]. На севере Якутии в Староречинском кимберлитовом поле [8] и в Западной Якутии в недавно выявленных телах Сюльдюкарского кимберлитового поля [9] средние содержания элементов-примесей никеля, хрома, кобальта в кимберлитах аналогичны

**Таблица 3**

**Особенности состава апокимберлитов Иркутской площади в сравнении с составами кимберлитов Сибирской платформы и траппов Иркутской площади, %**

**Table 3**

**Composition specifics of the altered kimberlites of the Irkutsk area vs. the kimberlites of the Siberian platform and the traps of the Irkutsk area, %**

| Породообразующие окислы | Апокимберлиты Иркутской площади | Кимберлиты Сибирской платформы* | Субщелочные долериты Иркутской площади | Палеобазальты Иркутской площади |
|---|---|---|---|---|
| $SiO_2$ | 28–35 | 26,6–33 | 47,05 | 45,2–48,07 |
| $TiO_2$ | 0,33–0,89 | 1,08–1,31 (0,29–4,81) | 1,604 | 1,526–1,573 |
| $Al_2O_3$ | 3,84–9,26 | 2,1–6,43 | 14,02 | 13,76–15,23 |
| $Fe_2O_3$ | 2,0–4,46 | 2,85–9,02 | 6,43–6,80 | 4,54–5,88 |
| FeO | 0,54–1,26 | 1,86–3,73 | 4,85–5,75 | 6,25–7,90 |
| MgO | 28–32 | 22–36 | 6,32–8,43 | 6,50–7,80 |
| MnO | 0,05–0,07 | 0,05–0,1 | 0,15–0,20 | 0,18–0,19 |
| CaO | 6–10 | 1–16 | 9,53–11,5 | 10,96–12,93 |
| $Na_2O$ | 0,1–0,35 | 0,1–0,59 | 2,21–4,01 | 2,25–2,76 |
| $Ka_2O$ | 0,1–0,23 | 0,24–0,54 | 0,305–1,94 | 0,51–0,53 |
| $CO_2$ | 0,96–15,82 | 1–12 | – | 0,19 |

*Примечание.* *Данные о составе кимберлитов Сибирской платформы приведены по книге «Геология и генезис алмазных месторождений» [7].

*Note.* *The data on the composition of the Siberian platform kimberlites are taken from the book “Geology and Genesis of Diamond Fields” [7].

таковым в апокимберлитах ИП и оставляют также первые десятки грамм на тонну. Таким образом, четких геохимических отличий по набору когерентных и некогерентных кимберлитам микроэлементов в апокимберлитах ИП не выявлено. Широкие вариации содержаний и состав микроэлементов в общем характерны для кимберлитов, но апокимберлиты ИП не обнаруживают заметных отличий ни при прямом сравнении содержаний элементов, ни при пересчете некоторых отношений (лантан/иттербий, цирконий/ниобий, барий/ниобий, уран/торий и др.).

Таким образом, петрохимические и геохимические параметры апокимберлитов ИП позволяют сделать следующие предварительные выводы:

– апокимберлиты ИП являются интенсивно метаморфизованными кимберлитами, характерными для ЯАП;

– несмотря на высокую степень изменения минерального состава апокимберлиты ИП сохраняют основные петрохимические и геохимические критерии кимберлитов;

– при интенсивном метаморфизме кимберлитов в них резко уменьшаются (в десятки раз) содержания когерентных элементов (никель, кобальт, хром, ванадий), что наблюдается в апокимберлитах ИП, но также аналогичные пониженные содержания никеля, кобальта, хрома и ванадия (первые десятки грамм на тонну) установлены в неизмененных кимберлитах Староречинского кимберлитового поля и недавно открытых алмазоносных кимберлитах Сюльдюкарского поля;

– по соотношениям породообразующих окислов $Fe_{общ}$, $TiO_2$, $K_2O$, $CO_2$ и некоторых элементов (лантан/иттербий, цирконий/ниобий, барий/ниобий, уран/торий и др.) апокимберлиты ИП сопоставимы с высокомагнезиальными, низкотитанистыми, низкокалиевыми кимберлитами южных алмазоносных полей Якутии (Малоботуобинское, Алакит-Мархинское);

– по концентрациям иттрия, циркония, лантана и содержанию $TiO_2$ апокимберлиты ИП идентичны алмазоносным кимберлитам ЯАП и Южной Африки;

– отмечаемая рядом исследователей положительная корреляция содержаний $CO_2$, CaO, соотношения MgO/FeO и алмазоносности кимберлитов наблюдается и в апокимберлитах ИП.

## Обсуждение результатов

По генетической и классификационной принадлежности выявленных пород специалисты-петрографы не пришли к единому мнению. Часть исследователей считает их кимберлитоподобными или интенсивно измененными кимберлитами (В.М. Кулигина, автор данной статьи Т.И. Хмельницкая, В.К. Гаранин, А.В. Бовкун), другие пришли к выводу, что они являются ультраосновными дериватами траппов (В.П. Корнилова). К.Н. Егоров отнес данные образования к скарноидам. По мнению авторов данной статьи, объем материала, проанализированного вышеперечисленными исследователями (В.П. Корниловой, К.Н. Егоровым), и его состояние были незначительны для окончательной диагностики пород. Кроме того, при решении данного вопроса необходимо было учитывать также геолого-структурное положение выявленного объекта, его взаимоотношение с вмещающими базальтами и молодыми щелочными долеритами, интенсивность проявления наложенных процессов, результаты минералогических и тонких анализов.

Приведенные петрографические описания и результаты анализов позволяют говорить о том, что представленные породы являются щелочными ультраосновными породами, во многом тождественными «неслюдяным» (базальтическим) кимберлитам I типа по классификации P.A. Wagner [10]. В образцах из скважины С1 апокимберлиты имеют мелкопорфировую структуру. Вкрапленники полностью замещены и представлены преимущественно мелкими (0,1–0,5 мм) зернами оливина (псевдоморфозами по оливину) одной генерации (образец С1/14,2). В некоторых образцах (С1/19,9) встречаются редкие псевдоморфозы по оливину более крупного размера, но ярко выраженных вкрапленников оливина I генерации не наблюдается, что обычно

присуще сравнительно быстро остывающим кимберлитовым породам дайковой фации. В породах скважины С1 присутствуют неравномерно распределенные псевдоморфозы, возможно, развивающиеся по монтичеллиту. Об этом свидетельствуют их характерная форма и расположение в породе. Следует заметить, что монтичеллит – один из типичных минералов кимберлитов I типа и альнеитов. Присутствующая в породе в незначительном количестве интенсивно хлоритизированная слюда (флогопит), вероятно, имеет позднемагматическое происхождение. Так как микрозондовый анализ был выполнен по шлифам, где весь флогопит полностью хлоритизирован, это не позволило определить его состав.

Породы образца 1923 из коренного обнажения отличаются от пород из скважин С1–С3 присутствием крупных (до 1 см) вкрапленников частично серпентинизированного оливина, составляющих до 20–25 об. % объема породы. Они представлены интенсивно трещиноватыми и дробленными зернами округлой и неправильной формы, а также их скоплениями. Кроме того, в породе из точки наблюдения 1923 повышено количество кальцита, слагающего крупные гнездовые и прожилковые выделения неправильной формы.

Специалистами ЦАЛ БГРЭ АК АЛРОСА и ИЗК СО РАН также были изучены образцы данных пород и проведены следующие лабораторные исследования: химический, рентгенографический, петрографический, минералогический анализы. В результате проведенных исследований получен предварительный вывод, который мы приводим полностью: «По результатам наших исследований порода, слагающая данное тело, является скарноподобным гибридным контактовым образованием со следами глубокой переработки многостадийным магнезиальным метасоматозом. Присутствие в первичном субстрате породы магматической компоненты ультраосновного состава не вызывает сомнения по масштабности развития магнезиальных минералов. В то же время полное отсутствие барофильных минералов, мантийных включений, а также устойчивых к процессам преобразования коровых ксенолитов в образце не позволяет отнести изученные породы к кимберлитам, пусть даже интенсивно преобразованным долеритовой интрузией. Вероятнее всего, они представляют собой ультраосновные дифференциаты базальтовой магмы, которые в последующем подверглись милонитизации и переработке гидротермально-метасоматическими процессами».

Авторам вполне понятны сомнения и осторожность выводов разных исследователей при изучении вещества столь сложных и интенсивно измененных пород, которые, вероятнее всего, не имеют аналогов в ближайшем геологическом окружении, а возможно, и в России вообще. Кроме того, отсутствие в них алмазов и характерных для кимберлитов минералов-спутников для многих исследователей является отрицательным фактом для продолжения исследований.

Некоторые контрдоводы авторов данной работы в пользу именно кимберлитовой природы явления сводятся к следующему.

Взаимоотношения магматических пород (долеритов, апокимберлитов и базальтов) изучались в коренных выходах и многочисленных горных выработках (шурфах и скважинах), между всеми разновидностями установлены «рвущие» контакты. Апокимберлиты рвут базальтоиды, нередко с формированием эруптивных брекчий и сложных прожилковых структур штокверкового типа. Базальты и кимберлиты в свою очередь интрудированы долеритами субщелочного состава и образуют сложное штокообразное тело (гарполит? лакколит?) с многочисленными апофизами.

Выявленные в апокимберлитах псевдогальки флюидно-эксплозивного характера подчеркивают газово-флюидную природу пород. Природа их схожа

с природой сферолитовых ксенолитов и автолитовых обломков в кимберлитах. Псевдогальки имеют округлую продолговатую форму, кремнисто-карбонатный состав и концентрическое строение в разрезе. В их центре наблюдаются затравки, вокруг которых формируется тело «гальки», нацело замещенное серпентином и гроссуляром. Внутренняя оторочка псевдогалек представлена чешуйчатым агрегатом, внутренняя часть его выполнена породой серпентин-карбонатного (кимберлитового?) состава, а внешняя кайма – практически сплошным гроссуляром. Кристаллы гроссуляра также встречаются и в центральной части галек, где они достигают размера до 1–2 см в поперечнике. На поверхности «галек» видны многочисленные разнонаправленные штрихи и борозды тектонического происхождения.

Очевидно, что выявленные породы ультраосновного состава не имеют никакого отношения к «скарноподобным гибридным контактовым образованиям со следами глубокой переработки многостадийным магнезиальным метасоматозом».

В апокимберлитах ИП не было выявлено ни одного признака проявления магнезиального метасоматоза.

Как известно, магнезиальные скарны развиваются на контакте гранитоидов с магнезиальными осадочными и метаморфическими породами и встречаются исключительно в гранито-гнейсовых комплексах древних щитов и вблизи контактов гранитоидов и основных пород в складчатых областях. Отметим и тот факт, что ни магнезиальные, ни какие-либо другие скарны не образуют эруптивных брекчий и не имеют «рвущих» контактов с вмещающими их породами. В нашем случае на контакте с апокимберлитами распространены именно известняки, а не доломиты литвинцевской свиты. Содержание MgO, необходимое и достаточное для образования магнезиальных скарнов на контактах с магматическими породами, должно составлять не менее 12–13 %, содержание же MgO в известняках литвинцевской свиты не превышает 1–2 %. В апокимберлитах ИП отсутствует характерная для скарнов (особенно магнезиальных) зональность. Наблюдаемое соотношение хризотила и лизардитов (1T и AL) свидетельствует о многократной переработке первичной магматической ультраосновной породы. Из-за ограниченного объема публикации таблицы соотношений хризотила и лизардитов (1T и AL) в статье не приведены.

Согласно современной петрографической классификации О.А. Богатикова, данные породы могут быть отнесены исключительно к лампрофирам ультраосновного ряда (к гипабиссальным породам, не имеющим плутонических или явных вулканических / покровных аналогов), то есть к кимберлитам или лампроитам. По химическому, минеральному составу и общей геологической и структурной обстановке данные породы можно отнести только к кимберлитам [11–13].

В России подобные изменения кимберлитов изучались в Якутии в кимберлитовых трубках «Краснопресненская», «Комсомольская», «Юбилейная», но при этом в контактовых апокимберлитовых метасоматитах этих тел сохранились хромиты, алмазы и высокохромистые пиропы, а основная масса оранжевых, красных пиропов и пикроильменитов в них полностью замещена или уничтожена. За рубежом близкие по составу породы были описаны как метакимберлиты в ряде работ M.G. Bardet. Из книги «Геология и генезис алмазных месторождений»: «В метакимберлитах, как правило, отсутствуют пироп и пикроильменит, хотя хромсодержащая шпинель, значительно более магнезиальная, чем в кимберлитах (как и в нашем случае), является обычным минералом. Нет сомнения в том, что метакимберлиты представляют собой породы, подвергшиеся интенсивному контактовому метаморфизму. При этом часть зерен пиропа и пикроильменита уничтожена, а некоторые из них заместились агрегатами других минералов, в то время как хромшпинелиды, будучи более

устойчивыми, сохранились, но под влиянием метаморфогенных факторов изменили свой состав – стали более магнезиальными и глиноземистыми…» [7]. В описываемых апокимберлитах наблюдается высокое содержание магния и алюминия в хромшпинелидах, что свидетельствует, по-нашему мнению, о глубокой переработке первичных кимберлитовых пород многостадийным кальциевым метасоматозом. Это явление, по мнению M.G. Bardet [14], представляет собой обычный процесс при контактовом метаморфизме кимберлитов Африканского континента.

Интенсивно проявленные процессы контактово-метаморфических и вторичных изменений существенно повлияли на минеральный состав апокимберлитов ИП (отсутствие пиропов, перекристаллизация оливина, практически полное замещение флогопита, превращение хромшпинелидов в алюмошпинели и др.), но особенности химического и микроэлементного состава характерны для основного количества кимберлитов мира.

**Заключение**

Таким образом, апокимберлиты ИП по химизму близки алмазоносным и высокоалмазоносным кимберлитам ЯАП. Дальнейшее их изучение и поиски аналогов помогут пересмотреть и заново ревизовать перспективы коренной алмазоносности юга Сибирской платформы.

Находки кимберлитовых пород в районе, для которого они не были известны ранее, требуют всестороннего изучения.

Скважинами колонкового бурения 9, 10, 11, 12, пройденными по флангу тела в 2012 г. с целью обнаружения неизмененных кимберлитов, выявления потенциальной алмазоносности пород и изучения их вещественного и минералогического состава, неизмененные кимберлиты не вскрыты. По мнению авторов, кимберлиты могли быть срезаны интрузией щелочных долеритов, а неоднократно проявленные интенсивные гидротермально-метасоматические процессы могли привести к полному их уничтожению в пределах данного участка. Для выхода в неизмененные образования требуется значительный объем бурения и специализированные геофизические исследования скважин. Так как алмазов в пробах из апокимберлитов не обнаружено, инвесторами было принято решение о прекращении дальнейшего изучения диатремы и выявленных пород.

Сложное геологическое строение, стандартные подходы и методы проведения поисковых работ, отсутствие характерных критериев для поисков кимберлитов подобного типа, дорогостоящие работы для всестороннего изучения объекта (бурение, геофизические работы, аналитика и пр.) являются неблагоприятными факторами для продолжения исследований. Тем не менее сам факт находки ультраосновных пород кимберлитовой группы на северо-востоке Иркутской области в потенциально алмазоносном районе требует как продолжения изучения самих образований, так и продления сроков поисковых работ. Важен также факт того, что в этом же районе поисковыми работами ООО АИК были выявлены и оконтурены комплексные ореолы хромитов (в том числе алмазной ассоциации) и пиропов, характеризующихся высокой степенью сохранности и своеобразием цветовой гаммы. Анализ пиропов выявил все парагенетические типы ультраосновных мантийных ассоциаций (верлитовый, лерцолитовый и дунит-гарцбургитовый, в том числе алмазный). Среди проанализированных хромшпинелидов установлен высокий (около 60 %) процент высокомагнезиальных, высокохромистых и низкоглиноземистых разновидностей, относящихся к хромитам алмазного парагенезиса. По морфологическим и химическим особенностям значительная доля хромшпинелидов имеет кимберлитовый генезис.

Таким образом, вещественный состав, петрохимические и геохимические особенности описываемых пород, их текстурно-структурные особенности, взаимоотношения с разновозрастными

магматическими и осадочно-метасоматическими образованиями позволяют отнести данные породы именно к кимберлитам. Проведенное сравнительное изучение апокимберлитов и кимберлитов известных полей показали наличие как общих, так и отличительных особенностей. Широко проявленные вторичные процессы привели к интенсивному постмагматическому преобразованию кимберлитов с превращением их в своеобразные породы – апокимберлиты (метакимберлиты). Отмеченные вариации содержаний некоторых петрогенных оксидов обусловлены прежде всего неравномерным распределением контаминированного материала вмещающих пород и постмагматическими изменениями кимберлитов.

**Библиографический список**

1. Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францессон Е.В. Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.

2. Милашев В.А. Трубки взрыва. Л.: Недра, 1984. 268 с.

3. Кушев В.Г., Синицын А.В., Ермолаева Л.А., Каменецкий А.В. Структурно-тектоническое положение кимберлитов на древних платформах // Проблемы кимберлитового магматизма: сб. докл. Новосибирск: Наука, 1989. С. 38–42.

4. Костровицкий С.И., Морикио Т., Серов И.В., Яковлев Д.А., Амиржанов А.А. Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 350–371.

5. Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Krasavchikov V.O., Kuznetsova L.G., Khlestov V.V., Volkova N.I. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry // Journal of Geochemical Exploration. 2002. Vol. 76. Iss. 2. P. 93–112. https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00219-4

6. Богатиков О.А., Кононова В.А., Зинчук Н.Н., Носова А.А., Голубева Ю.Ю. Геохимические критерии продуктивности кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // Геология алмазов – настоящее и будущее: сб. ст. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2005. С. 743–751.

7. Геология и генезис алмазных месторождений / ред. Б.М. Зубарев. В 2 кн. Кн. 1. М.: Изд-во ЦНИГРИ, 1989. 242 с.

8. Шкодзинский В.С. Корреляция состава и некоторых особенностей размещения кимберлитов с содержанием в них алмаза // Литосфера. 2009. № 1. С. 86–92.

9. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2016. № 3. С. 86–94.

10. Wagner P.A. The diamond fields of South Africa. Johannesburg: Transvaal Leader, 1971. 353 p.

11. Егоров К.Н., Зинчук Н.Н., Кошкарев Д.А., Соловьева Л.В., Меньшагин Ю.В., Секерин А.П. Среднерифейский алмазоносный магматизм Сибиркой платформы. // Геология алмазов – настоящее и будущее: сб. ст. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2005. С. 457–466.

12. Джейкс А., Луис Дж., Смит К. Кимберлиты и лампроиты Западной Австралии: пер с англ. М.: Мир, 1989. 430 с.

13. Доусон Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них: пер с англ. М.: Мир, 1983. 300 с.

14. Bardet M.G. Gisements de diamants d`Afrique. Geologie du diamant // Mem. Bur. rech geol. minieres. 1974. Vol. 2. No. 83. P. 229.

**References**

1. Ilupin IP, Kaminskii FV, Frantsesson EV. *Geochemistry of kimberlites.* Moscow: Nedra; 1978. 352 p. (In Russ.)

2. Milashev VA. *Volcanic pipes*. Leningrad: Nedra; 1984. 268 p. (In Russ.)

3. Kushev VG, Sinitsyn AV, Ermolaeva LA, Kamenetskii AV. Structural and tectonic position of kimberlites on the ancient platforms. In: *Problemy kimberlitovogo magmatizma* = Issues of kimberlite magmatism. Novosibirsk: Nauka; 1989. p.38–42. (In Russ.)

4. Kostrovitsky SI, Morikiyo T, Serov IV, Yakovlev DA, Amirzhanov AA. Isotope-geochemical classification of the Siberian platform kimberlites. *Geologiya i geofizika*. 2007;48(3):350–371. (In Russ.)

5. Vasilenko VB, Zinchuk NN, Krasavchikov VO, Kuznetsova LG, Khlestov VV, Volkova NI. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry. *Journal of Geochemical Exploration*. 2002;76(2):93–112. https://doi.org/10.1016/S0375-6742(02)00219-4

6. Bogatikov OA, Kononova VA, Zinchuk NN, Nosova AA, Golubeva YuYu. Geochemical criteria of the kimberlites' diamond potential: Yakutian diamond-bearing province. In: *Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee* = Diamond geology: present and future. Voronezh: Voronezh State University; 2005. p.743–751. (In Russ.)

7. Zubarev BM. *Geology and Genesis of Diamond Fields*. In 2 books. Book 1. Moscow: Central

Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals; 1989. 242 p. (In Russ.)

8. Shkodzinskii VS. Composition and setting of kimberlites: correlation with diamond potential. *Litosfera* = Lithosphere. 2009;1:86–92. (In Russ.)

9. Maltsev MV, Tolstov AV, Fomin VM, Starkova TS. New kimberlite field in Yakutia and typomorphic especially its indikators minerals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya* = Proceedings of Voronezh State University. Geology. 2016;3:86–94. (In Russ.)

10. Wagner PA. *The diamond fields of South Africa*. Johannesburg: Transvaal Leader; 1971. 353 p.

11. Egorov KN, Zinchuk NN, Koshkarev DA, Solov'eva LV, Men'shagin YuV, Sekerin AP. Middle Riphean diamondiferous magmatism of Siberian Platform. In: *Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee* = Diamond geology: present and future. Voronezh: Voronezh State University; 2005. p.457–466. (In Russ.)

12. Jaques A, Lewis J, Smith C. The kimberlites and lamproites of Western Australia, 1989, 430 p. (Russ. ed.: *Kimberlity i lamproity Zapadnoi Avstralii*. Moscow: Mir; 1989. 430 p.)

13. Dawson J. Kimberlites and their xenoliths, 1980, 300 p. (Russ. ed.: *Kimberlity i ksenolity v nikh*. Moscow: Mir; 1983. 300 p.)

14. Bardet MG. Gisements de diamants d`Afrique. Geologie du diamant. *Mem. Bur. rech geol. minieres*. 1974;2(83):229. (In French)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Иванов П.Ф, Хмельницкая Т.И. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Pyotr F. Ivanov, Tamara I. Khmelnitskaya 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Иванов Петр Федорович,**
генеральный директор,
ООО «Ангарская инвестиционная компания»,
664025, г. Иркутск, ул. Российская, 17б, Россия,
✉ e-mail: Longdor2@mail.ru
**Pyotr F. Ivanov,**
CEO,
LLC Angarsk Investment Company,
17b Rossiyskaya St., Irkutsk 664025, Russia,
✉ e-mail: Longdor2@mail.ru

**Хмельницкая Тамара Ивановна,**
петрограф-минералог,
ООО «Ангарская инвестиционная компания»,
664025, г. Иркутск, ул. Российская, 17б, Россия,
e-mail: vera-ch74@mail.ru
**Tamara I. Khmelnitskaya,**
Petrographer, Mineralogist,
LLC Angarsk Investment Company,
17b Rossiyskaya St., Irkutsk 664025, Russia,
e-mail: vera-ch74@mail.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 550.347:550.344.6**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-194-208**

# Азимутальная анизотропия Саяно-Байкальской складчатой области по приемным функциям далеких землетрясений

**© М.М. Кобелев[a], М.А. Хритова[b], В.В. Мордвинова[c], Е.А. Кобелева[d]**
[a,b,d]Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Иркутск, Россия
[a,b,c]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** Целью данного исследования являлось определение детальной скоростной структуры земных недр сейсмически активной Саяно-Байкальской складчатой области, в том числе выявление азимутов и глубин в окрестностях пунктов наблюдений, обладающих анизотропными свойствами. Исходными данными для исследования послужили многолетние наблюдения пяти широкополосных сейсмических станций в районе Саяно-Байкальской складчатой области. В основе предлагаемой методики выявления глубин и направлений земных недр, обладающих анизотропными свойствами, лежит метод продольной приемной функции. Из телесейсмических записей выделены приемные функции для всех возможных направлений относительно каждого пункта наблюдения. Выявлены азимутальные границы относительно наблюдающей станции, где приемные функции меняются существенным образом, что предполагает изменение скоростной структуры при переходе через эти условные границы. В пределах диапазонов азимутов *BAZ* с однородными приемными функциями инверсией функций рассчитаны скоростные модели $V_S$, учитывающие связь между глубиной зондирования среды *h* и соответствующим этой глубине расстоянием от сейсмостанции *d*. На основе одномерных скоростных разрезов для различных азимутов с учетом сейсмического сноса построены круговые модели $V_S(h,BAZ,d)$, визуализирующие скоростную структуру относительно всех пунктов наблюдения до глубин 70 и 270 км. В результате получен комплекс моделей, отражающих детальную глубинную скоростную структуру района Саяно-Байкальской складчатой области. Скорости сейсмических волн $V_S(h)$ определены в пределах земной коры со средним шагом по глубине 1 км, в пределах мантии – с шагом 5–10 км. Круговые модели $V_S(h,BAZ,d)$ наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях от пункта наблюдения и позволяют выявить анизотропность среды, проявляющуюся при таком представлении в наличии оси симметрии в круговых моделях, которая в среднем имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, но варьируется с глубиной.

***Ключевые слова:*** сейсмическая анизотропия, Саяно-Байкальская складчатая область, метод функции приемника, глубинные скоростные разрезы, телесейсмические данные

***Благодарности:*** Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-77-10027 «Эволюция и источники вулканизма зон транстенсии Японско-Байкальского геодинамического коридора») и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-01304-20.

***Информация о статье:*** Дата поступления 24 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 29 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Кобелев М.М., Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А. Азимутальная анизотропия Саяно-Байкальской складчатой области по приемным функциям далеких землетрясений. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 194–208. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-194-208

# Azimuthal anisotropy of the Sayan-Baikal fold region by the receiving functions of distant earthquakes

**© Mikhail M. Kobelev[a], Mariya A. Khritova[b], Valentina V. Mordvinova[c], Elena A. Kobeleva[d]**
[a,b,d]Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS", Irkutsk, Russia
[a,b,c]Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** The purpose of the work is the determination of a detailed velocity structure of the earth's interior of the seismically active Sayan-Baikal fold region, including the identification of the azimuths and depths in the vicinity of the observation points with anisotropic properties. The source data for the study is the long-term observations by five broadband seismic stations in the Sayano-Baikal fold region. The proposed methodology for identifying the depths and directions of the earth's interior with anisotropic properties is based on the longitudinal receiving function

method. The receiving functions for all possible directions of each observation point have been selected from the tele-seismic records. The azimuthal boundaries are identified in relation to the observing station where the receiving functions change significantly, which means a change in the velocity structure when crossing these conditional boundaries. Within the azimuth ranges (*BAZ*) with homogeneous receiving functions, velocity models ($V_S$) have been calculated by inverting the functions. The models take into account the relationship between the depth of medium sounding (*h*) and the corresponding distance from the seismic station (*d*). Based on the one-dimensional velocity sections for different azimuths, circular models $V_S(h,BAZ,d)$ have been constructed with the account of the seismic drift. The models visualize the velocity structure in relation to all observation points at the depths up to 70 km and 270 km. As a result of the study, a set of models reflecting the detailed deep-seated velocity structure of the Sayano-Baikal folded region has been obtained. The velocities of the seismic waves $V_S(h)$ have been determined within the earth's crust with an average depth step of 1 km, and within the mantle, with a step of 5–10 km. The circular models $V_S(h,BAZ,d)$ clearly demonstrate the velocity heterogeneity in various directions from the observation point and allow one to identify the anisotropy of the medium. The latter is manifested as the presence of a symmetry axis in the circular models, which on average has a northwest-southeast orientation, but varies with the depth.

***Keywords:*** seismic anisotropy, Sayano-Baikal fold region, receiver function method, deep velocity sections, tele-seismic data

***Acknowledgements:*** The study has been conducted with the support of the Russian Science Foundation (Project № 18-77-10027 "Evolution and sources of volcanism in the transtension zones of the Japan-Baikal geodynamic corridor") and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment № 075-01304-20.

***Information about the article:*** Received April 24, 2020; accepted for publication May 29, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Kobelev MM, Khritova MA, Mordvinova VV, Kobeleva EA. Azimuthal anisotropy of the Sayan-Baikal fold region by the receiving functions of distant earthquakes. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):194–208. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-194-208

## Введение

До 70-х гг. прошлого века изучение глубинного строения Земли основывалось на веском допущении: исследования распространения сейсмических волн в реальной среде и построение скоростных моделей тормозились из-за предположения об идеальной упругости среды и скоростной изотропии Земли.

В настоящее время установлено, что верхняя мантия Земли обладает анизотропными свойствами. Один из традиционных методов исследования азимутальной анизотропии состоит в измерении азимутальных вариаций времен пробега продольных волн, а в конечном счете – в нахождении азимутальных скоростных неоднородностей. По данным поверхностных волн обнаруживается и азимутальная [1, 2], и вертикальная анизотропия скоростей сейсмических волн [3–8].

Анизотропия сейсмических волн в земной коре и верхней мантии обусловлена тонкослоистостью минеральных и породных образований, преимущественной ориентацией минеральных зерен в породах, негидростатическим напряжением и распределением трещин в глубинной среде из-за воздействия тектонических сил во время различных геодинамических процессов. Поэтому тема исследования сейсмической анизотропии становится все более важной при решении фундаментальной задачи изучения структуры, состава и динамики отдельных частей Земли. В данной работе рассматривается сейсмически активная Саяно-Байкальская складчатая область.

*Метод выявления расщепления квазипоперечных сейсмических волн в фазе SKS.* Все существующие способы изучения сейсмической анизотропии основаны на выявлении аномальных эффектов, возникающих при распространении волн, то есть на определении отличий волнового поля, регистрируемого на поверхности Земли, от изотропного случая.

Для исследования азимутальной сейсмической анизотропии широко применяется разработанный Л.П. Винником метод выявления расщепления квазипоперечных сейсмических волн в фазе SKS

[9, 10]. Метод основан на явлении расщепления прошедшей через ядро Земли поперечной волны на две квазипоперечные волны, распространяющиеся с различной скоростью (рис. 1). Для диагностики среды в районе приема используется волна далекого землетрясения, так как при прохождении через жидкое ядро продольная волна избавляется от влияния среды в районе источника, а на пути от ядра к району регистрации образуется пакет поперечных волн, который характеризует среду в районе исследования. Если поперечная волна на своем пути встречает анизотропный материал, она расщепляется как минимум на две различно поляризованные и распространяющиеся с заметно различающимися скоростями волны (см. рис. 1). Разница во времени прихода быстрой и медленной волны, которая может составить секунды, количественно характеризует степень анизотропии, зависящую от толщины и свойств анизотропных слоев в среде. Расщепление играет колоссальную роль на практике: только сам факт возникновения двух поперечных волн из одной является непреложным свидетельством наличия анизотропии хотя бы у одной из контактирующих сред [11]. Все другие признаки анизотропии (например, зависимость скорости распространения волны от азимута) могут возникать и из-за латеральной неоднородности в изотропной среде. И тогда, чтобы различить, по какой причине наблюдаются азимутальные вариации скорости (из-за анизотропии или латеральной неоднородности), необходимо иметь достаточно полную систему наблюдения [9]. При использовании же сплиттинга (от англ. *split* – расщепление, разделение) иногда достаточно одной пары источник – приемник.

*Район и предшествующие исследования.* Для района Саяно-Байкальской складчатой области проведен ряд исследований сейсмической анизотропии. В рамках международного сотрудничества в 1990-е гг. и в начале 2000-х гг. на обширной территории также были проведены наиболее детальные, чем когда-либо ранее, сейсмические наблюдения. Это российско-американский проект PASSCAL_1992 и российско-монгольско-французский проект MOBAL_2003. Вдоль профилей PASSCAL и MOBAL исследована сейсмическая анизотропия методом SKS [12–14]. Метод SKS определяет наличие анизотропии в верхнемантийной толще с хорошим разрешением по латерали. Однако интерпретация величины запаздывания медленной волны затруднительна, поскольку только по SKS трудно судить об интервале глубин, в котором это запаздывание накапливается. Полезен комплексный подход, в котором необходимой составляющей является исследование распределения скорости сейсмических волн в регионе наблюдения не только как обычно, по глубине, но и по азимутам [15].

В результате найдены направления так называемых быстрых смещений и величины расщепления SKS-волн, которое на профиле MOBAL на территории Хангая превышает 3 с (рис. 2).

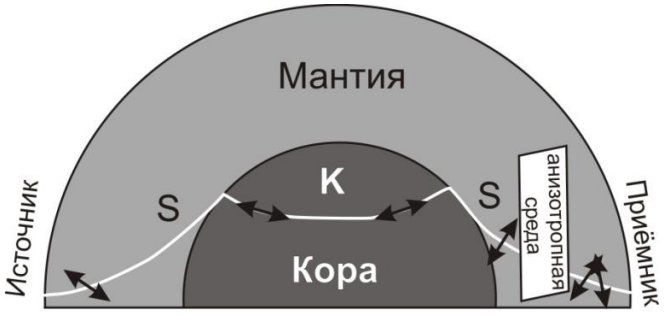



***Рис. 1. Схема трассы «источник – приемник» волны SKS***
***Fig. 1. Scheme of the "source – receiver route" of the SKS wave***

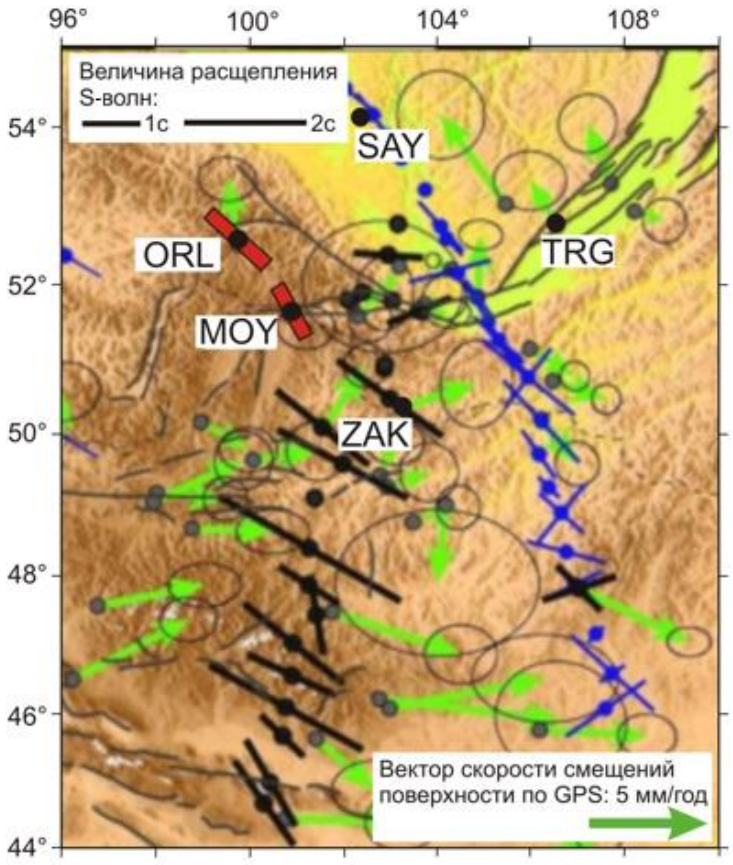



***Рис. 2. Сводные данные по SKS-расщеплению и GPS-геодезии [14]:***
*зеленые стрелки – GPS-векторы и их эллипсоиды ошибок [16]; синие линии – быстрые смещения S-волн, измерения, опубликованные в работах [10, 17–20] по проекту PASSCAL_1992; черные линии – SKS-данные, полученные в результате обработки наблюдений телесейсмического проекта MOBAL_2003 (длина этих линий означает величину запаздывания волн) [14]; красные планки – определения по новым данным (проект РФФИ 12-05-01024), полученным по широкополосным записям стационарных сейсмических станций, установленных в пунктах ORL («Орлик», Восточные Саяны) и MOY («Монды», западное окончание Тункинского рифта Байкальской рифтовой системы)*

***Fig. 2. Summary data on SKS splitting and GPS geodesy [14]:***
*green arrows – GPS vectors and their error ellipsoids [16]; blue lines – fast displacements of S-waves, measurements published in [10, 17–20] by the project PASSCAL_1992; black lines – SKS data obtained by processing the observations of the tele-seismic project MOBAL_2003 (the length of the lines stands for the wave delay value) [14]; red bars – definitions according to new data (RFBR project 12-05-01024) obtained from the broadband records of the stationary seismic stations installed at the ORL ("Orlik", East Sayan) and MOY ("Mondy", western end of the Tunka rift, the Baikal rift system)*

Сравнительно недавно (в рамках проекта РФФИ 12-05-01024 «Глубинное строение и геодинамическая обстановка южной части Саяно-Байкальской складчатой области») по записям наблюдений на станциях «Орлик» (ORL) и «Монды» (MOY) с помощью метода выявления поляризации волн SKS определены параметры анизотропии – направления быстрых смещений и величина расщепления быстрой и медленной волны. Эти последние результаты хорошо вписываются в общую картину, согласуются по направлению быстрых смещений со смещениями вдоль профиля MOBAL_2003, пересекающего Хангайское поднятие, но значительно меньше по расщеплению (запаздыванию медленной волны) (см. рис. 2).

Интерпретация анизотропии вызвала много споров (особенно по первому профилю PASSCAL_1992). В 1980-е и 1990-е гг. превалировала идея, что под Байкалом и на территории Монголии существует мощный единый астеносферный выступ, и во всех аномалиях предпочитали видеть эту причину. В настоящее время установлено, что глубинное строение не такое примитивное, как предполагалось ранее, и побеждает точка зрения об определяющей роли Индо-Евразийской коллизии в формировании скоростных неоднородностей, в том числе скоростной анизотропии. Именно в свете концепции Индо-Евразийской коллизии логично объясняется величина расщепления и направления быстрых волн, которые ориентированы перпендикулярно коллизионному направлению сжатия и, соответственно, параллельно возможному порождаемому коллизией современному глубинному течению. Логично, что на Хангае, где по различным данным кора и подкоровая мантия содержат расплавы, наблюдаются самые большие величины расщепления.

Следует отметить, что при всех достоинствах метод SKS определяет лишь сам факт наличия и интенсивности анизотропных свойств земных недр в том или ином пункте наблюдения. В результате анализа поляризации телесейсмических волн SKS не выявляются глубины, обладающие анизотропными свойствами. Если методом SKS подтверждается гипотеза о том, что переходная зона от Сибирской платформы к Центрально-Азиатскому складчатому поясу попадает в зону влияния Индо-Евразийской коллизии и ее недра формируются под ее влиянием, то появляется задача определения глубины наиболее интенсивных отрицательных скоростных аномалий. Интервалы пониженных скоростей сейсмических волн в этом случае с большей вероятностью, чем другие толщи, могут определять условия мантийного течения.

## Материалы и методы исследования

Исходными данными для исследования послужили многолетние наблюдения сейсмических станций «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK), «Тырган» (TRG) в районе Саяно-Байкальской складчатой области, а также станции «Саянск» (SAY), расположенной на юге Сибирской платформы (см. рис. 2; таблица). Сейсмические станции укомплектованы сейсмометрами Guralp CMG-6TD ($T$ = 30 с) и Guralp CMG-3ESPCD ($T$ = 120 с).

В основе предлагаемой методики выявления глубин и направлений земных недр, обладающих анизотропными свойствами, лежит метод функции приемника [21]. Из всего объема данных были отобраны записи сильных телесейсмических событий со всех возможных направлений с магнитудами более 5,5, эпицентральными расстояниями 30–90°, имеющие четко выраженные первые вступления и сравнительно быстро затухающие сигналы.

**Параметры сейсмических станций и данные, использовавшиеся в исследовании**
**Seismic stations parameters and the data used in the study**

| Код | Наименование станции | Координаты (широта, долгота) | Тип прибора | Период наблюдения, годы | Количество сейсмограмм |
|---|---|---|---|---|---|
| ZAK | Закаменск | (50.382, 103.281) | Guralp CMG-3ESPCD | 2012–2014 | 220 |
| MOY | Монды | (51.668, 100.993) | Guralp CMG-3ESPCD | 2012–2014 | 165 |
| ORL | Орлик | (52.535, 99.808) | Guralp CMG-3ESPCD | 2012–2014 | 176 |
| TRG | Тырган | (52.76, 106.348) | Guralp CMG-3ESPCD | 2012–2014 | 124 |
| SAY | Саянск | (54.115, 102.174) | Guralp CMG-6TD | 2014–2015 | 55 |

Метод приемных функций в основном применяется к записям колебаний в диапазоне частот от 0,01–0,5 Гц [21, 22]. Однако численное моделирование показало [23], что методу продольной приемной функции соответствует несколько бóльшая полоса частот (0,01–0,9 Гц). Выделение функций приемника производилось с помощью программного обеспечения для анализа сейсмических сигналов в пакете программ Seismic Handler [24]. Эта часть программного обеспечения разработана согласно методу Л.П. Винника [21].

В Байкальский регион с необходимых для использования эпицентральных расстояний (30–90°) в основном приходят волны от юго-восточных тихоокеанских землетрясений. Но коллекция телесейсмических записей постоянно пополняется, так что к настоящему времени в районе каждой станций можно получить информацию о глубинном скоростном строении почти во всех направлениях вокруг точки наблюдения. С учетом среднего наклона сейсмических лучей при подходе к точке приема (25–30°) и максимально доступной методу продольной приемной функции глубины исследования (270 км) радиус основания конусоподобной области зондирования вокруг станции оценивается в 150 км. В то же время величина углов падения сейсмических лучей в слоистой среде под станцией (сейсмический снос) является важным параметром, учет которого позволяет уточнить представление о скоростной структуре в тектонически сложных регионах, не увеличивая затрат на проведение наблюдений. По выборкам записей землетрясений с разных азимутов относительно пункта наблюдения благодаря наклону сейсмических лучей (25–30°) появляется возможность выявить скоростные неоднородности в районе наблюдающей станции на удалении от нее, примерно равном половине зондируемой глубины. Подход, использующий сейсмический снос, разработан и применен нами на всех широкополосных сейсмостанциях юга Сибири, продолжительность непрерывных наблюдений которых составляет более двух лет.

Из телесейсмических записей выделены приемные функции для всех возможных направлений относительно каждого пункта наблюдения. Выявлены азимутальные границы относительно наблюдающей станции, где приемные функции меняются существенным образом, что предполагает изменение скоростной структуры при переходе через эти условные границы.

Функции приемника, полученные по единичному событию, далеки от идеала, что неизбежно из-за наличия сейсмического шума. Для уменьшения нерегулярного шума и подчеркивания элементов функций приемника, обусловленных наиболее значительными особенностями в строении исследуемого подстанционного объема, производилось суммирование трасс для всех событий в целевом диапазоне азимутов.

В пределах диапазонов азимутов *BAZ* с однородными приемными функциями инверсией функций рассчитаны скоростные модели $V_S(h,BAZ,d)$, учитывающие связь между глубиной зондирования среды $h$ и соответствующим этой глубине расстоянием от сейсмостанции $d$.

Решение обратной задачи восстановления одномерных скоростных разрезов в окрестности регистрирующей станции выполнено по программе Г.Л. Косарева [25, 26], основанной на матричном методе вычисления теоретических сейсмограмм Томсона – Хаскелла [27]. Суть метода – в подборе компоненты теоретической функции приемника к наблюдаемой при допущении, что исследуемая структура представлена пачкой плоских однородных слоев, лежащих на однородном полупространстве. Определение одномерного скоростного разреза $V_S(h)$ под сейсмической станцией представляет собой итерационный процесс, при котором различие между наблюдаемой и теоретической функциями минимизируется путем подбора параметров скоростного

разреза исходя из некоторого начального приближения $V_0(h)$. При заданных мощности каждого слоя и соотношениях скоростей $V_P/V_S$ независимыми определяемыми параметрами модели являются скорости поперечных сейсмических волн *S*.

В качестве первого приближения в процедуре инверсии для всех станций и целевых диапазонов азимутов использована одна и та же ступенчатая функция скорости (близкая к параболической), рассчитанная усреднением набора одномерных скоростных моделей глубинного сейсмического зондирования для Саяно-Байкальской горной области [28]. Согласно данному зондированию, средняя скорость продольных волн *P* в земной коре задана равной 6,4 км/с, скорость поперечных волн *S* – 3,7 км/с. Мантийная скорость поперечных волн непосредственно под корой принята равной 8 км/с, отношение скоростей $V_P/V_S$ = 1,8. Стандартная ошибка $V_S(h)$ моделей – порядка 0,1 км/с.

На основе одномерных (для различных азимутов) и двумерных скоростных разрезов с учетом сейсмического сноса построены круговые модели, визуализирующие скоростную структуру, относительно пункта наблюдения до глубин 70 и 270 км (рис. 3, 4). На основании полученных моделей выполнена интерпретация.

## Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 представлена круговая модель до глубины 70 км относительно сейсмостанции «Орлик» (ORL). На модели видно, что сходство скоростной структуры проявляется в противоположных диапазонах азимутов, а осью симметрии является направление с северо-

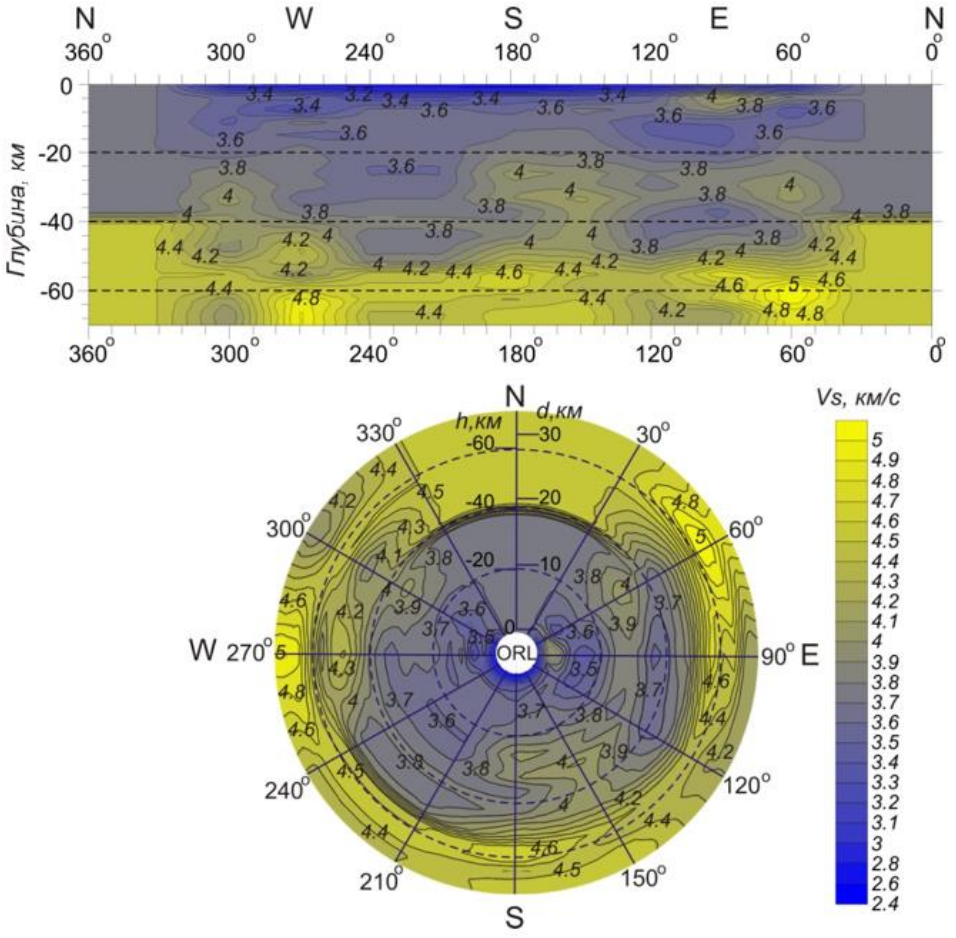



***Рис. 3. Круговая модель до глубины 70 км на базе одномерных S-скоростных моделей для сейсмостанции «Орлик» (ORL)***
***Fig. 3. Circular model to a depth of 70 km based on the one-dimensional S-velocity models for the "Orlik" (ORL) seismic station***

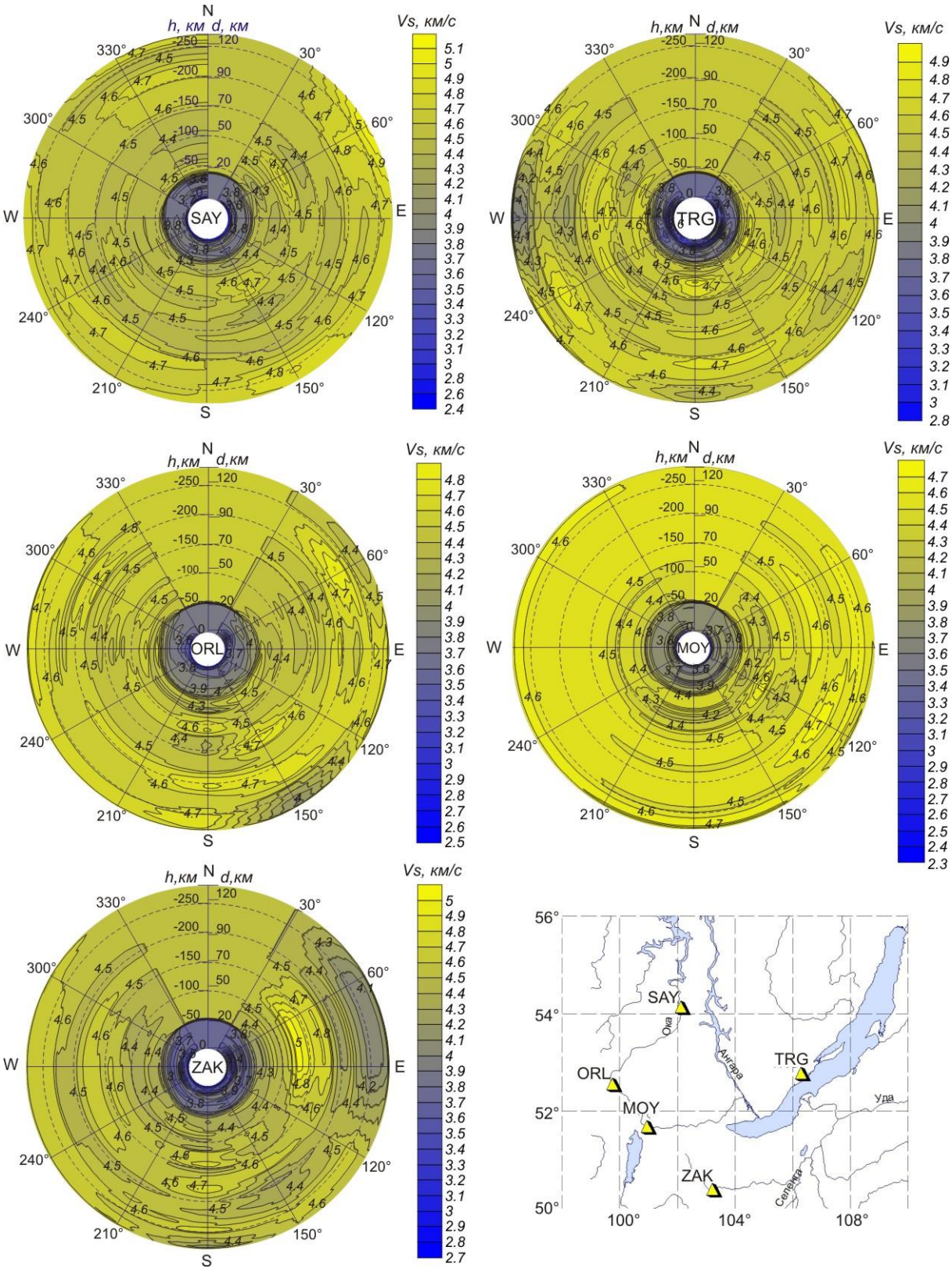



***Рис. 4. Круговые модели до глубины 270 км на базе одномерных S-скоростных моделей для сейсмостанций «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK)***

***Fig. 4. Circular models to a depth of 270 km based on the one-dimensional S-velocity models for the seismic stations "Sayansk" (SAY), "Tyrgan" (TRG), "Orlik" (ORL), "Mondy" (MOY), "Zakamensk" (ZAK)***

запада на юго-восток (см. рис. 3). Это предварительный результат, поскольку еще не рассчитана скоростная модель для азимутального диапазона 330–30°, наиболее бедного записями сильных телесейсмических событий. Тем не менее, судя по скоростям во всех других азимутах, направление северо-запад – юго-восток является направлением быстрых скоростей как в коре, так и в подкоровой мантии. По-видимому, это реакция на сжатие примерно в направлении восток – запад. В коре об этом свидетельствуют слои пониженной скорости, которые связывают с гранулитовыми слоями пониженной вязкости. Гранулитовые астенослои при сильных горизонтальных напряжениях способствуют автономному перемещению верхнекоровых частей микроплит [29].

На рис. 4 представлены круговые скоростные модели до глубины 270 км для сейсмостанций «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK). Построенные модели получились неоднозначными и отражают сложную глубинную подстанционную структуру исследуемого района.

На построенных моделях станций «Закаменск» (ZAK) и «Тырган» (TRG) прослеживается сходство скоростной структуры в противоположных диапазонах азимутов на глубинах до 100 км, ось симметрии выделяется в направлении с юга на север. Судя по скоростям во всех других азимутах, направление с юга на север является направлением быстрых скоростей в коре и в подкоровой мантии.

Круговая модель станции «Саянск» (SAY) выявляет сложную скоростную структуру без явной оси симметрии относительно станции, которая могла бы служить свидетельством мантийного современного или «вмороженного» течения. Однако в азимутальных диапазонах 210–270° и 90–150° можно проследить схожесть в распределении в коре и мантии высокоскоростных слоев, что может быть реакцией глубин на сжатие примерно в направлении восток – запад.

На модели станции «Монды» (MOY) видны высокоскоростные области в мантии и подкоровой мантии в азимутальном диапазоне 90–150°, то есть можно выделить направление быстрых скоростей как северо-запад – юго-восток (см. рис. 4).

Это предварительные результаты, поскольку для северного азимутального диапазона (от 330 до 30°) накоплено еще недостаточно телесейсмических данных.

Круговые модели наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях от пункта наблюдения и позволяют выявить анизотропность среды, проявляющуюся при таком представлении в наличии оси симметрии в круговой модели. На южной окраине Сибирского кратона по найденным до глубины 80 и 270 км зависимостям скорости поперечных сейсмических волн от азимута, глубины и расстояния от пункта наблюдения (круговым моделям $V_S(h,BAZ,d)$) выявлена азимутальная сейсмическая анизотропия, которая в среднем имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, но варьируется с глубиной (см. рис. 3, 4).

Также для лучшего представления полученных результатов по разработанным круговым скоростным моделям в районах наблюдения определены интервалы глубин наиболее интенсивных положительных скоростных аномалий по сравнению со стандартным скоростным разрезом IASP91 [30]. То есть полученные результаты $V_S(h,BAZ,d)$ сравнили с данными глобальной одномерной скоростной модели IASP91 посредством разности $V_S(h,BAZ,d)$ - $V_{IASP}(h)$. На полученных моделях (рис. 5) высокоскоростные аномалии выделены синим цветом как наиболее плотные и, соответственно, относительно холодные области. Они с большей вероятностью, чем другие толщи, могут отвечать условиям анизотропии. Красным цветом показаны пониженные скорости относительно скоростного разреза IASP91.

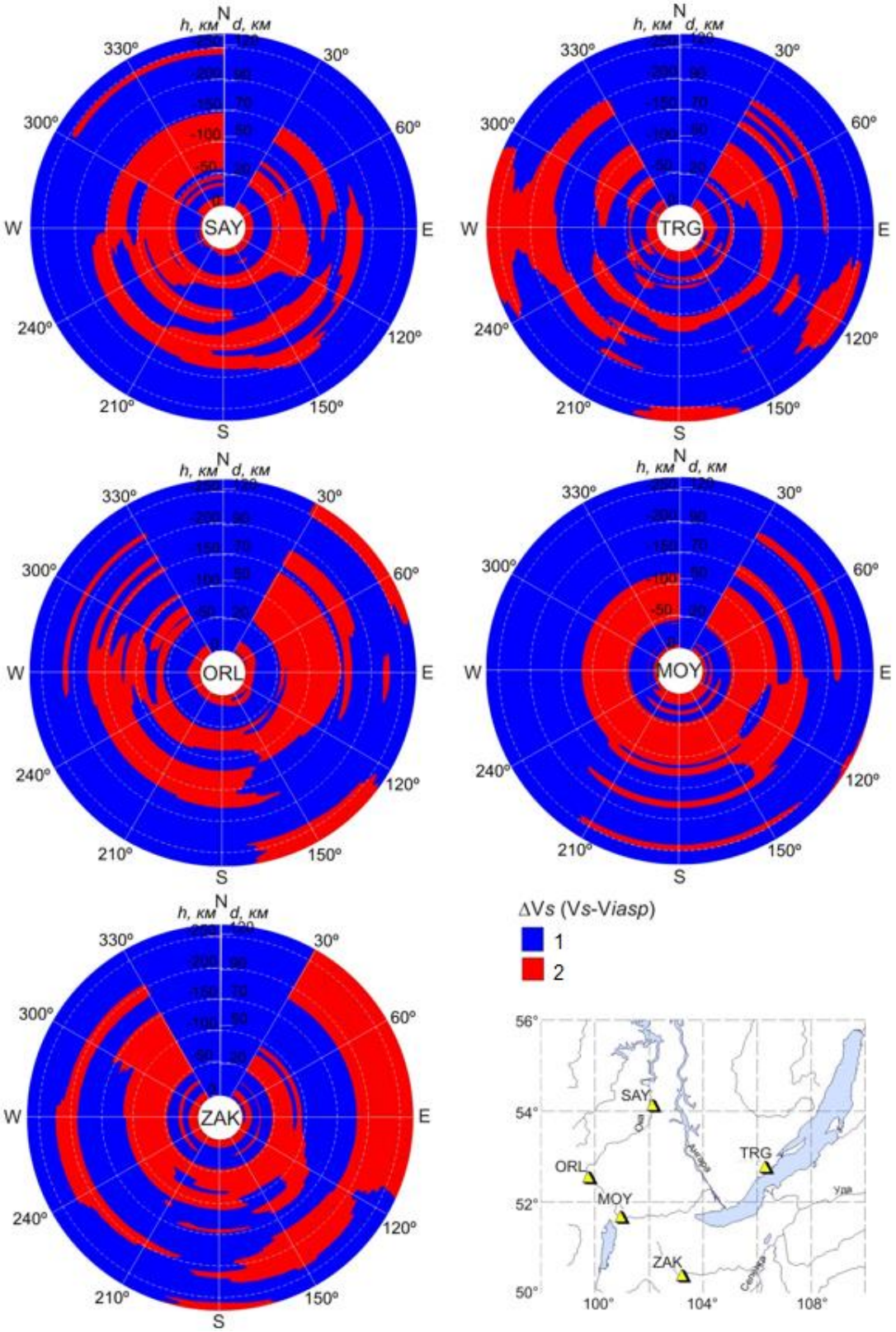



***Рис. 5. Круговые модели скоростных аномалий до глубины 270 км для сейсмических станций «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK):***

*1 – повышенные скорости; 2 – пониженные скорости*

***Fig. 5. Circular models of the velocity anomalies to a depth of 270 km for the seismic stations "Sayansk" (SAY), "Tyrgan" (TRG), "Orlik" (ORL), "Mondy" (MOY), "Zakamensk" (ZAK):***

*1 – higher velocities; 2 – lower velocities*

## Заключение

По данным телесейсмических наблюдений пяти цифровых широкополосных сейсмических станций за несколько лет при помощи эффективного и экологически чистого метода продольной приемной функции [21, 25] более детально изучена скоростная структура Саяно-Байкальской складчатой области вплоть до глубины 270 км.

Скорости сейсмических волн $V_S(h)$ определены в пределах земной коры со средним шагом по глубине 1 км, в пределах мантии – с шагом 5–10 км. Точность определения значений скорости волн ±0,1 км/с. Одномерные разрезы «глубина – скорость» рассчитаны для различных направлений относительно пунктов наблюдений «Саянск» (SAY), «Тырган» (TRG), «Орлик» (ORL), «Монды» (MOY), «Закаменск» (ZAK) согласно обратным азимутам *BAZ* рассмотренных землетрясений.

На основании найденных значений $V_S(h,BAZ)$ построен комплекс моделей, в том числе трехмерные круговые модели $V_S(h,BAZ,d)$ – горизонтальная проекция конусообразного объема среды, прозондированной с разных сторон сейсмическими лучами (радиус конуса модели определяется средним углом падения этих лучей).

Круговые модели $V_S(h,BAZ,d)$ наглядно демонстрируют скоростную неоднородность в различных направлениях от пункта наблюдения и позволяют выявить анизотропность среды, проявляющуюся при таком представлении в наличии оси симметрии в круговых моделях, которая в среднем имеет ориентацию с северо-запада на юго-восток, но варьируется с глубиной.

На основе полученных результатов можно предположить: удаленное воздействие Индо-Азиатской коллизии на зону контакта южной окраины Сибирского кратона с Центрально-Азиатским подвижным поясом подтверждается наличием в этой зоне глубинной азимутальной анизотропии, проявляющейся в юго-восточном направлении относительно пунктов наблюдения повышенной скоростью сейсмических волн в верхней мантии.

**Библиографический список**

1. Forsyth D.W. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1975. Vol. 43. Iss. 1. P. 103–162. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00630.x

2. Trampert J., Woodhouse J.H. Global anisotropic phase velocity maps for fundamental mode surface waves between 40 and 150 s // Geophysical Journal International. 2003. Vol. 154. Iss. 1. P. 154–165. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01952.x

3. Dziewonski A.M., Anderson D.L. Preliminary reference Earth model // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1981. Vol. 25. Iss. 4. P. 297–356. https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7

4. Mitchell B.J. On the inversion of Love- and Rayleigh-wave dispersion and implications for the Earth structure and anisotropy // Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society. 1984. Vol. 76. Iss. 1. P. 233–241. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb05040.x

5. Montagner J.-P., Tanimoto T. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies // Journal of Geophysical Research. 1991. Vol. 96. Iss. B12. P. 20337–20351. https://doi.org/10.1029/91JB01890

6. Villaseñor A., Ritzwoller M.H., Levshin A.L., Barmin M.P., Engdahl E.R., Spakman W., et al. Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2001. Vol. 123. Iss. 2-4. P. 169–184. https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00208-9

7. Panning M., Romanowicz B. Inferences on flow at the base of the Earth's mantle based on seismic anisotropy // Science. 2004. Vol. 303. Iss. 5656. P. 351–353. https://doi.org/10.1126/science.1091524

8. Яновская Т.Б., Кожевников В.М. Анизотропия верхней мантии Азиатского континента по групповым скоростям волн Рэлея и Лява // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 622–629.

9. Винник Л.П., Косарев Г.Л., Макеева Л.И. Анизотропия по наблюдениям волн SKS и SKKS // Доклады Академии наук СССР. 1984. Т. 278. № 6. С. 1335–1339.

10. Vinnik L.P., Makeyeva L.I., Milev A., Usenko A.Yu. Global patterns of azimuthal anisotropy and deformations in the continental mantle // Geophysical Journal International. 1992. Vol. 111. Iss. 3. P. 433–447. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb02102.x

11. Гольдин С.В., Суворов В.Д., Макаров П.В., Стефанов Ю.П. Структура и напряженно-деформированное состояние литосферы Байкальской рифтовой зоны в модели гравитационной неустойчивости // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 10. С. 1094–1105.

12. Gao S.S., Liu K.H., Davis P.M., Slack P.D., Zorin Y.A., Mordvinova V.V., et al. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. Vol. 108. Iss. B4. P. 2194. https://doi.org/10.1029/2002JB002039

13. Gao S.S., Liu K.H., Chen C. Significant crustal thinning beneath the Baikal rift zone: new constraints from receiver function analysis // Geophysical Research Letters. 2004. Vol. 31. Iss. 20. P. L20610. https://doi.org/10.1029/2004GL020813

14. Barruol G., Deschamps A., Deverchere J., Mordvinova V.V., Ulziibat M., Perrot J., et al. Upper mantle flow beneath and around the Hangay dome, Central Mongolia // Earth and Planetary Science Letters. 2008. Vol. 274. Iss. 1-2. P. 221–233. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.027

15. Oreshin S., Vinnik L., Makeyeva L., Kosarev G., Kind R., Wentzel F. Combined analysis of SKS splitting and regional P traveltimes in Siberia // Geophysical Journal International. 2002. Vol. 151. Iss. 2. P. 393–402. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01791.x

16. Calais E., Vergnolle M., San'kov V., Lukhnev A., Miroshnitchenko A., Amarjargal Sh., et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): implications for current kinematics of Asia // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2003. Vol. 108. Iss. B10. P. 2501. https://doi.org/10.1029/2002JB002373

17. Silver P.G., Chan W.W. Shear-wave splitting and subcontinental mantle deformation // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1991. Vol. 96. Iss. B10. P. 16429–16454. https://doi.org/10.1029/91JB00899

18. Gao S., Davis P.M., Liu H., Slack P.D., Zorin Yu.A., Mordvinova V.V., et al. Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone // Nature. 1994. Vol. 371. Iss. 6493. P. 149–151. https://doi.org/10.1038/371149a0

19. Gao S., Davis P.M., Liu H., Slack P.D., Rigor A.W., Zorin Y.A., et al. SKS splitting beneath continental rift zones // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1997. Vol. 102. Iss. B10. P. 22781–22797. https://doi.org/10.1029/97jb01858

20. Dricker I.G., Roecker S.W. Lateral heterogeneity in the upper mantle beneath the Tibetan plateau and its surroundings from SS-S travel time residuals // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2002. Vol. 107. Iss. B11. P. 2305. https://doi.org/10.1029/2001JB000797

21. Vinnik L.P. Detection of waves converted from P to SV in the mantle // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1977. Vol. 15. Iss. 1. P. 39–45. https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90008-5

22. Kosarev G.L., Makeyeva L.I., Vinnik L.P. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1987. Vol. 47. P. 11–24. https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90063-X

23. Zorin Yu.A., Mordvinova V.V., Turutanov E.Kh., Belichenko V.G., Artemyev A.A., Kosarev G.L., et al. Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication // Tectonophysics. 2002. Vol. 359. Iss. 3-4. P. 307–327.

24. Stammler K. SeismicHandler – programmable multichannel data handler for interactive and automating processing of seismological analyses // Computers & Geosciences. 1993. Vol. 19. Iss. 2. P. 135–140. https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90110-Q

25. Kosarev G.L., Petersen N.V., Vinnik L.P., Roecker S.W. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrast in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1993. Vol. 98. Iss. B3. P. 4437–4448. https://doi.org/10.1029/92JB02651

26. Kind R., Kosarev G.L., Petersen N.V. Receiver functions at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN) // Geophysical Journal International. 1995. Vol. 121. Iss. 1. P. 191–202. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03520.x

27. Haskell N.A. Crustal reflection of plane P and SV waves // Journal of Geophysical Research. 1962. Vol. 67. Iss. 12. P. 4751–4768. https://doi.org/10.1029/JZ067i012p04751

28. Крылов С.В., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик Г.В., Сергеев В.Н., Шелудько И.Ф. [и др.]. Детальные сейсмические исследования литосферы на P- и S-волнах. Новосибирск: Наука, 1993. 199 с.

29. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 251 с.

30. Kennett B.L.N., Engdahl E.R. Traveltimes for global earthquake location and phase identification // Geophysical Journal International. 1991. Vol. 105. Iss. 2. P. 429–465. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x

**References**

1. Forsyth DW. The early structural evolution and anisotropy of the oceanic upper mantle. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1975;43(1):103–162. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1975.tb00630.x

2. Trampert J, Woodhouse JH. Global anisotropic phase velocity maps for fundamental mode surface waves between 40 and 150 s. *Geophysical Journal International*. 2003;154(1):154–165. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01952.x

3. Dziewonski AM, Anderson DL. Preliminary reference Earth model. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1981;25(4)297–356. https://doi.org/10.1016/0031-9201(81)90046-7

4. Mitchell BJ. On the inversion of Love- and Rayleigh-wave dispersion and implications for the Earth structure and anisotropy. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*. 1984;76(1):233–241. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb05040.x

5. Montagner J-P, Tanimoto T. Global upper mantle tomography of seismic velocities and anisotropies. *Journal of Geophysical Research*. 1991;96(B12):20337–20351. https://doi.org/10.1029/91JB01890

6. Villaseñor A, Ritzwoller MH, Levshin AL, Barmin MP, Engdahl ER, Spakman W, et al. Shear velocity structure of central Eurasia from inversion of surface wave velocities. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2001;123(2-4):169–184. https://doi.org/10.1016/S0031-9201(00)00208-9

7. Panning M, Romanowicz B. Inferences on flow at the base of the Earth's mantle based on seismic anisotropy. *Science.* 2004;303(5656):351–353. https://doi.org/10.1126/science.1091524

8. Yanovskaya TB, Kozhevnikov VM. Upper mantle anisotropy beneath the Asian continent from group velocities of Rayleigh and Love waves. *Geologiya i geofizika*. 2006;47(5):622–629. (In Russ.)

9. Vinnik LP, Kosarev GL, Makeeva LI. Anisotropy by the observations of SKS and SKKS waves. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1984;278(6):1335–1339. (In Russ.)

10. Vinnik LP, Makeyeva LI, Milev A, Usenko AYu. Global patterns of azimuthal anisotropy and deformations in the continental mantle. *Geophysical Journal International*. 1992;111(3):433–447. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb02102.x

11. Gol'din SV, Suvorov VD, Makarov PV, Stefanov YuP. An instability gravity model for the structure and stress-stain state of lithosphere in the Baikal rift. *Geologiya i geofizika*. 2006;47(10):1094–1105. (In Russ.)

12. Gao SS, Liu KH, Davis PM, Slack PD, Zorin YA, Mordvinova VV, et al. Evidence for small-scale mantle convection in the upper mantle beneath the Baikal rift zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003;108(B4):2194. https://doi.org/10.1029/2002JB002039

13. Gao SS, Liu KH, Chen C. Significant crustal thinning beneath the Baikal rift zone: new constraints from receiver function analysis. *Geophysical Research Letters*. 2004;31(20):L20610. https://doi.org/10.1029/2004GL020813

14. Barruol G, Deschamps A, Deverchere J, Mordvinova VV, Ulziibat M, Perrot J, et al. Upper mantle flow beneath and around the Hangay dome, Central Mongolia. *Earth and Planetary Science Letters*. 2008;274(1-2):221–233. http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.027

15. Oreshin S, Vinnik L, Makeyeva L, Kosarev G, Kind R, Wentzel F. Combined analysis of SKS splitting and regional P traveltimes in Siberia. Geophysical Journal International. 2002;151(2):393–402. https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01791.x

16. Calais E, Vergnolle M, San'kov V, Lukhnev A, Miroshnitchenko A, Amarjargal Sh, et al. GPS measurements of crustal deformation in the Baikal-Mongolia area (1994–2002): implications for current kinematics of Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2003;108(B10):2501. https://doi.org/10.1029/2002JB002373

17. Silver PG, Chan WW. Shear-wave splitting and subcontinental mantle deformation. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1991;96(B10):16429–16454. https://doi.org/10.1029/91JB00899

18. Gao S, Davis PM, Liu H, Slack PD, Zorin YuA, Mordvinova VV, et al. Seismic anisotropy and mantle flow beneath the Baikal rift zone. *Nature*. 1994;371(6493):149–151. https://doi.org/10.1038/371149a0

19. Gao S, Davis PM, Liu H, Slack PD, Rigor AW, Zorin YA, et al. SKS splitting beneath continental rift zones. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 1997;102(B10):22781–22797. https://doi.org/10.1029/97jb01858

20. Dricker IG, Roecker SW. Lateral heterogeneity in the upper mantle beneath the Tibetan plateau and its surroundings from SS-S travel time residuals. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2002;107(B11):2305. https://doi.org/10.1029/2001JB000797

21. Vinnik LP. Detection of waves converted from P to SV in the mantle. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1977;15(1):39–45. https://doi.org/10.1016/0031-9201(77)90008-5

22. Kosarev GL, Makeyeva LI, Vinnik LP. Inversion of teleseismic P-wave particle motions for crustal structure in Fennoscandia. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1987;47:11–24. https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90063-X

23. Zorin YuA, Mordvinova VV, Turutanov EKh, Belichenko VG, Artemyev AA, Kosarev GL, et al. Low seismic velocity layers in the Earth's crust beneath Eastern Siberia (Russia) and Central Mongolia: receiver function data and their possible geological implication. *Tectonophysics*. 2002. 2002;359(3-4):307–327. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00531-0

24. Stammler K. SeismicHandler – programmable multichannel data handler for interactive and automating processing of seismological analyses. *Computers & Geosciences*. 1993;19(2):135–140. https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90110-Q

25. Kosarev GL, Petersen NV, Vinnik LP, Roecker SW. Receiver functions for the Tien Shan analog broadband network: contrast in the evolution of structures across the Talasso-Fergana fault. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.

1993;98(B3):4437–4448. https://doi.org/10.1029/92JB02651

26. Kind R, Kosarev GL, Petersen NV. Receiver functions at the stations of the German Regional Seismic Network (GRSN). *Geophysical Journal International*. 1995;121(1):191–202. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb03520.x

27. Haskell NA. Crustal reflection of plane P and SV waves. *Journal of Geophysical Research*. 1962;67(12):4751–4768. https://doi.org/10.1029/JZ067i012p04751

28. Krylov SV, Mishen'kin BP, Mishen'kina ZR, Petrik GV, Sergeev VN, Shelud'ko IF, et al. *Detailed seismic studies of the lithosphere at the P and S waves*. Novosibirsk: Nauka; 1993. 199 p. (In Russ.)

29. Lobkovskii LI. *Geodynamics of spreading and subduction zones, and bunk plate tectonics*. Moscow: Nauka; 1988. 251 p. (In Russ.)

30. Kennett BLN, Engdahl ER. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*. 1991;105(2):429–465. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb06724.x

## Критерии авторства / Authorship criteria

Кобелев М.М., Хритова М.А., Мордвинова В.В., Кобелева Е.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Mikhail M. Kobelev, Mariya A. Khritova, Valentina V. Mordvinova, Elena A. Kobeleva 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

## Сведения об авторах / Information about the authors

**Кобелев Михаил Михайлович,**
начальник отдела сейсмических наблюдений,
Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
ведущий инженер лаборатории комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
✉ e-mail: kobelevmm@gmail.com

**Mikhail M. Kobelev,**
Head of the Seismic Observation Department,
Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS",
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
Leading Engineer, Laboratory of Complex Geophysics,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: kobelevmm@gmail.com

**Хритова Мария Анатольевна,**
кандидат технических наук,
начальник сектора автоматизации сбора
и обработки сейсмологической информации,
Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: hritova@crust.irk.ru

**Mariya A. Khritova,**
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Sector of Automation of the Collecting
and Processing of Seismological Information,
Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS",
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
Researcher, Laboratory of Complex Geophysics,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: hritova@crust.irk.ru

**Мордвинова Валентина Владимировна,**
доктор геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории комплексной геофизики,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: mordv@crust.irk.ru
**Valentina V. Mordvinova,**
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Lead Researcher, Laboratory of Complex Geophysics,
Institute of the Earth's Crust, SB RAS,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: mordv@crust.irk.ru

**Кобелева Елена Анатольевна,**
кандидат физико-математических наук,
директор,
Байкальский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
e-mail: ekobeleva@crust.irk.ru
**Elena A. Kobeleva,**
Cand. Sci. (Phys. & Math.),
Director,
Baikal Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Survey RAS",
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
e-mail: ekobeleva@crust.irk.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 550.370**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-209-219**

# Перспективы нефтегазоносности рифовых отложений на юге Вилюйской синеклизы по геофизическим данным

**© А.А. Кравченко[a], А.М. Пашевин[b], А.Е. Лаврентьева[c]**
[a]Иркутский национальный исследовательсий технический университет, г. Иркутск, Россия
[a–c]Обособленное подразделение АО «Росгеология» «Иркутское геофизическое подразделение», г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** Целью данного исследования являлось рассмотрение результатов изучения погребенных рифовых органогенных построек кембрийского периода на востоке Сибирской платформы, оценка их коллекторских свойств и характера распространения. Основой для работы служили проведенные на территории сейсмические, электроразведочные и геохимические исследования. Также были использованы результаты палеогеографических реконструкций. Авторами определены уровни сопротивления для кембрийско-вендских отложений, соответствующие развитию коллекторов, перспективных на нефть. Построены геоэлектрические разрезы, отражающие развитие органогенных структур в районе сочленения Вилюйской синеклизы и Алданской антеклизы. Описаны геоэлектрические характеристики Западно-Якутского барьерного рифа и зоны сноса разрушенных построек. Рассмотрены вопросы миграции и аккумуляции углеводородов в пределах района. Определены перспективные зоны для бурения поисковой скважины. Погребенные рифовые постройки и зона сноса органогенного материала могут служить очагами генерации углеводородов. Ввиду отсутствия на участке повсеместных соляных высокоомных покрышек возможно прогнозировать развитие коллекторов трещинно-кавернозного типа, сформированных в ходе процессов выщелачивания, преобладающих на фоне водонасыщения пермских отложений в Вилюйской синеклизе, а также обоснованных трансгрессивно-регрессионными этапами. Источником углеводородов могут выступать Куонамские отложения доманикоидного типа Юдомо-Оленекского бассейна, граничащие с барьерным рифом.

***Ключевые слова:*** Западно-Якутский риф, Вилюйская синеклиза, Алданская антеклиза, электроразведка, углеводороды

***Информация о статье:*** Дата поступления 20 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 27 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Кравченко А.А., Пашевин А.М., Лаврентьева А.Е. Перспективы нефтегазоносности рифовых отложений на юге Вилюйской синеклизы по геофизическим данным. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 209–219. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-209-219

# Oil-and-gas potential of the reef deposits in the Vilyuy syneclise south

**© Anastasia A. Kravchenko[a], Alexander M. Pashevin[b], Alla E. Lavrenteva[c]**
[a]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
[a–c]“Irkutsk Geophysical Division”, JSC "Rosgeologia", Irkutsk, Russia

***Abstract:*** The article discusses the results of the study of the buried Cambrian organogenic reef structures in the Siberian platform east, their reservoir properties assessment, and the nature of their distribution. The basis for the study was the seismic, electrical and geochemical investigations conducted on the territory. Also involved were the results of the paleogeographic reconstructions. The study has defined the resistance levels for the Cambrian-Vendian deposits that correspond to the development of the reservoirs promising for oil. The authors have constructed geoelectric sections that reflect the development of the organogenic structures in the joint area of the Vilyui syneclise and Aldan anteclise. The geoelectric characteristics of the West Yakut barrier reef and the demolition zone of the destroyed buildings have been described. The issues of hydrocarbon migration and accumulation within the region have been considered. Promising zones for drilling prospecting wells have been identified. The buried reef structures and the zone of the organogenic material demolition can serve as foci of hydrocarbon generation. The absence of the extensive high-resistance covers on the site makes it possible to predict the development of fractured-cavernous collectors formed by the leaching processes prevailing against the background of the water saturation of the Perm deposits in the Vilyui syneclise, and the transgression-regression stages. The Domanicoid type Kuonama deposits of the Yudomo-Oleneksky basin bordering the barrier reef can be considered hydrocarbon sources.

***Keywords:*** West Yakut reef, Vilyuy syneclise, Aldan anteclise, electrical exploration, hydrocarbons

***Information about the article:*** Received April 20, 2020; accepted for publication May 27, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Kravchenko AA, Pashevin AM, Lavrenteva AE. Oil-and-gas potential of the reef deposits in the Vilyuy syneclise south. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):209–219. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-209-219

## Введение

Несмотря на предсказания о глобальном переходе на альтернативные источники энергии, в настоящее время в нефтяной промышленности увеличиваются масштабы разведки углеводородного сырья. Восточно-Сибирский регион выступает в качестве одного из объектов для наращивания запасов углеводородов. Существующие представления о принципах образования, залегания и миграции углеводородов уже сформировали критерии для оценки перспективности районов и позволили разведать основные типичные структуры Сибирской платформы. Как правило, основной интерес представляют валы, поднятия, антеклизы. Слабо разведанными остаются нетипичные структурные образования и накопления углеводородов. К ним относятся и рифовые образования.

Широкое распространение рифовых систем в восточной части Сибирской платформы связано с существованием древнего эпиконтинентального Восточно-Сибирского морского бассейна. Основные перспективы района обоснованы развитием Куонамского комплекса доманикоидных отложений, трактуемых как материнские, которые развиты на территории древней морской части района. Куонамская формация стратиграфически приурочена к трем ярусам кембрийской системы: нижним – ботомскому и тойонскому, среднему – амгинскому [1]. Рифогенные отложения сформированы в краевых частях бассейна. Эти органогенные постройки называются Западно-Якутским барьерным рифом. Одна из его ветвей, Анабаро-Синская, имеет распространение от Алданской до Анабарской антеклизы в северо-западном простирании и захватывает Вилюйскую синеклизу [2].

Барьерный риф формировался на протяжении ленского и амгинского веков и отделял лагунную и морскую части бассейна. Огибая с запада водную зону с нормальной соленостью, рифовые постройки накапливали в себе органическое вещество [3]. Кембрийские отложения юго-западной – лагунной – области характеризуются повышенной соленостью вод и, как следствие, галогенно-карбонатными отложениями, отложения восточной области – нормальной соленостью вод и карбонатно-доманикоидным типом залежей [4, 5]. Рассматриваемый участок рифового комплекса относится к Анабаро-Синской рифовой карбонатной формации (ветви), обрамляющей Юдомо-Оленекский бассейн с юго-запада. По мнению М.М. Грачевского, рифогенное и шельфовое обрамление открытого морского некомпенсированного бассейна является высокоперспективным объектом в нефтегазоносном плане ввиду синхронности его образования с нефтепроизводящими доманикоидными отложениями [6].

Особый интерес представляет южная часть Вилюйской синеклизы в сочленении с северной частью Алданской антеклизы. Связано это с общим характером поднятия области в сторону антеклизы, а следовательно, и с доступностью предполагаемых залежей [7]. Ключевую роль здесь может играть рифовый комплекс, находящийся на пути миграции углеводородов в направлении сокращения мощности осадочного чехла. Он может быть как источником, так и аккумулятором углеводородов [8].

Немаловажную роль играет оценка палеогеографических условий образования вероятных залежей. Согласно известным палеогеографическим реконструк-

циям, на протяжении кембрия место формирования вышеупомянутых фаций неоднократно менялось в связи с тектоническими событиями и перестройками структурного плана района [4, 9]. Происходило это ритмично с регрессивными и трансгрессивными этапами (рис. 1). Основное время кембрийского периода было ознаменовано широкой трансгрессией, нисходящей с северо-запада, и послужило накоплению преимущественно карбонатных отложений [10].

Локальные регрессионные перерывы случались в конце раннего кембрия (послеолекменское время) и в периоде с майского времени до конца позднего кембрия. Последнее обуславливалось поднятием южных краевых областей платформы. Таким образом, палеогеографические факторы играют значимую роль в распределении рифовых образований [11].

Рассматривая рифовую зону в качестве перспективного объекта, важно оценить условия образования и сохранности углеводородов. Куонамская свита, подвергшаяся катагенезу уровня зоны нефтеобразования, может производить углеводороды и аккумулировать их в коллекторах рифогенного комплекса и карбонатных постройках вышележащих толщ. Также важными факторами являются участки улучшенных коллекторов и приуроченность к возвышенностям, подвергшимся выщелачиванию в периоды регрессии. Зоны склонов, кавернозность, пористость (с пустотностью 10–20 %), наличие соленосного флюидоупора, доступность для бурения и развитие

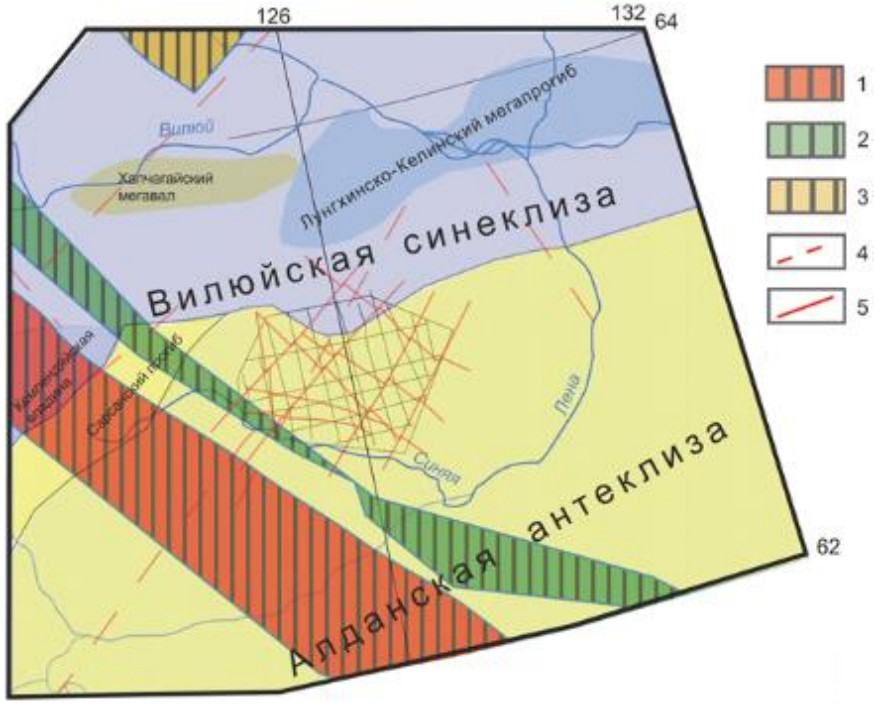



***Рис. 1. Структурная схема области исследований***
***(по К.И. Микуленко и В.С. Старосельцеву, 1979[1], с упрощениями):***
*1–3 – переходная зона от морской области к лагунной по Я.К. Писарчик: 1 – позднеалданское время (ранний кембрий), 2 – ленское время (ранний кембрий), 3 – поздний кембрий; 4 – региональные разломы, секущие фундамент и осадочный чехол; 5 – разломы, выделенные по комплексу геофизических методов*

***Fig. 1. Structure chart***
***(according to K.I. Mikulenko and V.S. Staroseltsev, 1979[1], with simplifications):***
*1–3 – transition zone (marine to lagoon) according to Y.K. Piesarchik: 1 – Late Aldan period (Early Cambrian), 2 – Lena period (Early Cambrian), 3 – Late Cambrian; 4 – regional faults cutting the foundation and sedimentary cover; 5 – faults identified by the complex of geophysical methods*

[1] Тектоническая карта осадочного чехла Сибирской платформы. Масштаб 1:5000000 / ред. К.И. Микуленко, В.С. Старосельцев. Новосибирск, 1979.

системы разломов для миграции углеводородов из нефтематеринских свит входят в ряд основополагающих признаков для составления прогноза [12]. Карта перспектив, составленная по результатам комплекса геофизических и геохимических исследований (рис. 2), позволяет оценить коллекторские свойства горных пород иниканской свиты (аналог куонамской).

## Методы исследования

Выделение рифовых построек традиционно осуществляется методами сейсморазведки и позволяет выделить структурные особенности по аномалиям волнового поля. Зондирование методом становления поля в ближней зоне, ориентированное на определение проводимости и сопротивления пород, позволяет оценить коллекторские свойства выделенных структур. С его помощью осуществляется трассирование внешних бортов барьерных рифов в условиях фациальной разности рифовых и предрифовых отложений [13–15]. Для уточнения зон развития рифовых отложений авторами данной статьи также были использованы результаты геохимических исследований.

## Результаты исследования

На рассматриваемой территории по результатам геохимических исследований в пределах кембрийской системы отложений выделены зоны вероятного формирования рифовых построек. Частично они отображены на сейсмических разрезах (рис. 3, *a*). На сейсмическом разрезе, отражающем сочленение Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы, в южной части которого предполагается перспективная нефтеносная зона, выделены органогенные структуры. Характер расположения органогенных построек отражает имевшие место на данной территории трансгрессивные и регрессивные этапы [16]. По результатам электроразведки выделяются две предполагаемые рифовые постройки (рис. 3, *b*). Та из них, что находится южнее, соответствует раннему кембрию, ее положение и характер заложения отображают трансгрессивные процессы региона. Стоит отметить предположительную структурную сохранность биогерма по сравнению с северными участками, трактующимися как область сноса. Неоднородный уровень сопротивления в пределах 100–300 Ом·м южной части органогенного комплекса может свидетельствовать о повышенной трещиноватости и кавернозности рифогенной структуры.

Обрамляющие постройку системы разломов подтверждают приуроченность развития рифов к тектоническим перестройкам региона. Низкие сопротивления подстилающих пород венда – 10–40 Ом·м – отвечают уровням для водонасыщенного коллектора. Это дает основание рассуждать о развитии процессов выщелачивания и образовании каверн, а также коллекторов кавернозного типа. Последние ряд авторов считают перспективными в условиях развития рифовой системы на юге Анабарской и востоке Алданской атеклиз [12, 17].

Уровни продольного электрического сопротивления иниканской свиты, связанные с нефтяной перспективностью, лежат в пределах 40–90 Ом·м. В области профиля, отображенного на рис. 4, на основе комплекса геофизических и геохимических исследований предполагается перспективный в нефтегазоносном отношении объект. Выделенный участок, вероятно, характеризуется высокой кавернозностью, связанной с процессами выщелачивания, и может рассматриваться как разрушенная органогенная постройка. Очевидно, эта зона подверглась действию неоднократной трансгрессии в период раннего кембрия. О тектонической активности района свидетельствуют многочисленные тектонические разломы, которые могли послужить развитию обильной трещиноватости.

На субмеридианальных разрезах (рис. 5) отчетливо видны этапы трансгрессивно-регрессивных циклов. Характерный сформировавшийся уступ, выраженный сокращением мощности палеозойских

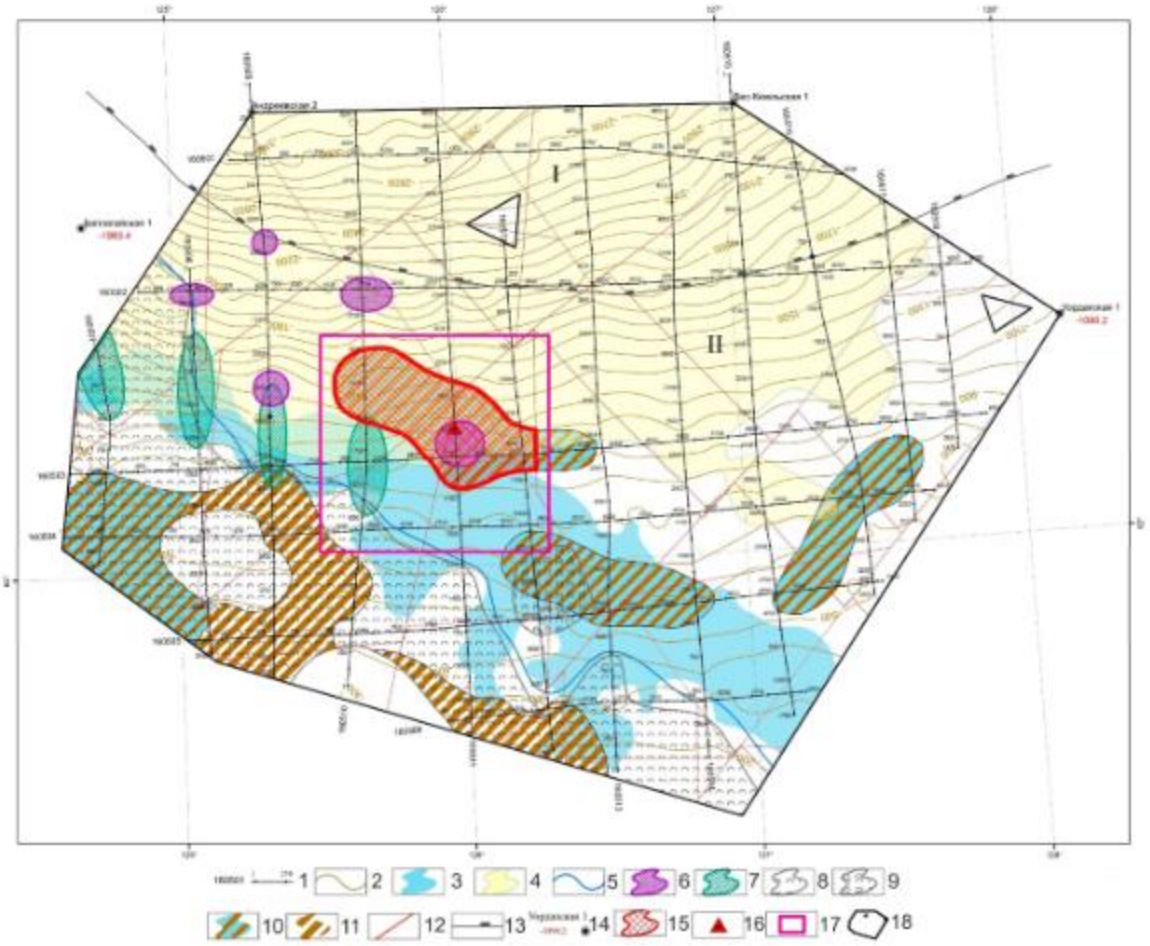



***Рис. 2. Карта перспективных зон нефтегазоносности иниканской свиты кембрия на основе результатов комплекса геофизических и геохимических исследований (составитель – ОП АО «Росгеология» «Иркутское геофизическое подразделение»):***

*1–3 – данные 2D-сейсморазведки методом общей глубинной точки: 1 – сейсморазведочные профили с общими глубинными точками, 2 – изогипсы кровли иниканской свиты, 3 – область изменения формы записи в интервале общей глубины от кровли иниканской свиты кембрийских отложений до поверхности фундамента по результатам сейсмофациального анализа, связываемая с вероятным замещением мелководно-обломочных отложений на отложения иниканской свиты;*
*4 – данные электроразведки: предполагаемые зоны наличия коллектора, перспективного в нефтегазовом отношении;*
*5–11 – данные геохимических исследований: 5 – граница замещения доманикоидных отложений, 6 – области предполагаемого рифообразования, 7 – области сноса продуктов разрушения рифовых построек, 8 – Западно-Якутский барьерный риф, 9 – отдельные рифовые массивы, 10 – прогнозная нефтегазоносная зона, 11 – прогнозная нефтяная зона;*
*12–18 – данные комплексного анализа потенциальных полей: 12 – тектонические нарушения, выделенные по результатам анализа потенциальных полей, 13 – граница порядковых структур: I – Вилюйская синеклиза, II – Алданская антеклиза, 14 – скважины глубокого бурения, 15 – перспективный участок по комплексу методов, 16 – рекомендуемые скважины по комплексу методов, 17 – участки уплотнения сейсморазведочных работ 2D-сейсморазведки методом общей глубинной точки по комплексу методов, 18 – контур Синской площади*

***Fig. 2. Map of promising oil and gas zones of the Inikan Cambrian formation by the set of geophysical and geochemical methods (compiled by "Irkutsk Geophysical Division", JSC "Rosgeologia")***

*1–3 – 2D seismic survey by the common depth point method 2D: 1 – seismic profiles with common depth points, 2 – isohypses of the Inikan formation roof, 3 – record form change area in the total depth interval from the Inikan formation roof of the Cambrian sediments to the base surface, according to the seismic facies analysis results, presumably associated with the replacement of the shallow-clastic sediments by the Inikan formation deposits;*
*4 – electrical survey: prospective reservoir zones, promising in the oil and gas terms;*

*5–11 – geochemical studies: 5 – boundary of the domanikoid deposit substitution,*
*6 – areas of assumed reef formation, 7 – drift areas of the reef structures destruction products,*
*8 – West Yakut barrier reef, 9 – separate reef massifs,*
*10 – predicted oil and gas zone, 11 – predicted oil zone;*
*12–18 – complex analysis of the potential fields, 12 – tectonic disturbances identified*
*by the analysis of potential fields, 13 – boundary of the ordinal structures:*
*I – Vilyuy syneclise, II – Aldan anteclise, 14 – deep drilling wells,*
*15 – promising area according to the set of methods, 16 – recommended wells*
*according to the set of methods, 17 – compaction sections of 2D seismic survey*
*by the common depth point method, according to the set of methods, 18 – Sinskaya area contour*

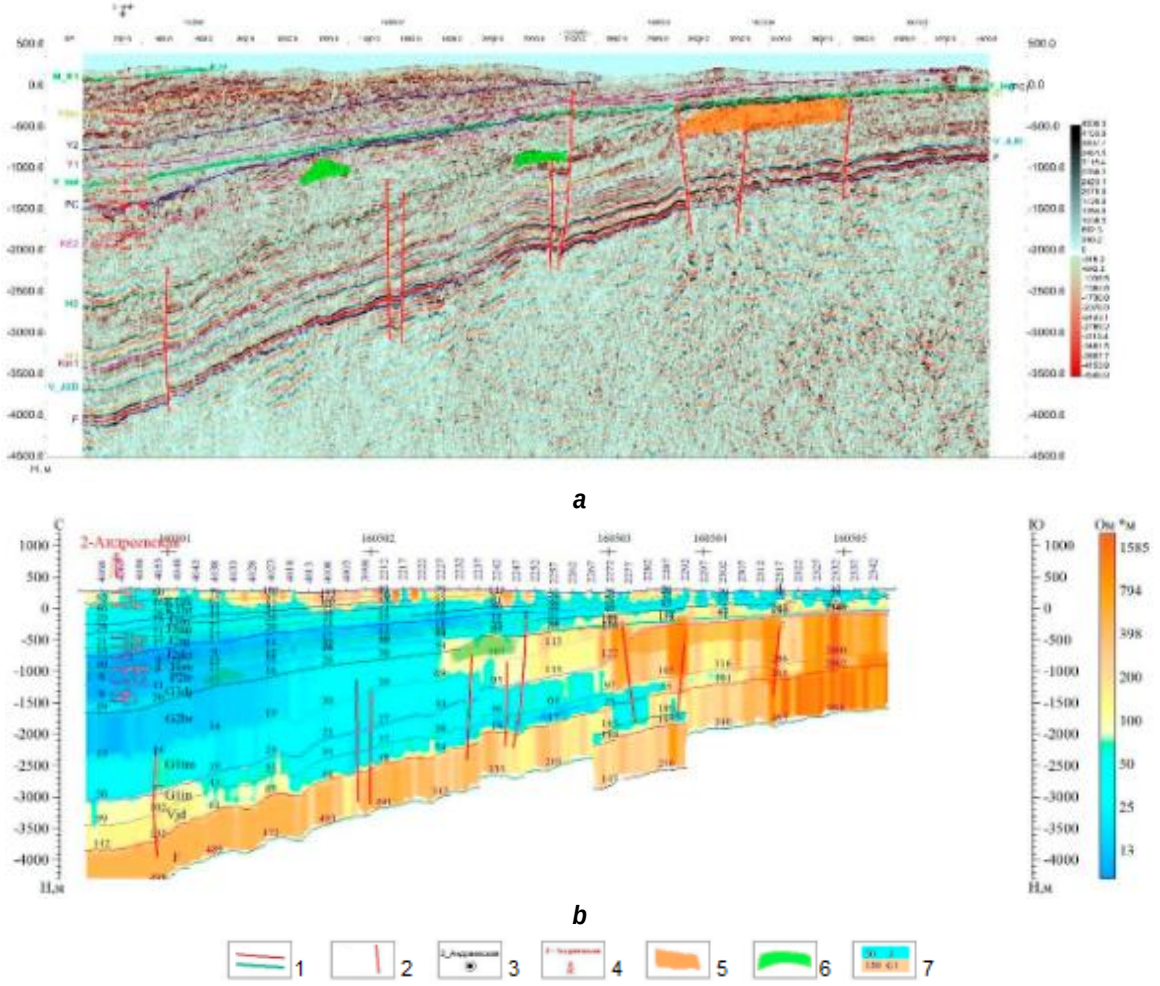



***Рис. 3. Зона Западно-Якутского барьерного рифа в разрезе южного борта Вилюйской синеклизы:***
*a – сейсмический разрез; b – геоэлектрический разрез:*
*1 – отражающие горизонты, 2 – тектонические нарушения, 3, 4 – скважины,*
*5 – область Западно-Якутского рифового барьера, 6 – одиночные рифовые постройки,*
*7 – геоэлектрические горизонты и их сопротивления, Ом·м.*

***Fig. 3. West Yakut barrier reef zone in the section of the southern side of the Vilyuy syneclise:***
*a – seismic section; b – geoelectric section:*
*1 – reflecting horizons, 2 – tectonic disturbances, 3, 4 – wells,*
*5 – West Yakut reef barrier area, 6 – single reef structures,*
*7 – geoelectric horizons and their resistance, Ohm·m*

отложений, является результатом трансгрессии раннего кембрия, вызванной общим прогибанием Сибирской платформы и дальнейшим поднятием Алданской антеклизы в среднем кембрии с вызванными регрессионными этапами [18]. Подобные тектонические события ознаменовали небольшую смену фациальных обстановок и смещение границ рифовых образований соответственно. Так, рифовые постройки среднего кембрия наиболее активно подвергались смене режимов и в

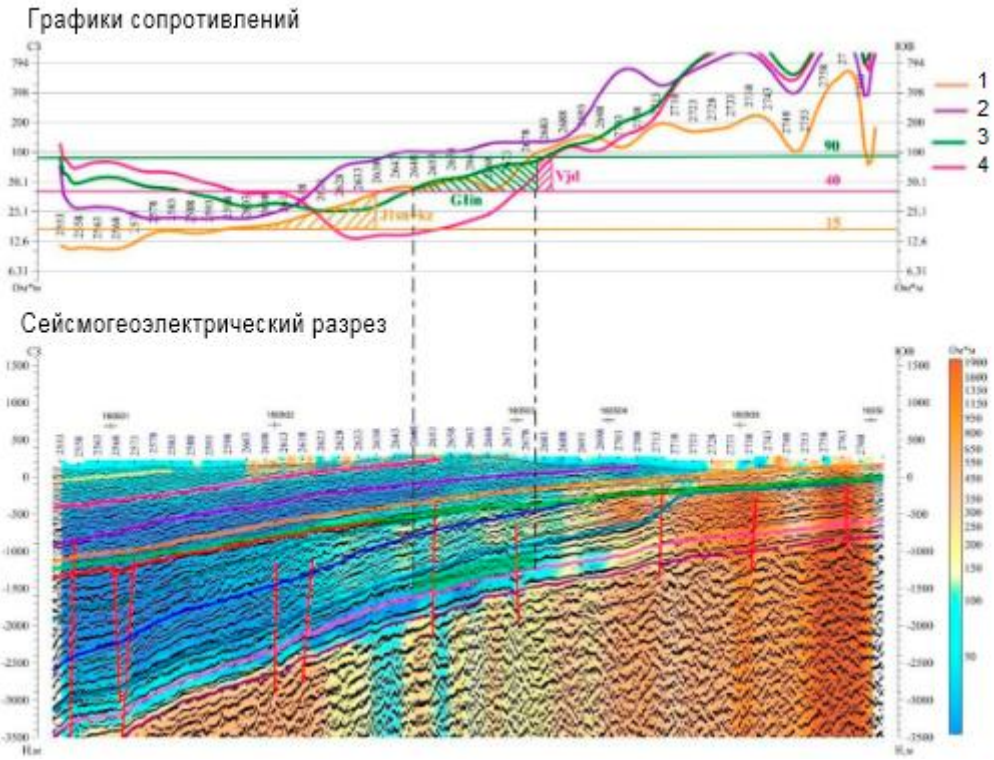



***Рис. 4. Сейсмогеоэлектрический разрез и графики сопротивлений по свитам южного борта Вилюйской синеклизы с выделенными граничными уровнями сопротивлений для юрских, кембрийский и вендских отложений:***
*1 – нижнеюрские отложения; 2 – тымпынская толща кембрия;*
*3 – иниканская свита кембрия; 4 – юдомская свита кембрия*
***Fig. 4. Seismic geoelectric section and resistance graphs along the suites of the southern side of the Vilyui syneclise with marked boundary resistance levels for Jurassic, Cambrian, and Vendian deposits:***
*1 – Lower Jurassic sediments; 2 – Tympyn Cambrian series;*
*3 – Inikan Cambrian suite; 4 – Yudom Camrian suite*

меньшей степени сохранили свою структуру. Это может быть как положительным, так и отрицательным фактором для прогноза. С одной стороны, встает вопрос об образовании коллектора, с другой – о его сохранности. Характерный уступ может означать не только наличие рифовых построек, но и существенное различие темпов осадконакопления на шельфе и в открытом бассейне.

Высокой значимостью для трактовки результатов геофизических исследований обладают результаты геохимического анализа площади. Примечательно, что по показаниям приповерхностного газогеохимического поля повышенные концентрации углеводородов прогнозируются на юго-западе площади. Предполагаются возможные насыщения залежей именно жидкой нефтью.

В зоне, примыкающей к рифогенным отложениям, катагенез рассеянного органического вещества (РОВ) иниканской свиты достигает градации МК2 (или условий реализации главной зоны нефтеобразования). Другим, но менее интенсивным источником могут быть глинисто-карбонатные отложения венда. Глубинные системы разломов и уровень катагенеза РОВ позволяет предположить в выделенных зонах разгрузку углеводородов, генерированных РОВ иниканской свиты.

Для венд-кембрийских отложений зоны водонасыщенных коллекторов характеризуются значениями от 10 до 40 Ом·м, зоны перспективных в нефтегазоносном отношении коллекторов – значениями от 40 до 90 Ом·м. Зоны со значениями, превышающими указанные, могут трактоваться как зоны неколлекторов.

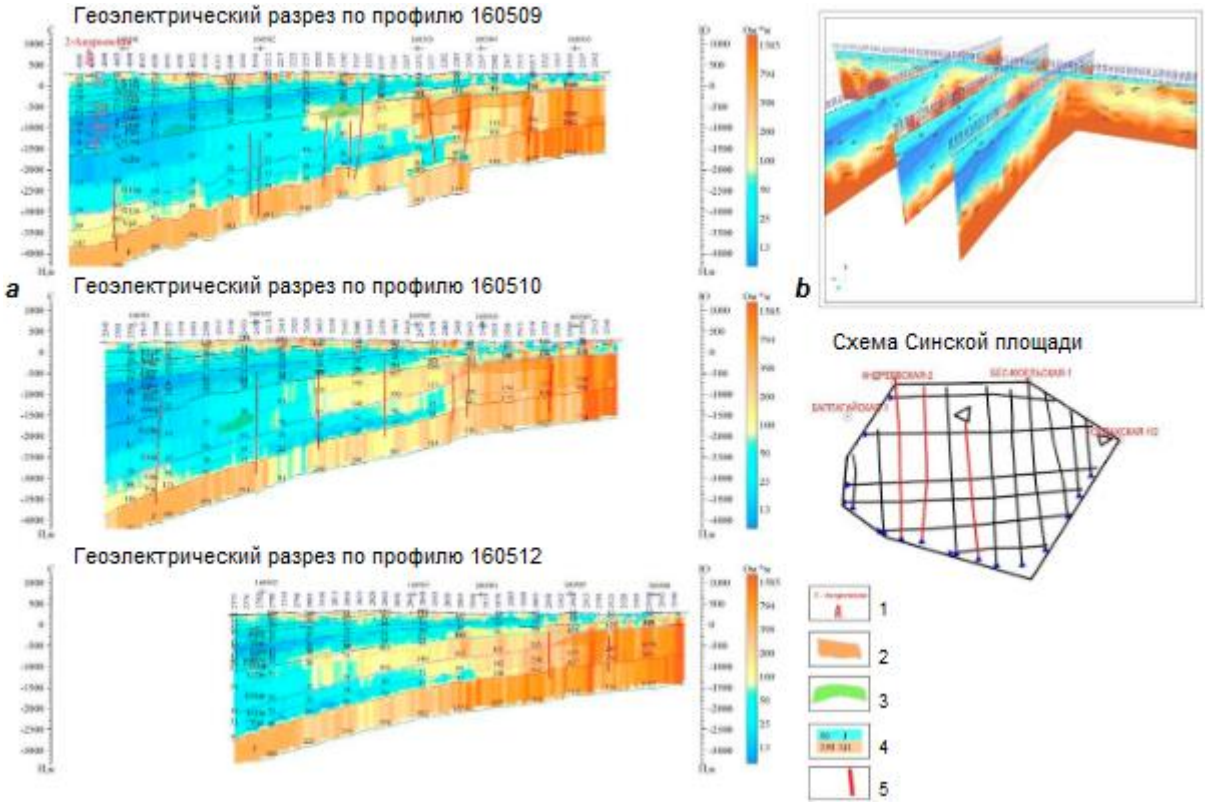



***Рис. 5. Геоэлектрическая характеристика участка исследований:***
*a – геоэлектрические разрезы с выделенными органогенными постройками по комплексу методов;*
*b – трехмерное представление дифференциальных разрезов:*
*1 – скважина глубокого бурения, 2 – Западно-Якутский барьерный риф,*
*3 – одиночные рифовые постройки, 4 – геоэлектрические горизонты*
*и их сопротивления, Ом·м, 5 – тектонические нарушения*
***Fig. 5. Geoelectric characteristic of the research area:***
*a – geoelectric sections with distinguished organogenic constructions according to thecomplex of methods;*
*b – three-dimensional representation of differential sections:*
*1 – deep drilling well, 2 – West Yakutian barrier reef,*
*3 – single reef structures, 4 – geoelectric horizons*
*and their resistance, Ohm·m, 5 – tectonic disturbances*

## Заключение

Анализ результатов геофизических и геохимических исследований позволяет предположить, что участки разрушенных органогенных образований, характеризующиеся средним уровнем сопротивлений от 40 до 90 Ом·м, можно рассматривать как перспективные зоны. Ввиду отсутствия надежных соляных покрышек предполагается кавернозный тип ловушек, ознаменованный широким распространением водонасыщенных коллекторов в северной части, приуроченной к депрессии.

Вместе с тем остается актуальным ряд вопросов. Представляется интересным уточнение связи скоплений нефти с рифовыми постройками в этом регионе и возможности их картирования по данным зондирования методом становления поля в ближней зоне, а также изучение вопроса природы геофизических и геохимических аномалий: принадлежность органогенного вещества кембрийским отложениям или же влияние миграционного фактора движения углеводородов. Следующий этап в разработке указанных вопросов связан с анализом результатов исследований на смежных площадях и корреляцией полученных результатов.

Примечательно, что до середины 70-х годов прошлого века многими отрицалось само существование рифового комплекса на востоке Сибирской

платформы. В настоящее время можно утверждать не только о его существовании, но и о перспективности в нефтяном отношении. Отметим, что в ряд предпосылок для выявления нефтеносности помимо существования антиклинальной структуры также входит широкое распространение материнских толщ, достаточный уровень катагенеза и наличие пористых сред, способных вмещать и сохранять углеводороды [19, 20]. Все вышеперечисленные факторы освещены в данной работе, но тем не менее нуждаются в дополнительной разработке, уточнении и оценке их корректности.

**Библиографический список**

1. Арчегов В.Б. Доманикоидные формации Сибирской платформы – куонамская битуминозная карбонатно-сланцевая формация // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С. 53–59.

2. Бессмертный С.Ф. Особенности строения Анабаро-Синской рифогенной системы в пределах Средне-Мархинского алмазоносного района по данным среднемасштабной сейсморазведки // Геология алмазов – настоящее и будущее: сб. ст. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2005. С. 241–246.

3. Обстановки осадконакопления и их эволюция: сб. ст. / отв. ред. Ю.П. Казанский. М.: Наука, 1984. 253 с.

4. Писарчик Я.К., Минаева М.А., Русецкая Г.А. Палеогеографическая характеристика Сибирской платформы в кембрийское время // Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов: материалы Всесоюз. совещ. по оценке нефтегазоносности территории Якутии. М.: Недра, 1968. С. 81–90.

5. Геология и перспективы нефтегазоносности рифовых систем кембрия Сибирской платформы / ред. В.А. Асташкин. М.: Недра, 1984. 185 с.

6. Грачевский М.М., Берлин Ю.М., Дубовской И.Т., Ульмишек Г.Ф. Корреляция разнофациальных толщ при поисках нефти и газа. М.: Недра, 1969. 296 с.

7. Ситников В.С., Алексеев Н.Н., Павлова К.А., Погодаев А.В., Слепцова М.И. Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Вилюйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12. № 1. С. 1–20. https://doi.org/10.17353/2070-5379/9_2017

8. Ситников В.С., Кушмар И.А., Прищепа О.М., Погодаев А.В. О возможном открытии на юге Вилюйской синеклизы нового нефтеносного района (Сибирская платформа) // Геология нефти и газа. 2013. №. 4. С. 2–12.

9. Тучков И.И., Андрианов В.Н., Горнштейн Д.К., Киселев А.Е., Семенов Г.Т., Ушаков А.И. [и др.]. История развития и палеогеографические условия накопления нефтегазоносных отложений на территории Якутии // Геологическое строение и нефтегазоносность восточной части Сибирской платформы и прилегающих районов: материалы Всесоюз. совещ. по оценке нефтегазоносности территории Якутии. М.: Недра, 1968. С. 25–41.

10. Мельников Н.В. Венд-кембрийский соленосный бассейн Сибирской платформы (стратиграфия, история развития). Новосибирск: Изд-во СНИИГГиМС, 2018. 177 с.

11. Сухов С.С., Фомин А.М., Моисеев С.А. Палеогеография как инструмент реконструкции кембрийского рифообразования на востоке Северо-Тунгусской нефтегазоносной области: от истории исследований к перспективам // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2018. Т. 13. № 3. С. 1–26. https://doi.org/10.17353/2070-5379/28_2018

12. Филипцов Ю.А., Мельников Н.В., Ефимов А.С., Вальчак В.И., Горюнов Н.А., Евграфов А.А. [и др.]. Нижне-среднекембрийский рифогенный барьер на севере Сибирской платформы – объект первоочередных нефтегазопоисковых работ // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 2. С. 25–35.

13. Аксенов А.А., Новиков А.А. Прогноз, поиски и разведка погребенных нефтегазоносных структур. М.: Недра, 1983. 161 с.

14. Мамаева А.В., Махнач Е.Н. Разработка геоэлектрической модели рифовых комплексов в пределах восточного борта Курейской синеклизы по данным магнитотеллурических зондирований // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2016. Т. 2. №. 2. С. 73–77.

15. Unsworth M. New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods // CSEG Recorder. 2005. Vol. 30. Iss. 4. P. 34–38.

16. Pegel T.V. Evolution of trilobite biofacies in Cambrian basins of the Siberian Platform // Journal of Paleontology. 2000. Vol. 74. Iss. 6. P. 1000–1019.

17. Ситников В.С., Жерновский В.П. О вероятном наличии потенциальных зон нефтегазонакопления на востоке Алданской антеклизы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2011. № 3. С. 11–18.

18. Старосельцев В.С., Шишкин Б.Б. Обстановки накопления углеродистых пород кембрия Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5-6. С. 787–796.

19. Хант Дж. Геохимия и геология нефти / пер. с англ. М.: Мир, 1982. 692 с.

20. Баженова Т.К. Учение о нефтегазоматеринских свитах как основа теории нефтегазообразования (онтологический, филогенетический и онтогенетический аспекты) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12. №. 1. С. 1–20. https://doi.org/10.17353/2070-5379/10_2017

**References**

1. Archegov VB. Domanikoid formations of Siberian platform – kuonamskaya bituminous carbonate-shaleformation. *Zapiski Gornogo instituta* = Journal of Mining Institute. 2011;194:53–59. (In Russ.)

2. Bessmertnyi SF. Structural features of the Anabar-Sinsky reef buidling system within the Sredne-Markhinsky diamondiferous region according to medium-scale seismic exploration. In: *Geologiya almazov – nastoyashchee i budushchee* = Diamond geology: present and future. Voronezh: Voronezh State University; 2005. p.241–246. (In Russ.)

3. Kazanskii YuP. Sedimentation Environment and its Evolution. Moscow: Nauka; 1984. 253 p. (In Russ.)

4. Pisarchik YaK, Minaeva MA, Rusetskaya GA. Paleogeographic characteristics of the Siberian platform in the Cambrian period. In: *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' vostochnoi chasti Sibirskoi platformy i prilegayushchikh raionov: materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya po otsenke neftegazonosnosti territorii Yakutii* = Geological structure and oil-and-gas potential of the eastern part of the Siberian platform and adjacent areas: Proceedings of the All-Russian Meeting on Oil-and-gas assessment for Yakutia territory. Moscow: Nedra; 1968. p.81–90. (In Russ.)

5. Astashkin VA. *Geology and Oil-and-gas potential of the Cambrian Reef Systems of the Siberian Platform*. Moscow: Nedra; 1984. 185 p. (In Russ.)

6. Grachevskii MM, Berlin YuM, Dubovskoi IT, Ul'mishek GF. *Correlation of different facies series in exploration for oil and gas*. Moscow: Nedra; 1969. 296 p. (In Russ.)

7. Sitnikov VS, Alekseev NN, Pavlova KA, Pogodaev AV, Sleptsova MI. Newest forecast and data updating of Vilyuy syneclise (Eastern Siberia) petroleum objects. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2017;12(1):1–20. (In Russ.) https://doi.org/10.17353/2070-5379/9_2017

8. Sitnikov VS, Kushmar IA., Prishchepa OM, Pogodaev AV. On the possible discovery of new oil-bearing region in the south of Vilyuy syneclise (Siberian Platform). *Geologiya nefti i gaza* = Russian Oil and Gas Geology. 2013;4:2–12. (In Russ.)

9. Tuchkov II, Andrianov VN, Gornshtein DK, Kiselev AE, Semenov GT, Ushakov AI, et al. Development history and paleogeographic conditions for the accumulation of oil and gas deposits on the territory of Yakutia. In: *Geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost' vostochnoi chasti Sibirskoi platformy i prilegayushchikh raionov: materialy Vsesoyuznogo soveshchaniya po otsenke neftegazonosnosti territorii Yakutii* = Geological structure and oil-and-gas potential of the Siberian platform east and adjacent areas: Proceedings of the All-Union Meeting on the Assessment of Oil-and-gas Potential of Yakutia. Moscow: Nedra; 1968. p.25–41. (In Russ.)

10. Mel'nikov NV. *Vendian-Cambrian saliferous basin of the Siberian platform (stratigraphy, development history)*. Novosibirsk: Siberian Research Institute of Geology, Geophysics, and Mineral Resources; 2018. 177 p. (In Russ.)

11. Sukhov SS, Fomin AM, Moiseev SA. Paleogeography as investigation tool of Cambrian reefs in the eastern part of the North-Tungusk petroleum area. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2018;13(3):1–26. https://doi.org/10.17353/2070-5379/28_2018

12. Filiptsov YuA, Melnikov NV, Efimov AS, Valchak VI, Goryunov NA, Evgrafov AA, et al. Lower-middle Cambrian reef barrier in the northern Siberian Platform as a target of primary exploration for oil and gas. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* = Geology and mineral resources of Siberia. 2014;2:25–35. (In Russ.)

13. Aksenov AA, Novikov AA. *Prediction, exploration and survey of buried oil-and-gas structures*. Moscow: Nedra; 1983. 161 p. (In Russ.)

14. Mamaeva AV, Makhnach EN. Processing and interpretation technique of magnetotelluric sounding during the study of reefogenic buildup within the eastern limit of Kurei sineclise. *Interekspo GEO-Sibir'* = Interexpo GEO-Siberia. 2016;2(2):73–77. (In Russ.)

15. Unsworth M. New developments in conventional hydrocarbon exploration with electromagnetic methods. *CSEG Recorder*. 2005;30(4):34–38.

16. Pegel TV. Evolution of trilobite biofacies in Cambrian basins of the Siberian Platform. *Journal of Paleontology*. 2000;74(6):1000–1019.

17. Sitnikov VS, Zhernovskiy VP. On the possible occurrence of oil-and-gas accumulation potential zones in the eastern Aldan anteclise. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* = Geology and mineral resources of Siberia. 2011;3:11–18. (In Russ.)

18. Starosel'tsev VS, Shishkin BB. Environmental conditions of accumulation of Cambrian carbonaceous rocks in the Siberian Platform. *Geologiya i geofizika*. 2014;55(5-6):787–796. (In Russ.)

19. Hunt MJ. Petroleum geochemistry and geology; 1982. 629 p. (Russ. ed.: *Geokhimiya i geologiya nefti*. Moscow: Mir; 1982. 692 p.)

20. Bazhenova TK. Study of petroleum source formations as a basis of oil and gas formation concept: ontological, philogenetical and ontogenetical aspects. *Petroleum Geology – Theoretical and Applied Studies*. 2017;12(1):1–20. (In Russ.) https://doi.org/10.17353/2070-5379/10_2017

### Критерии авторства / Authorship criteria

Кравченко А.А, Пашевин А.М., Лаврентьева А.Е. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Anastasia A. Kravchenko, Alexander M. Pashevin, Alla E. Lavrenteva 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

### Сведения об авторах / Information about the authors

**Кравченко Анастасия Анатольевна,**
аспирант,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
геофизик второй категории,
Обособленное подразделение АО «Росгеология»
«Иркутское геофизическое подразделение»,
664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а, Россия,
✉ e-mail: KravchenkoAA@rusgeology.ru
**Anastasia A. Kravchenko,**
Postgraduate,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
Geophysicist, 2nd category,
“Irkutsk Geophysical Division”, JSC "Rosgeologia",
9a Klary Tsetkin St., Irkutsk 664039, Russia,
✉ e-mail: KravchenkoAA@rusgeology.ru

**Пашевин Александр Михайлович,**
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий геофизик,
Обособленное подразделение АО «Росгеология»
«Иркутское геофизическое подразделение»,
664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а, Россия,
e-mail: PashevinAM@rusgeology.ru
**Alexander M. Pashevin,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Leading Geophysicist,
“Irkutsk Geophysical Division”, JSC "Rosgeologia",
9a Klary Tsetkin St., Irkutsk 664039, Russia,
e-mail: PashevinAM@rusgeology.ru

**Лаврентьева Алла Ефимовна,**
геофизик первой категории,
Обособленное подразделение АО «Росгеология»
«Иркутское геофизическое подразделение»,
664039, г. Иркутск, ул. Клары Цеткин, 9а, Россия,
e-mail: LavrentevaAE@rusgeology.ru
**Alla E. Lavrenteva,**
Geophysicist, 1st category,
“Irkutsk Geophysical Division”, JSC "Rosgeologia",
9a, Klary Tsetkin St., Irkutsk, 664039, Russia,
e-mail: LavrentevaAE@rusgeology.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 550.8.05**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-220-229**

# Разделение коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения на литотипы с использованием материалов геофизических исследований скважин

**© П.Н. Кокарев[a], И.А. Диких[b]**
[a,b]Филиал «Газпром недра НТЦ» ООО «Газпром недра», г. Тюмень, Россия

***Резюме:*** Целью данного исследования являлось изучение неоднородности состава, строения и фильтрационно-емкостных свойств песчаников парфеновского горизонта чорской свиты венда Ковыктинского газоконденсатного месторождения. Был выполнен анализ поведения кривых геофизических исследований скважин и дифференциальных распределений геофизических параметров (двойных разностных параметров гамма-каротажа и нейтронного каротажа) в интервале парфеновского горизонта. Выполнено сопоставление дифференциальных распределений геофизических параметров до и после деления коллекторов парфеновского горизонта на литотипы. В результате анализа данных каротажа и геофизических параметров, полученных на их основе, удалось установить наличие трех литотипов песчаников-коллекторов в разрезе парфеновского горизонта. Выполнено обоснование количественных критериев разделения песчаников-коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения на литотипы по материалам геофизических исследований скважин. Определены направления дальнейшего изучения особенностей строения коллекторов парфеновского горизонта. Сделаны выводы о наличии в парфеновском горизонте коллекторов с улучшенными и ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами. Наличие различных по свойствам и составу коллекторов в отложениях парфеновского горизонта выявило необходимость в пересмотре петрофизической модели и методического обеспечения комплексной интерпретации материалов геофизических исследований скважин, представленных при пересчете запасов углеводородов Ковыктинского газоконденсатного месторождения в 2013 году.

***Ключевые слова:*** парфеновский горизонт, коллектор, геофизические исследования скважин, геофизические параметры

***Информация о статье:*** Дата поступления 16 декабря 2019 г.; дата принятия к печати 18 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Кокарев П.Н., Диких И.А. Разделение коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения на литотипы с использованием материалов геофизических исследований скважин. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 220–229. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-220-229

# Division of the Parfenovsky horizon reservoirs in the Kovykta field into lithotypes using the well survey data

**© Pavel N. Kokarev[a], Ivan A. Dikih[b]**
[a,b]Branch “Gazprom nedra NTC” of LLC “Gazprom nedra”, Tyumen, Russia

***Abstract:*** The purpose of the work is to study the heterogeneity of the composition, structure, and filtration-capacity properties of the sandstones in the Parfenovsky horizon of the Chora formation, the Kovykta gas condensate field. An analysis of the behavior of the well geophysical survey curves and differential distributions of the geophysical parameters (double difference parameters of the gamma-ray logging and neutron logging) in the Parfenovsky horizon interval has been conducted. The differential distributions of the geophysical parameters before and after dividing the reservoirs of the Parfenovsky horizon into lithotypes have been compared. The analysis of the logging data and the geophysical parameters obtained based on the above has made it possible to identify three lithotypes of the sandstone reservoirs in the Parfenovsky horizon section. Based on the well survey data, quantitative criteria for dividing the sandstone reservoirs of the Parfenovsky horizon into lithotypes have been substantiated. Directions for the further studies of the structure of the reservoirs in the Parfenovsky horizon have been determined. The study

has concluded that there are reservoirs with improved and degraded filtration-capacity properties in the Parfenovsky horizon. The presence of reservoirs with different properties and composition in the deposits of the Parfenovsky horizon shows that it is necessary to revise the petrophysical model and methodological support for the complex interpretation of the well geophysical survey data used in the recalculation of the hydrocarbon reserves of the Kovykta gas condensate field in 2013.

***Keywords:*** Parfenovsky horizon, reservoir, well geophysical survey, geophysical parameters

***Information about the article:*** Received December 16, 2019; accepted for publication May 18, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Kokarev PN, Dikih IA. Division of the Parfenovsky horizon reservoirs in the Kovykta field into lithotypes using the well survey data. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):220–229. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-220-229

## Введение

Анализ геолого-геофизических материалов (результатов испытаний, геофизических исследований скважин (ГИС), исследований керна) указывает на неоднородность песчаников парфеновского горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ). Дифференциация коллекторов парфеновского горизонта по фильтрационным и емкостным свойствам отмечается как по площади, так и по разрезу. Неоднородность строения, свойств и состава парфеновского горизонта не раз была отмечена рядом исследователей [1–6].

В 2013 г. был выполнен пересчет запасов углеводородов в залежах парфеновского горизонта Ковыктинского ГКМ и Хандинского лицензионного участка, в котором для продуктивных пластов $П_1$ и $П_2$ была принята петрофизическая модель, не учитывающая наличие различных по составу и свойствам песчаников в отложениях парфеновского горизонта.

В соответствии с методическими рекомендациями[1], если по результатам анализа геолого-геофизической информации в пределах выделенного объекта подсчета запасов выделяются коллекторы различных литотипов, петрофизические связи должны строиться раздельно для каждого литотипа.

Большой объем накопленных данных в совокупности с требованиями методических рекомендаций указывает на необходимость в пересмотре петрофизического обеспечения и методики комплексной интерпретации материалов ГИС.

В настоящей статье в первом приближении выполнено деление коллекторов парфеновского горизонта на литотипы. Деление на литотипы проведено с использованием каротажных данных. В дальнейшем количество литотипов песчаников в разрезе парфеновского горизонта и их границы будут уточнены с привлечением результатов лабораторных исследований керна.

## Объект и методы исследования

На Ковыктинском ГКМ продуктивны отложения парфеновского горизонта чорской свиты венда. Парфеновский горизонт представлен переслаиванием песчаников и алевролитов с прослоями аргиллитов. Это огромное (площадью более 7000 км$^2$) геологическое тело, которое фациально замещается в юго-восточном и северо-западном направлениях на более глинистые разности. В разрезе горизонта выделяется два продуктивных пласта $П_1$ и $П_2$, которые разделены пачкой аргиллитов толщиной от первых метров до 10–15 м [7].

Формирование парфеновского горизонта происходило в трансгрессивно-регрессивных условиях осадконакопления. Для пластов парфеновского горизонта диагностированы субконтинентальные и прибрежно-морские обстановки седиментации пород [6, 8]. Это и явилось первопричиной существенных

[1] Методические рекомендации по подсчету геологических запасов нефти и газа объемным методом / ред. В.И. Петерсилье, В.И. Пороскун, Г.Г. Яценко. М. – Тверь: Изд-во ВНИГНИ, НПЦ «Тверьгеофизика», 2003. 260 с.

различий в строении, составе и свойствах парфеновского горизонта на территории Ангаро-Ленской ступени [1].

Изучение отложений парфеновского горизонта при помощи площадных видов геофизических исследований, а также бурение и испытание скважин сопряжено с рядом трудностей, среди которых сильно расчлененный современный рельеф (перепады высот достигают 850 м), наличие интервалов поглощений, зон аномально высоких пластовых давлений и рапопроявлений, зон литологического замещения пластов-коллекторов непроницаемыми породами [9–15].

Остановимся на одной из проблем, с которой авторы столкнулись при анализе материалов испытания пластов $П_1$ и $П_2$ в скважинах Ковыктинского ГКМ. В ряде скважин отмечено отсутствие притока углеводородов из пласта $П_2$ при испытании в открытом стволе или в колонне при достаточно большой суммарной газонасыщенной толщине пород-коллекторов.

По результатам анализа керна установлено, что пласт $П_2$ зачастую представлен коллекторами двух типов – с улучшенными и ухудшенными фильтрационными свойствами. Песчаники-коллекторы, залегающие в кровельной части пласта $П_2$ (литотип ЛИТ 2), обладают повышенными значениями коэффициента проницаемости $К_{пр}$ около 10 мД и выше. Песчаники-коллекторы, залегающие в подошвенной части пласта $П_2$ (литотип ЛИТ 3), характеризуются пониженными значениями $К_{пр}$ преимущественно в диапазоне от 0,1 до 5 мД.

При испытании пласта $П_2$ не работает либо весь пласт целиком, либо его подошвенная часть в зависимости от того, какую часть пласта охватывает ухудшенный по фильтрационным свойствам литотип ЛИТ 3.

Песчаники парфеновского горизонта всего фонда разведочных, поисково-оценочных и параметрических скважин Ковыктинского ГКМ были разделены на четыре литотипа по материалам ГИС. Три литотипа из четырех относятся к песчаникам-коллекторам, а один – к песчаникам-неколлекторам.

К песчаникам-неколлекторам отнесены все песчаники, которые характеризуются пониженными значениями интервального времени пробега продольной волны по данным акустического каротажа (АК) и повышенными значениями объемной плотности пород по данным плотностного гамма-гамма-каротажа (ГГК-П). Однако показания методов гамма-каротажа (ГК) и нейтронного каротажа (НК) в таких песчаниках существенно разнятся от скважины к скважине. Это, вероятно, обусловлено наличием двух типов песчаников, а именно заглинизированных песчаников и песчаников с карбонатным и регенерационно-кварцевым типами цемента. В данной статье песчаники-неколлекторы и вопросы, касающиеся их деления на литотипы, не рассматривались. Объектом изучения и дальнейшего рассмотрения данной работы являются песчаники-коллекторы.

Первый (при рассмотрении сверху вниз по разрезу) литотип песчаников-коллекторов (ЛИТ 1) приурочен к пласту $П_1$ и характеризуется пониженными значениями ГК и повышенными значениями НК. Второй литотип песчаников-коллекторов ЛИТ 2 по фильтрационно-емкостным свойствам и характеристикам ГИС (пониженные значения ГК, средние и повышенные значения НК) схож с литотипом ЛИТ 1, но относится к пласту $П_2$, охватывая его кровельную часть. Третий литотип песчаников-коллекторов ЛИТ 3 залегает в подошвенной части пласта или охватывает весь пласт целиком (скважины Квт-30, Квт-31, Квт-63, Квт-66). На кривых ГИС литотип ЛИТ 3 отмечается повышенными показаниями ГК, средними и пониженными показаниями НК.

Увеличение показаний ГК и уменьшение показаний НК с глубиной свидетельствуют об изменении состава породообразующих и цементирующих минералов, а также об увеличении глинистости от кровли к подошве парфеновского горизонта.

## Результаты исследования и их обсуждение

Представленная выше градация отложений парфеновского горизонта по литотипам была выполнена на качественном уровне на основе материалов ГК, НК и величины проницаемости, замеренной на керне.

Для оценки правомерности выполненного деления песчаников на литотипы был проведен статистический анализ геофизических параметров для коллекторов парфеновского горизонта в целом и по каждому из литотипов в отдельности. Для этого построены дифференциальные и интегральные распределения двойного разностного параметра ГК *dJгк* и двойного разностного параметра НК *dJнк*, определенных по материалам ГИС в интервалах коллекторов парфеновского горизонта.

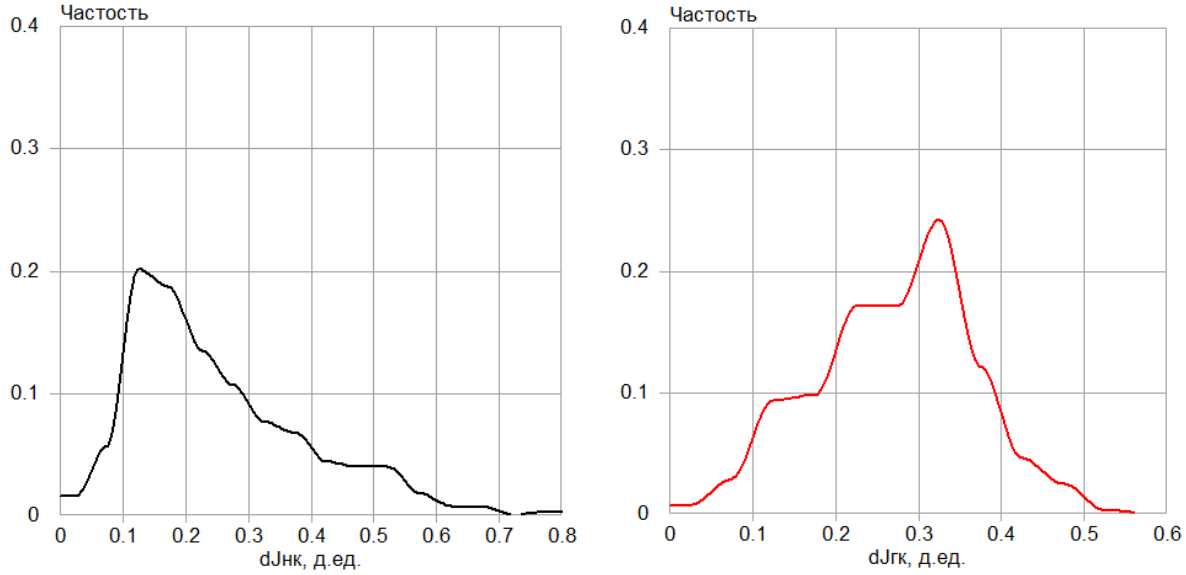
Рассмотрим дифференциальные распределения параметров *dJгк* и *dJнк*, построенные для всех коллекторов парфеновского горизонта в целом (рис. 1).

На дифференциальном распределении параметра *dJнк* (см. рис. 1, *a*), построенном для всех коллекторов парфеновского горизонта, присутствуют явные признаки наличия существенной неоднородности в песчаниках горизонта.

При построении единой гистограммы параметра *dJгк* для всех коллекторов парфеновского горизонта, как и в случае с распределением *dJнк*, было получено одномодальное дифференциальное распределение (см. рис. 1, *b*), однако оно осложнено двумя ярко выраженными и значимыми по величине ступенями. Это свидетельствует о неоднородности коллекторов парфеновского горизонта и наличии как минимум трех различающихся по свойствам песчаников-коллекторов. Установленный факт значительной неоднородности парфеновского горизонта указывает на возможность разделения коллекторов на литотипы.

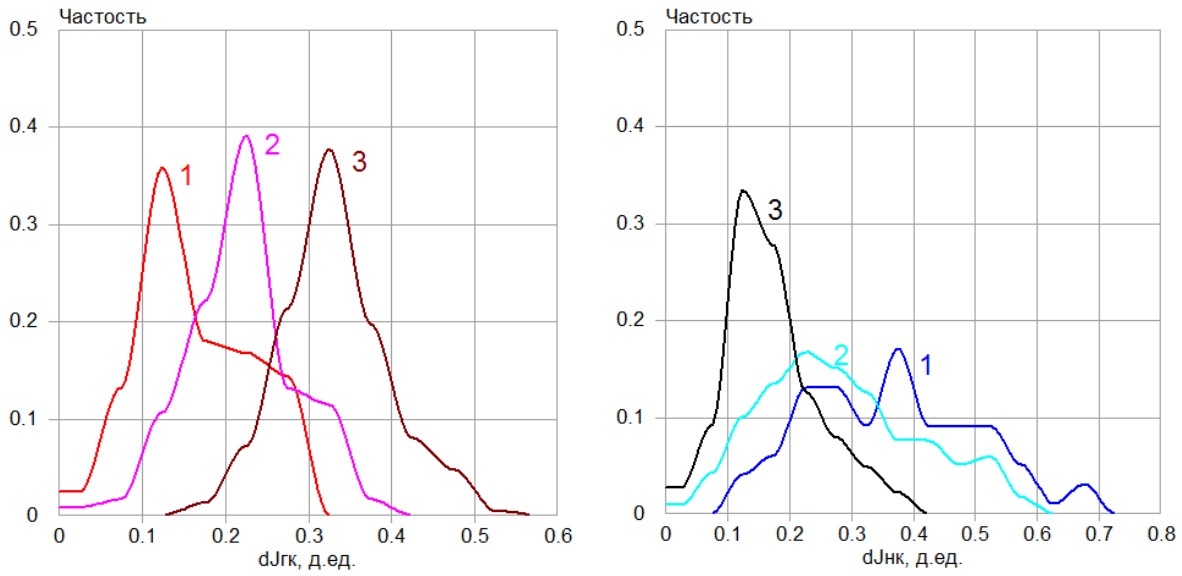
В соответствии с выполненным делением коллекторов парфеновского горизонта на три литотипа для каждого литотипа были построены индивидуальные дифференциальные распределения *dJгк* и *dJнк* (рис. 2).

Из рис. 2, *a* видно, что дифференциальное распределение параметра *dJгк* для каждого из трех литотипов коллекторов парфеновского горизонта обладает собственным модальным значением.




*a* *b*

***Рис. 1. Дифференциальные распределения двойных разностных параметров нейтронного каротажа dJнк (a) и гамма-каротажа dJгк (b) для всех коллекторов парфеновского горизонта***
***Fig. 1. Differential distribution of the double difference parameters of the neutron logging dJнк (a) and gamma-logging dJгк (b) for all reservoirs of the Parfenovsky horizon***




*a* *b*

***Рис. 2. Дифференциальные распределения двойных разностных параметров нейтронного каротажа dJнк (a) и гамма-каротажа dJгк (b) для трех литотипов коллекторов парфеновского горизонта:***
*1 – литотип ЛИТ 1; 2 – литотип ЛИТ 2; 3 – литотип ЛИТ 3*
***Fig. 2. Differential distribution of the double difference parameters of the neutron logging dJнк (a) and gamma-logging dJгк (b) for three lithotypes of reservoirs of the Parfenovsky horizon:***
*1 – lithotype LIT 1; 2 – lithotype LIT 2; 3 – lithotype LIT 3*

Преобладающими значениями параметра *dJгк* для песчаников литотипа ЛИТ 1 являются значения в диапазоне 0,1–0,15 д.ед., литотипа ЛИТ 2 – 0,15–0,25 д.ед., литотипа ЛИТ 3 – 0,25–0,4 д.ед. Наибольшими отличиями по показаниям ГК характеризуются коллекторы литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 3. Литотип ЛИТ 2 занимает промежуточное положение по показаниям ГК между литотипами ЛИТ 1 и ЛИТ 3, имея при этом более близкую и схожую характеристику с песчаниками пласта $П_1$.

На рис. 2, *b* мы наблюдаем отчетливую дифференциацию литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 3 по параметру *dJгк*. Преобладающим диапазоном изменения параметра *dJнк* для песчаников литотипа ЛИТ 1 являются значения от 0,2 до 0,55 д.ед., литотипа ЛИТ 3 – от 0,1 до 0,2 д.ед. Как и в случае с параметром *dJгк*, из рис. 2, *b* мы видим, что по параметру *dJнк* песчаники литотипа ЛИТ 2 также занимают промежуточное положение между песчаниками литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 3. По форме распределения и диапазону изменения параметра *dJнк* песчаники литотипа ЛИТ 2 близки к аналогичным характеристикам песчаников литотипа ЛИТ 1.

Существенных различий между коллекторами литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 2 парфеновского горизонта не выявлено, хотя каждый из литотипов, вероятнее всего, обладает своими особенностями гранулометрического и минералогического состава. Это предстоит выяснить при дальнейшем детальном анализе результатов лабораторных исследований керна. На данном этапе анализа геолого-геофизических данных для этих двух литотипов (ЛИТ 1 и ЛИТ 2) характерны пониженные показания ГК, средние и повышенные показания НК, повышенные фильтрационные свойства ($К_{пр}$) по данным анализа керна.

Выполненный анализ дифференциальных распределений параметров *dJгк* и *dJнк* позволяет провести обоснование количественных критериев разделения коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского ГКМ на литотипы. Для это построим интегральные распределения параметров *dJгк* и *dJнк* (рис. 3).

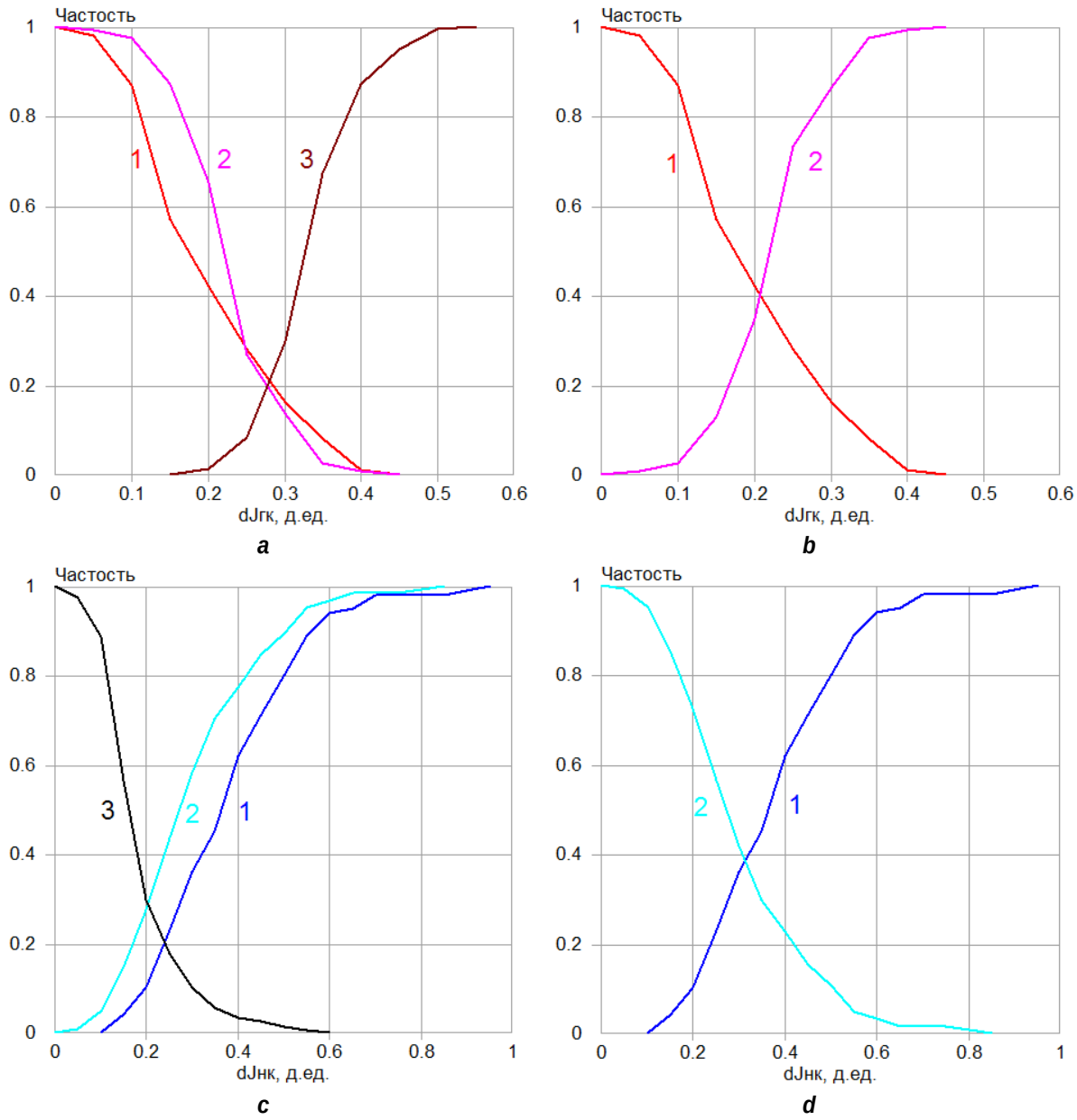



***Рис. 3. Интегральные распределения двойных разностных параметров гамма-каротажа dJгк (a, b) и нейтронного каротажа dJнк (c, d) для обоснования разделения коллекторов парфеновского горизонта на литотипы:***
*1 – литотип ЛИТ 1; 2 – литотип ЛИТ 2; 3 – литотип ЛИТ 3*
***Fig. 3. Integral distribution of the double difference parameters of gamma-logging dJгк (a, b) and neutron logging dJнк (c, d) as substantiation of the division of the Parfenovsky horizon reservoirs into lithotypes:***
*1 – lithotype LIT 1; 2 – lithotype LIT 2; 3 – lithotype LIT 3*

В результате построения интегральных распределений параметров *dJгк* и *dJнк* установлены следующие количественные критерии разделения песчаников парфеновского горизонта на литотипы (*dJгк_гр* и *dJнк_гр*):

1. По параметру *dJгк*:

– для разделения литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 2 *dJгк_гр* = 0,21 д.ед.;

– для разделения литотипов ЛИТ 1 (ЛИТ 2) и ЛИТ 3 *dJгк_гр* ~ 0,28 д.ед.

2. По параметру *dJнк*:

– для разделения литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 2 *dJнк_гр* = 0,31 д.ед.;

– для разделения литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 3 *dJнк_гр* = 0,24 д.ед.;

– для разделения литотипов ЛИТ 2 и ЛИТ 3 *dJнк_гр* = 0,20 д.ед.

Наиболее надежно (достоверность ~ 80 %) решаемой является задача разделения коллекторов литотипов ЛИТ 1 (ЛИТ 2) и ЛИТ 3 по данным ГК с использованием параметра *dJгк_гр* ~ 0,28 д.ед., а также разделения коллекторов литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 3 по данным НК с использованием *dJнк_гр* = 0,24 д.ед.

Чуть менее надежно (достоверность ~ 70 %) решается задача разделения коллекторов литотипов ЛИТ 2 и ЛИТ 3 с использованием *dJнк_гр* = 0,2 д.ед.

Еще чуть менее уверенное (достоверность ~ 60 %) решение имеет задача по разделению коллекторов литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 2 с использованием параметра *dJгк_гр* = 0,21 д.ед. и параметра *dJнк_гр* = 0,31 д.ед.

По результатам проведенного анализа материалов ГИС и параметров, рассчитанных на их основе, в интервале коллекторов парфеновского горизонта необходимо отметить следующее:

– анализ дифференциальных распределений *dJгк* и *dJнк* (см. рис. 2) позволил подтвердить правомерность деления коллекторов на три литотипа;

– анализ интегральных распределений *dJгк* и *dJнк* (см. рис. 3) позволил определить количественные критерии и достоверность деления коллекторов на литотипы;

– анализ дифференциальных и интегральных распределений *dJгк* и *dJнк* подтверждает правомерность деления коллекторов парфеновского горизонта Ковыктинского ГКМ на три литотипа песчаников, так как по каждому литотипу обособляется одномодальное распределение значений *dJгк*; наиболее низкими показаниями ГК обладает литотип ЛИТ 1, наиболее высокими – литотип ЛИТ 3;

– учитывая полученные дифференциальные распределения параметров *dJгк* (см. рис. 2, *a*) и *dJнк* (см. рис. 2, *b*), их плавное изменение от литотипа ЛИТ 1 через литотип ЛИТ 2 к литотипу ЛИТ 3, сложную форму распределений, отсутствие пласта $П_1$ на обширной территории месторождения, наличие регенерационно-кварцевого цемента, наличие карбонатизации в пласте $П_1$, следов пиритизации в подошвенной части пласта $П_2$, а также значительную изменчивость глинистой перемычки как между пластами $П_1$ и $П_2$, так и внутри пласта $П_2$, можно сделать вывод о том, что формирование отложений парфеновского горизонта происходило при неоднократной смене морских, прибрежно-морских и аллювиально-дельтовых условий осадконакопления, а также о том, что наряду с седиментационными факторами существенное влияние на формирование этих коллекторов оказали постседиментационные процессы.

Направлениями дальнейшего изучения строения коллекторов парфеновского горизонта должны быть:

– углубленный анализ результатов лабораторных исследований керна с целью выявления особенностей гранулометрического и литолого-минералогического состава песчаников-коллекторов (выявление литотипов коллекторов по данным анализа керна);

– разработка комплексного геофизического параметра, который позволит повысить достоверность разделения коллекторов на литотипы;

– разработка новой петрофизической основы комплексной интерпретации материалов ГИС с учетом выявленных литотипов коллекторов и зональности их распространения по площади месторождения.

Значимость и актуальность дальнейшего изучения парфеновского горизонта заключается в повышении достоверности оценки запасов углеводородов Ковыктинского ГКМ за счет учета особенностей литологического строения сложнопостроенных коллекторов по материалам ГИС.

## Заключение

На основе проведенного исследования можно говорить о том, что анализ каротажных и керновых данных в интервале отложений парфеновского горизонта позволил выделить четыре литотипа

песчаников. Три литотипа из четырех относятся к песчаникам-коллекторам, а один – к песчаникам-неколлекторам.

Авторами выполнено обоснование правомерности деления и количественных критериев разделения коллекторов на три литотипа. Наиболее достоверным является разделение литотипов ЛИТ 1 (ЛИТ 2) и ЛИТ 3 по данным ГК с использованием двойного разностного параметра *dJгк*, а также литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 3 по данным НК с использованием двойного разностного параметра *dJнк*. Сложный вид, а именно наличие значимых ступеней в правой части одномодальных распределений параметра *dJгк* для литотипов ЛИТ 1 и ЛИТ 2 свидетельствует о возможном наличии еще нескольких литотипов песчаников в разрезе парфеновского горизонта, а также о необходимости его дальнейшего детального изучения. Выделенные в первом приближении по материалам ГИС литотипы, их границы, а также выявленные критерии деления коллекторов парфеновского горизонта на литотипы в дальнейшем должны быть уточнены по данным исследования керна. Повышение достоверности деления коллекторов парфеновского горизонта на литотипы может быть достигнуто путем выработки и использования комплексного геофизического параметра на основе данных ГК, НК, АК, ГГК-П.

Также в результате представленного исследования определены направления дальнейшего изучения особенностей строения коллекторов парфеновского горизонта.

**Библиографический список**

1. Скузоватов М.Ю. Критерии оценки перспектив газоносности парфеновского горизонта центральных районов Ангаро-Ленской ступени // Геология нефти и газа. 2014. № 1. С. 101–109.

2. Скузоватов М.Ю. Применение комплекса геолого-геофизических данных при прогнозе газоносности вендского терригенного комплекса Ангаро-Ленской зоны газонакопления // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2015. № 6. С. 26–33.

3. Воробьев В.С. Фильтрационная неоднородность пород-коллекторов парфеновского продуктивного горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2011. № 8. С. 42–47.

4. Ахияров А.В., Орлов В.И., Бондарев А.Н. Зависимость продуктивности терригенных коллекторов от их фациальной принадлежности на примере парфеновского горизонта Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геофизика. 2007. № 6. С. 60–67.

5. Ахияров А.В., Земченков А.С. Пространственно-временной континуум палеогеографических обстановок седиментации терригенных отложений верхнего венда юго-западной части Сибирской платформы (на примере парфеновского продуктивного горизонта Ангаро-Ленской ступени и ботуобинского – Непско-Ботуобинской антеклизы // Современные проблемы седиментологии в нефтегазовом инжиниринге: труды III Всерос. науч.-практ. седиментологич. совещ. Томск: Изд-во ЦППС НД, 2017. С. 149–170.

6. Пушкарева М.М., Хабаров Е.М., Варакина И.В. Литологическая характеристика парфеновского и ботуобинского продуктивных горизонтов венда Ангаро-Ленской ступени и Непско-Ботуобинской антеклизы // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 78–83.

7. Смирнов А.С., Горлов И.В., Яицкий Н.Н., Горский О.М., Игнатьев С.Ф., Поспеев А.В. [и др.]. Интеграция геолого-геофизических данных – путь к созданию достоверной модели Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология нефти и газа. 2016. № 2. С. 56–66.

8. Афонин И.В. Условия формирования парфеновского горизонта Ковыктинского месторождения (Восточная Сибирь) // Геология в развивающемся мире: сб. науч. тр. (по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых). В 2 т. Т. 1. Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2017. С. 55–56.

9. Дробот Д.И., Пак В.А., Девятилов Н.М., Хохлов Г.А., Карпышев А.В., Бердников И.Н. Нефтегазоносность докембрийских отложений Сибирской платформы, перспективы подготовки и освоения их углеводородного потенциала // Геология и геофизика. 2004. № 1. С. 110–120.

10. Барышев С.А., Барышев Л.А. Комплексная интерпретация и моделирование волновых полей на Ковыктинском месторождении // Геология нефти и газа. 2008. № 2. С. 52–58.

11. Вахромеев А.Г., Мышевский Н.В., Хохлов Г.А. Аномально высокие пластовые давления как фактор, осложняющий освоение углеводородных месторождений Восточной Сибири // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии: фундаментальный и прикладной аспекты: материалы Всерос. совещ.

Вып. 5. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2006. С. 98–119.

12. Барышев Л.А., Хохлов Г.А. Комплексная интерпретация данных сейсморазведки и ГИС на основе физико-геологической модели // Технологии сейсморазведки. 2006. № 3. С. 55–60.

13. Скузоватов М.Ю., Мальцева Е.В. Комплексирование данных сейсморазведки, ГИС и петрофизических исследований для оценки перспектив газоносности парфеновского горизонта центральных районов Ангаро-Ленской ступени // Актуальные проблемы геологии нефти и газа Сибири: материалы Всерос. науч. конф. мол. уч. и студ., посвящ. 80-летию акад. А.Э. Конторовича. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2014. С. 122–124.

14. Ильин А.И., Сверкунов С.А., Вахромеев А.Г., Буддо И.В., Мисюркеева Н.В., Агафонов Ю.А. [и др.]. Прогноз горно-геологических условий бурения разведочной скважины на примере Ковыктинского месторождения // Строение литосферы и геодинамика: материалы XXVII Всерос. молодеж. конф. Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2017. С. 107–108.

15. Хабаров Е.М., Пушкарева М.М., Варакcина И.В. Седиментогенез и коллекторские свойства парфеновского продуктивного горизонта венда Ангаро-Ленской ступени // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2014. Т. 2. № 1. С. 195–199.

**References**

1. Skuzovatov MYu. Criteria of evaluating gas-bearing prospects of parphenov horizon of central areas of Angaro-Lena step. *Geologiya nefti i gaza* = Russian Oil and Gas Geology. 2014;1:101–109. (In Russ.)

2. Skuzovatov MYu. Application of geological-geophysical data when predicting gas potential of the vendian terrigene complex of Angara-Lena gas-bearing zone. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* = Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2015;6:26–33. (In Russ.)

3. Vorob'ev VS. Filtration heterogeneity of rock-collectors of parfenovsky producing horizon of Kovyktinsky gas-condensate field. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii* = Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2011;8:42–47. (In Russ.)

4. Akhiyarov AV, Orlov VI, Bondarev AN. Terrigenous reservoirs productivity vs rock mass facial characteristics: parfyonov beds of the Kovykta gas/condensate field case history. *Geofizika* = Russian Geophysics. 2007;6:60–67. (In Russ.)

5. Akhiyarov AV, Zemchenkov AS. Space-time continuum of the sedimentation paleogeographic conditions of the Upper Vendian terrigenous deposits in the south-west part of the Siberian platform: a case study of the Parfenovsky productive horizon of the Angara-Lena stage and Botuobin – Nepo-Botuobin anteclise. In: *Sovremennye problemy sedimentologii v neftegazovom inzhiniringe: trudy III Vserossiiskogo nauchno-prakticheskogo sedimentologicheskogo soveshchaniya* = Current issues of sedimentology in oil and gas engineering: Proceedings of the 3d Russian Scientific and Practical Sedimentological Meeting. Tomsk: Center for Training and Retraining of Oil and Gas Industry Specialists; 2017. p.149–170. (In Russ.)

6. Pushkareva MM, Khabarov EM, Varaksina IV. Lithological characteristic of the Botuobinskiy and Parfenovsky productive Vendian horizons, Angara-Lena step and the Nepo-Botuobin anteclise. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2013;323(1):78–83. (In Russ.)

7. Smirnov AS, Gorlov IV, Yaickiy NN, Gorskii OM, Ignatiev SF, Pospeev AV, et al. Integration of geological and geophysical data is a way to design an accurate model of the Kovykta gas condensate deposit. *Geologiya nefti i gaza* = Russian Oil and Gas Geology. 2016;2:56–66. (In Russ.)

8. Afonin IV. Formation conditions of parfenovsky horizon from the Kovyktinsk deposit (East Siberia). In: *Geologiya v razvivayushchemsya mire* = Geology in the developing world. In 2 vol. Vol. 1. Perm: Perm State National Research University; 2017. p.55–56. (In Russ.)

9. Drobot DI, Pak VA, Devyatilov NM, Khokhlov GA, Karpyshev AV, Berdnikov IN. Oil and gas content of the Precambrian deposits in the Siberian platform, prospects of the preparation and development of their hydrocarbon potential. *Geologiya i geofizika*. 2004;1:110–120. (In Russ.)

10. Baryshev SA, Baryshev LA. Integrated interpretation and wave field modeling in Kovykta field. *Geologiya nefti i gaza* = Russian Oil and Gas Geology. 2008;2:52–58. (In Russ.)

11. Vakhromeev AG, Myshevskii NV, Khokhlov GA. Abnormally high reservoir pressure as a factor complicating the development of hydrocarbon deposits in Eastern Siberia. *Sovremennaya geodinamika i opasnye prirodnye protsessy v Tsentral'noi Azii: fundamental'nyi i prikladnoi aspekty: materialy Vserossiiskogo soveshchaniya* = Modern geodynamics and harardous natural processes in Central Asia: fundamental and applied aspects: Proceedings of the All-Russian Meeting. Iss. 5. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, SB RAS; 2006. p.98–119. (In Russ.)

12. Baryshev LA, Khokhlov GA. Complex interpretation of seismic and GIS data based on the physical-geological model. *Tekhnologii seismorazvedki*. 2006;3:55–60. (In Russ.)

13. Skuzovatov MYu, Mal'tseva EV. Integration of seismic, GIS and petrophysical data to assess the gas content prospects of the Parfenovsky horizon in the central areas of the Angara-Lena stage. In: *Aktual'nye problemy geologii nefti i gaza Sibiri: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh i studentov, posvyashchennoi 80-letiyu*

*akad. A.E. Kontorovicha* = Current issues of oil and gas geology in Siberia: Materials of the All-Russian Scientific Conference of Young Scientists and Students Dedicated to the 80th Anniversary of A.E. Kontorovich. Novosibirsk: Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS; 2014. p.122–124. (In Russ.)

14. Il'in AI, Sverkunov SA, Vakhromeev AG, Buddo IV, Misyurkeeva NV, Agafonov YuA, et al. Forecast of mining and geological conditions for exploration well drilling: a case study of the Kovykta field. *Stroenie litosfery i geodinamika: materialy XXVII Vserossiiskoi molodezhnoi konferentsii* = Structure of the Lithosphere and Geodynamics: Materials of the 27th All-Russian Scientific Youth Conference. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, SB RAS; 2017. p.107–108. (In Russ.)

15. Khabarov EM, Pushkareva MM, Varaksina IV. The sedimentogenesis and reservoir properties of the vendian productive parfenovsky horizon of the Angara-Lena stage. *Interekspo GEO-Sibir'* = Interexpo GEO-Siberia. 2014;2(1):195–199. (In Russ.)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Кокарев П.Н., Диких И.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Pavel N. Kokarev, Ivan A. Dikih 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Кокарев Павел Николаевич,**
начальник,
Центр обработки и интерпретации геофизических
исследований в скважинах, гидродинамических исследований,
Филиал «Газпром недра НТЦ» ООО «Газпром недра»,
625000, г. Тюмень, ул. Герцена, 70, Россия,
✉ e-mail: p.kokarev@nedra.gazprom.ru
**Pavel N. Kokarev,**
Head,
Center for Processing and Interpretation
of Geophysical Studies of Wells and Hydrodynamic Studies,
Branch “Gazprom nedra NTC”, LLC “Gazprom nedra”,
70 Gertsena St., Tyumen 625000, Russia,
✉ e-mail: p.kokarev@nedra.gazprom.ru

**Диких Иван Александрович,**
заместитель начальника отдела петрофизики,
Центр обработки и интерпретации геофизических
исследований в скважинах, гидродинамических исследований,
Филиал «Газпром недра НТЦ» ООО «Газпром недра»,
625000, г. Тюмень, ул. Герцена, 70, Россия,
e-mail: i.dikih@nedra.gazprom.ru
**Ivan A. Dikih,**
Deputy head, Petrophysics Department,
Center for Processing and Interpretation
of Geophysical Studies of Wells and Hydrodynamic Studies,
Branch “Gazprom nedra NTC”, LLC “Gazprom nedra”,
70 Gertsena St., Tyumen 625000, Russia,
e-mail: i.dikih@nedra.gazprom.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 622.24.063**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-230-241**

# Влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистых суспензий

**© Е.В. Аверкина[a], Э.В. Шакирова[b], Л.А. Бутакова[c]**
[a–c]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** Целью данного исследования является оценка влияния реагентов-флокулянтов на реологические и структурно-механические свойства глинистых суспензий, подбор их оптимальной концентрации в составе бурового раствора. В настоящее время промышленностью выпускается огромное количество флокулянтов для буровых растворов, различающихся по свойствам и составу. В большинстве своем флокулянты – водорастворимые полимеры с большой молекулярной массой как природного, так и искусственного происхождения. Основное назначение таких реагентов – разделение твердой и жидкой фаз бурового раствора в процессе его обезвоживания и утилизации. Вместе с тем в глинистых суспензиях эти же реагенты применяются в качестве загустителей. Так как буровые растворы являются сложными системами, отличающимися по компонентному составу, не представляется возможным рекомендовать универсальный флокулянт. В ходе исследования оценка флокулирующей и загущающей способности реагентов проводилась в два этапа. Выявлялась оптимальная концентрация полимера, при которой достигались максимальные значения динамического напряжения сдвига. Проводились сравнительные эксперименты глинистых суспензий с полимерными реагентами. В качестве критерия оценки принимались значения реологических, структурно-механических и фильтрационных свойств раствора. В результате установлено: реагенты BEN-EX, BENTOPLUS и DRB-9 могут применяться для повышения вязкости глинистого раствора при условии, что концентрация добавок BENTOPLUS и DRB-9 не будет превышать 0,2 кг/м$^3$; реагент SPECFLOC A 7950-20 может применяться для повышения вязкости глинистого раствора в концентрации до 0,1 кг/м$^3$, в концентрации 0,2 и 0,3 кг/м$^3$ добавка влияет на буровой раствор преимущественно как флокулянт, снижая статическое напряжение сдвига раствора и увеличивая фильтратоотдачу. Если в процессе бурения буровым раствором с добавкой SPECFLOC № 6919 определяющим параметром является только динамическое напряжение сдвига, то его можно рекомендовать для использования. Во всех остальных случаях необходимо провести дополнительные исследования. Проведенные лабораторные исследования позволяют получить буровые растворы с заданным набором технологических параметров, обеспечивающих высокое качество приготовленных буровых растворов.

***Ключевые слова:*** буровой раствор, флокулянт, глинистая суспензия, реологические свойства

***Информация о статье:*** Дата поступления 27 марта 2020 г.; дата принятия к печати 06 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Бутакова Л.А. Влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистых суспензий. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 230–241. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-230-241

# Influence of flocculant reagents on the parameters of clay suspensions

**© Elena V. Averkina[a], Elvira V. Shakirova[b], Lyubov A. Butakova[c]**
[a–c]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** The purpose of the work is to evaluate the effect of flocculant reagents on the rheological and structural-mechanical properties of clay suspensions, and to select their optimal concentration in the drilling mud. Currently, the industry produces a huge number of drilling mud flocculants that differ in their properties and composition. Most flocculants are water-soluble polymers with a large molecular weight, both of natural and artificial origin. The main purpose of such reagents is to separate the solid and liquid phases of the drilling mud during its dewatering and disposal. However, in clay suspensions, the same reagents are used as thickeners. As drilling fluids are complex systems that differ in their component composition, it is not possible to recommend a universal flocculant. During the study, the analysis of the flocculating and thickening capacity of the reagents was performed in two stages. The study defined an optimal concentration of the polymer at which maximum values of the dynamic shear stress were

reached. The clay suspensions containing polymer reagents were been experimentally compared. The values of the rheological, structural-mechanical and filtration parameters of the solution were used as the evaluation criteria. The study has established the following. The reagents BEN-EX, BENTOPLUS and DRB-9 can be used to increase the viscosity of the clay solution, provided that the concentration of the additives BENTOPLUS and DRB-9 does not exceed 0.2 kg/m$^3$. The SPECFLOC A 7950-20 reagent can be used to increase the viscosity of the clay solution in concentrations up to 0.1 kg/m$^3$, while in concentrations of 0.2 and 0.3 kg/m$^3$, the additive mainly effects the drilling mud as a flocculant, reducing the static shear stress of the solution and increasing the filtrate output. If the dynamic sheer stress is the only diagnostic variable when drilling with the SPECFLOC № 6919 additive, the latter can be recommended for use. In all other cases, additional research is required. The conducted laboratory studies allow us to obtain drilling fluids with a set of technological parameters that ensure high quality of the prepared drilling fluids.

***Keywords:*** drilling mud, flocculant, clay suspension, rheological properties

***Information about the article:*** Received March 27, 2020; accepted for publication May 06, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Averkina EV, Shakirova EV, Butakova LA. Influence of flocculant reagents on the parameters of clay suspensions. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):230–241. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-230-241

## Введение

Для ускорения и улучшения разделения твердой и жидкой фаз бурового раствора применяются природные и синтетические высокомолекулярные вещества, называемые флокулянтами, которые при введении в дисперсные системы адсорбируются или химически связываются с поверхностью частиц дисперсной фазы и объединяют частицы в агломераты (флокулы), способствуя их быстрому осаждению [1, 2]. Вместе с тем эти же реагенты применяют и в качестве загустителей промывочных жидкостей. Из-за разнообразия буровых растворов представлен широкий спектр флокулянтов, обладающих различными составами и техническими характеристиками. Оптимальная марка подбирается в зависимости от свойств очищаемой суспензии, метода очистки и требуемого результата. Количество поступающих в продажу реагентов-флокулянтов с каждым годом увеличивается. Для выбора химреагента, подходящего для данных условий, необходимо провести соответствующие испытания. При этом сначала целесообразно провести лабораторные исследования, чтобы ограничить число марок, подлежащих дальнейшим испытаниям. Выбор методики испытания зависит от производственной постановки задачи.

В учебно-исследовательской лаборатории буровых растворов и крепления скважин Иркутского национального исследовательского технического университета были проведены лабораторные испытания ряда флокулянтов с целью изучения физико-химических процессов взаимодействия высокомолекулярных веществ с глинистыми суспензиями, а также выявления их оптимальной концентрации. В качестве критериев оценивания были приняты значения показателей реологических и фильтрационных свойств. Перечень использованных химических реагентов представлен в табл. 1. Лабораторные исследования реализовывались в помещении с температурой 20±2 °С и относительной влажностью не менее 50 %.

## Материалы и методы исследования

С целью подбора наиболее эффективного в экономическом и технологическом смысле флокулянта для бурового раствора эксперименты осуществлялись по двум методикам.

Ввиду того, что в сопроводительных документах на химреагенты SPECFLOC № 6919 и SPECFLOC A 7950-20 отсутствуют рекомендации по их вводу в буровой раствор, было принято решение добавлять эти реагенты в таком же количестве, как и остальные (см. табл. 1).

На первом этапе приготавливалась бентонитовая суспензия с заданной концентрацией глинопорошка.

**Таблица 1**

**Химические реагенты для сравнительного анализа**

**Table 1**

**Chemical reagents for comparative analysis**

| Наименование реагента | Производитель | Назначение реагента | Рекомендуемая концентрация, кг/м$^3$ |
|---|---|---|---|
| Глинопорошок бентонитовый | ООО «Бентонит Кургана» | Структурообразователь | 50 |
| DRB-9 | – | Селективный флокулянт и добавка к бентониту | 0,5–1,5 |
| BENTOPLUS | Lamberti | Синтетический полимер, добавка к бентониту | 0,1–1 |
| BEN-EX | M-I Drilling Fluids | Модификатор бентонитовой глины | от 0,14 |
| SPECFLOC № 6919 | Группа компаний «ХимАльянс» | Полиакриламид с содержанием основного вещества не менее 90 %, неионогенная серия | – |
| SPECFLOC A 7950-20 | | Полиакриламид с содержанием основного вещества не менее 90 %, анионоактивная серия | – |

Методика приготовления бентонитовой суспензии:

1. Взвесить 100 г бентонитового глинопорошка.

2. В стакан налить 2 л дистиллированной воды и поставить под мешалку.

3. Ввести глинопорошок при включенной мешалке. Продолжать перемешивание до полного растворения глинопорошка.

4. Полученную суспензию разделить на четыре равные части.

5. Образцы раствора 2, 3, 4 обработать исследуемым химреагентом при постоянном перемешивании на лабораторной мешалке в концентрации, указанной в табл. 2.

6. Выдержать образцы раствора при перемешивании на лабораторной мешалке на низких оборотах в течение 2 ч.

7. Замерить реологические параметры полученных образцов раствора (1–4), занести результаты в табл. 2. Для достоверности полученных результатов замер показателей бурового раствора проводился три раза на каждом приготовленном образце раствора. В табл. 2 представлены среднеарифметические значения показателей.

8. Повторить п. 1–7 для каждого химического реагента.

В процессе испытания проводилась оценка структуры, стабильности, чистоты фильтрата бурового раствора, а также отделение воды. Эти сведения необходимы, чтобы при изменении работы флокулянта можно было сделать выводы о причинах такого поведения [3, 4].

Для выявления оптимальной концентрации добавки к бентониту, при которой достигается максимальное значение динамического напряжения сдвига (ДНС) образца раствора, были построены диаграммы зависимости ДНС образца раствора от концентрации химреагента (рис. 1).

По полученным данным установлено, что с увеличением концентрации флокулянтов до 0,3 % наблюдается разделение фаз бурового раствора, исключение составляет буровой раствор с добавкой SPECFLOC № 6919. Об этом говорят повышенные значения показателя фильтрации (см. табл. 2).

**Таблица 2**

**Реологические параметры образцов растворов с разной концентрацией реагентов**

**Table 2**

**Rheological parameters of the solution samples with different reagent concentrations**

| Номер раствора | Состав раствора, кг/м$^3$ | Концентрация реагента, кг/м$^3$ | Реологический параметр | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Угол закручивания при 600 RPM, DR | Угол закручивания при 300 RPM, DR | ПВ, сП | ДНС, дПа |
| 1 | Бентонитовая суспензия | 50 | 31,1 | 23,5 | 7,6 | 76,3 |
| | DRB-9 | 0,1 | 30,7 | 24,1 | 6,6 | 84 |
| | | 0,2 | 37 | 30,4 | 6,6 | 114,2 |
| | | 0,3* | 47,4 | 37,2 | 10,2 | 129,6 |
| 2 | Бентонитовая суспензия | 50 | 30,1 | 22,8 | 7,3 | 74,4 |
| | BENTOPLUS | 0,1 | 34,1 | 26,5 | 7,6 | 90,7 |
| | | 0,2 | 38,6 | 30,3 | 8,3 | 105,6 |
| | | 0,3* | 42,2 | 29,1 | 13,1 | 76,8 |
| 3 | Бентонитовая суспензия | 50 | 31,8 | 24 | 7,8 | 77,8 |
| | BEN-EX | 0,1 | 35,2 | 27,2 | 8 | 92,2 |
| | | 0,2 | 39,1 | 30,9 | 8,2 | 109 |
| | | 0,3 | 43,9 | 34,1 | 9,8 | 116,6 |
| 4 | Бентонитовая суспензия | 50 | 31,6 | 23,6 | 8 | 74,9 |
| | SPECFLOC A 7950-20 | 0,1 | 42,3 | 35,7 | 6,6 | 139,7 |
| | | 0,2* | 67,7 | 58,9 | 8,8 | 240,5 |
| | | 0,3* | 26,8 | 19 | 7,8 | 53,8 |
| 5 | Бентонитовая суспензия | 50 | 29,8 | 22,6 | 7,2 | 73,9 |
| | SPECFLOC № 6919 | 0,1 | 27,8 | 25,5 | 2,3 | 111,4 |
| | | 0,2 | 32,7 | 28,9 | 3,8 | 120,5 |
| | | 0,3 | 49,3 | 41,6 | 7,7 | 162,7 |

*Примечание.* *****У растворов в выбранных концентрациях наблюдалось разделение суспензии на две фазы – флокуляция. 600, 300 RPM – скорость вращения; ПВ – пластическая вязкость; ДНС – динамическое напряжение сдвига.

*Note.* *****Solutions in the selected concentrations are characterized by the suspension separation into two phases, flocculation. 600, 300 RPM – rotation speed; ПВ – plastic viscosity; ДНС – dynamic shear stress.

Установлено, что при концентрациях 0,1 и 0,2 % наблюдается рост значений структурной вязкости раствора. Можно предположить, что именно в этом диапазоне концентраций образуются наиболее прочные системы [5–7].

Из полученных результатов (см. рис. 1) видно, что значение параметра ДНС максимально у реагента SPECFLOC A 7950-20 в концентрации 0,2 кг/м$^3$, но при такой насыщенности раствор разделялся на фазы, что может сказаться и на других параметрах промывочной жидкости.

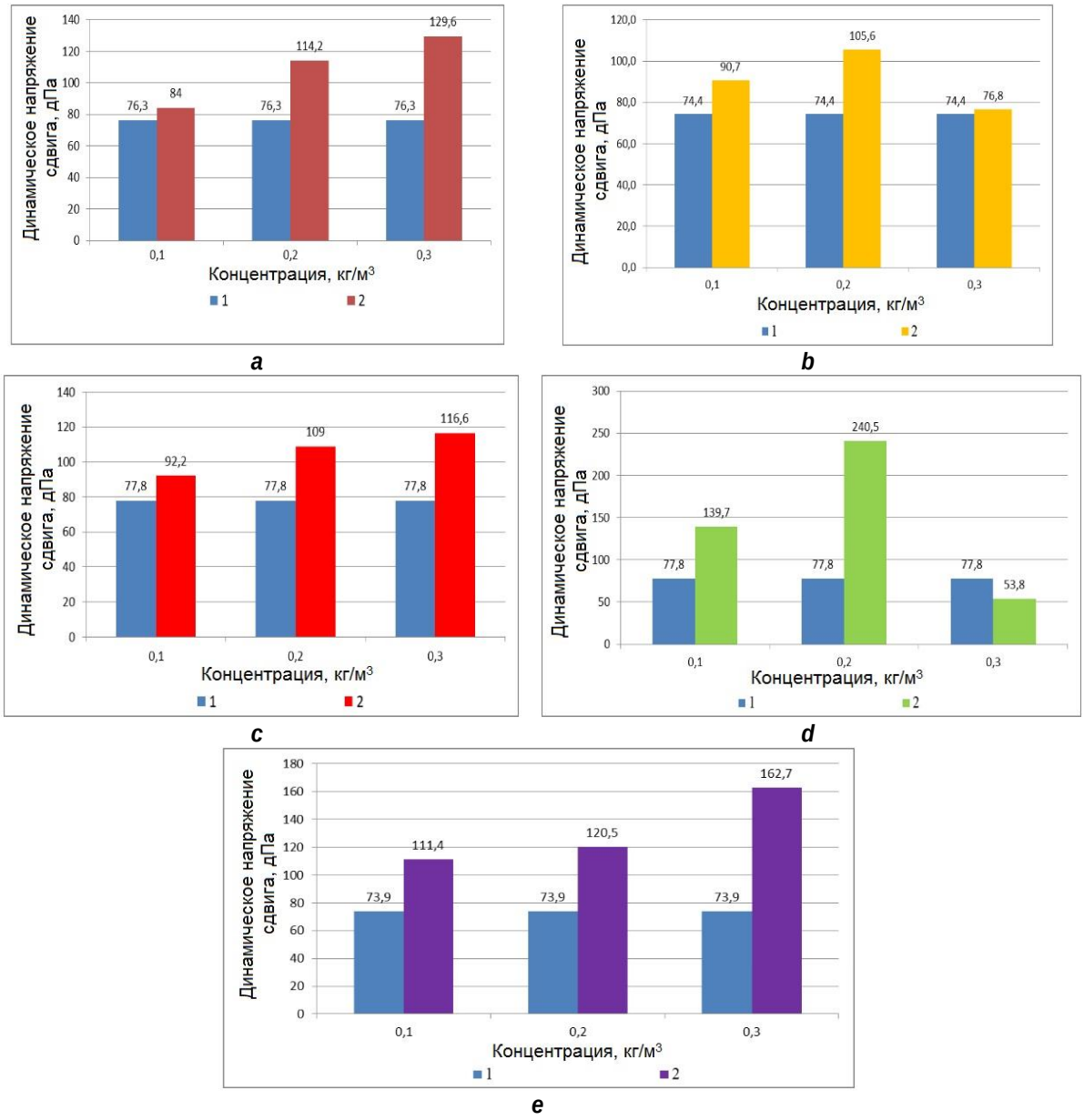



***Рис. 1. Диаграммы зависимости динамического напряжения сдвига от концентрации химреагента в бентонитовой суспензии:***
*a – бентонитовая суспензия (1) с DRB-9 (2); b – бентонитовая суспензия (1) с BENTOPLUS (2); c – бентонитовая суспензия (1) с BEN-EX (2); d – бентонитовая суспензия (1) с SPECFLOC A 7950-20 (2); e – бентонитовая суспензия (1) с SPECFLOC № 6919 (2)*

***Fig. 1. Diagrams of the relationship between the dynamic shear stress and the concentration of the chemical reagent in a bentonite suspension:***
*a – bentonite suspension (1) with DRB-9 (2); b – bentonite suspension (1) with BENTOPLUS (2); c – bentonite suspension (1) with BEN-EX (2); d – bentonite suspension (1) with SPECFLOC A 7950-20 (2); e – bentonite suspension (1) with SPECFLOC № 6919 (2)*

Следовательно, можно сказать, что максимальное значение ДНС имеет раствор с добавкой SPECFLOC № 6919 в концентрации 0,3 кг/м$^3$.

Важными показателями бурового раствора являются показатели прочности геля (статическое напряжение сдвига (СНС)) и несущей способности (ДНС), отвечающие за удержание выбуренных частиц во взвешенном состоянии и очистку скважины от выбуренной породы соответственно [6, 7]. Для изучения эффективности действия флокулянтов в составе бурового раствора на втором этапе

проводился сравнительный анализ буровых растворов с добавлением их различных концентраций. Для этого в соответствии с Временным регламентом на приготовление и обработку бурового раствора при строительстве эксплуатационных скважин в Восточной Сибири был замешен исходный буровой раствор по рецептуре: кальцинированная сода $Na_2CO_3$ – 1,5 кг/м$^3$, бентонитовый глинопорошок – 50 кг/м$^{3.}$ Данный состав промывочной жидкости используется при бурении скважин под направление и кондуктор [8–10].

Последовательность ввода реагентов в бентонитовую суспензию:

1. Подготовить все химреагенты, входящие в состав бурового раствора.

2. Сделать навеску каждого химреагента в соответствии с табл. 1.

3. В мерный стакан набрать 800 см$^3$ дистиллированной воды и поставить под мешалку.

4. Включить мешалку на скорость перемешивания 600 об./мин.

5. Все компоненты раствора вводить в стакан при включенной мешалке. Далее перемешивать при постоянной скорости.

6. Ввести кальцинированную соду $Na_2CO_3$ для удаления ионов $Ca^{2+}$.

7. При интенсивном перемешивании ввести глинопорошок.

8. Продолжить перемешивать до получения однородной суспензии.

9. Полученный раствор разделить на четыре равные части.

10. Образцы раствора 2, 3, 4 обработать исследуемым химреагентом при постоянном перемешивании на лабораторной мешалке в концентрации, указанной в табл. 3.

11. Выдержать образцы раствора при перемешивании на лабораторной мешалке на низких оборотах в течение 2 ч.

12. Замерить параметры полученных образцов раствора (1–4), занести результаты в табл. 3. Для достоверности полученных результатов замер показателей бурового раствора проводился два раза (ввиду ограниченного срока проведения испытаний) на каждом приготовленном образце раствора. В табл. 3 представлены среднеарифметические значения показателей.

По полученным результатам построены диаграммы зависимости параметров промывочной жидкости от концентрации добавок в бентонитовую суспензию (рис. 2–5).

По результатам проведенных лабораторных исследований можно сделать определенные заключения:

1. Все предоставленные химреагенты не влияют на плотность и водородный показатель бурового раствора.

2. У реагентов BEN-EX и BENTOPLUS главная функция – улучшение технологических свойств бентонитовой суспензии.

BEN-EX соответствует заявленным в сопроводительных документах свойствам. При его добавлении в различных концентрациях в бентонитовую суспензию повышаются реологические свойства и условная вязкость последней, а также незначительно снижается фильтрация бурового раствора (см. рис. 2–5). В концентрации 0,3 % реагент проявляет незначительные флокулирующие свойства.

BENTOPLUS в концентрации 0,1 и 0,2 кг/м$^3$ улучшает свойства бентонита. При добавлении 0,3 кг/м$^3$ реагента раствор начал расслаиваться, его реологические характеристики снизились, а фильтрация резко повысилась (см. рис. 5). Таким образом, можно предположить, что если реагент будет применяться для улучшения технологических свойств промывочной жидкости, то не рекомендуется превышать концентрацию 0,2 кг/м$^3$.

3. Реагенты SPECFLOC A 7950-20, SPECFLOC № 6919 являются флокулянтами с разными функциональными группами, в то время как DRB-9 – селективный флокулянт. По данным литературных источников селективный флокулянт должен флокулировать выбуренную породу, но не повышать вязкость бентонитового раствора [9, 10]. Результаты

**Таблица 3**

**Влияние реагентов-флокулянтов на свойства бурового раствора**

**Table 3**

**Influence of flocculant reagents on the drilling mud properties**

| Номер раствора | Состав раствора | Концентрация реагента, кг/м$^3$ | Показатель | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $\rho$, г/см$^3$ | УВ$_{700/500}$, с | ПВ, сПз | ДНС, дПа | СНС$_{10/10}$, дПа | $\Phi_{30}$ по API, см$^3$ | $K$, мм | pH |
| 1 | Исходный раствор | – | 1,026 | 26,4 | 6,8 | 87 | 75/127,5 | 20 | 2 | 10,7 |
| | DRB-9 | 0,1 | 1,026 | 29,9 | 5,6 | 116 | 103/149 | 19 | 2 | 10,5 |
| | | 0,2 | 1,026 | 36,4 | 7,9 | 136 | 91/85 | 21,5 | 2 | 10,6 |
| | | 0,3 | 1,026 | 39,3 | 10,6 | 140 | 54,5/52 | 25,5 | 2 | 10,6 |
| 2 | Исходный раствор | – | 1,026 | 27,2 | 6,9 | 92,5 | 94/156 | 18,6 | 2 | 10,6 |
| | BENTOPLUS | 0,1 | 1,026 | 31,6 | 7,4 | 110 | 97/197 | 18 | 2 | 10,6 |
| | | 0,2 | 1,026 | 36,8 | 8,4 | 121 | 75/78 | 19,8 | 2 | 10,6 |
| | | 0,3 | 1,026 | 24,6 | 12,6 | 80 | 63/89,5 | 73 | 2 | 10,6 |
| 3 | Исходный раствор | – | 1,026 | 27,9 | 7 | 91,5 | 78/127,5 | 19,2 | 2 | 10,6 |
| | BEN-EX | 0,1 | 1,026 | 29,2 | 5,3 | 108,5 | 105/134 | 18 | 2 | 10,6 |
| | | 0,2 | 1,026 | 37,8 | 7,1 | 129 | 101/104 | 17 | 2 | 10,7 |
| | | 0,3 | 1,026 | 52,3 | 7,3 | 161 | 104/112 | 16,5 | 2 | 10,6 |
| 4 | Исходный раствор | – | 1,026 | 25,3 | 6,5 | 83,5 | 91/140 | 19 | 2 | 10,6 |
| | SPECFLOC A 7950-20 | 0,1 | 1,026 | 30,1 | 7,5 | 116,5 | 93/101 | 17,5 | 2 | 10,7 |
| | | 0,2 | 1,026 | 36,8 | 10,8 | 103 | 40/41 | 62 | 2 | 10,5 |
| | | 0,3 | 1,026 | 26,8 | 6,7 | 24,5 | 18/36 | 46 | 2 | 10,6 |
| 5 | Исходный раствор | – | 1,026 | 27,5 | 6,9 | 88 | 83/132 | 19 | 2 | 10,7 |
| | SPECFLOC № 6919 | 0,1 | 1,026 | 29,2 | 4,9 | 119 | 101/155 | 18 | 2 | 10,6 |
| | | 0,2 | 1,026 | 37,3 | 6,7 | 145 | 100/89 | 16,5 | 2 | 10,7 |
| | | 0,3 | 1,026 | 57,1 | 7,9 | 184 | 79/87 | 18,5 | 2 | 10,7 |

*Примечание. P* – плотность бурового раствора; УВ$_{700/500}$ – условная вязкость; ПВ – пластическая вязкость; ДНС – динамическое напряжение сдвига; СНС$_{10/10}$ – статическое напряжение сдвига; $\Phi_{30}$ – фильтрация бурового раствора; *K* – липкость фильтрационной корки; pH – водородный показатель.

*Note. P* – density of the drilling mud; УВ$_{700/500}$ – relative viscosity; ПВ – plastic viscosity; ДНС – dynamic shear stress; СНС$_{10/10}$ – static shear stress; $\Phi_{30}$ – filtration of the drilling mud; *K* – stickiness of the filtration crust; pH – hydrogen index.

тестирования показали, что при добавлении DRB-9 в промывочную жидкость наблюдается повышение условной вязкости во всех концентрациях за счет увеличения размеров флокул. При добавлении большего количества – до 0,3 кг/м$^3$ – отдельные молекулы образуют флокулы с еще большим размером, что приводит к повышению фильтратоотдачи раствора из-за роста количества свободной воды.

Флокулянты SPECFLOC A 7950-20 и SPECFLOC № 6919 в концентрации 0,1 кг/м$^3$ влияют на суспензию одинаково, то есть повышают реологические и понижают фильтрационные свойства промывочной жидкости. При повышении

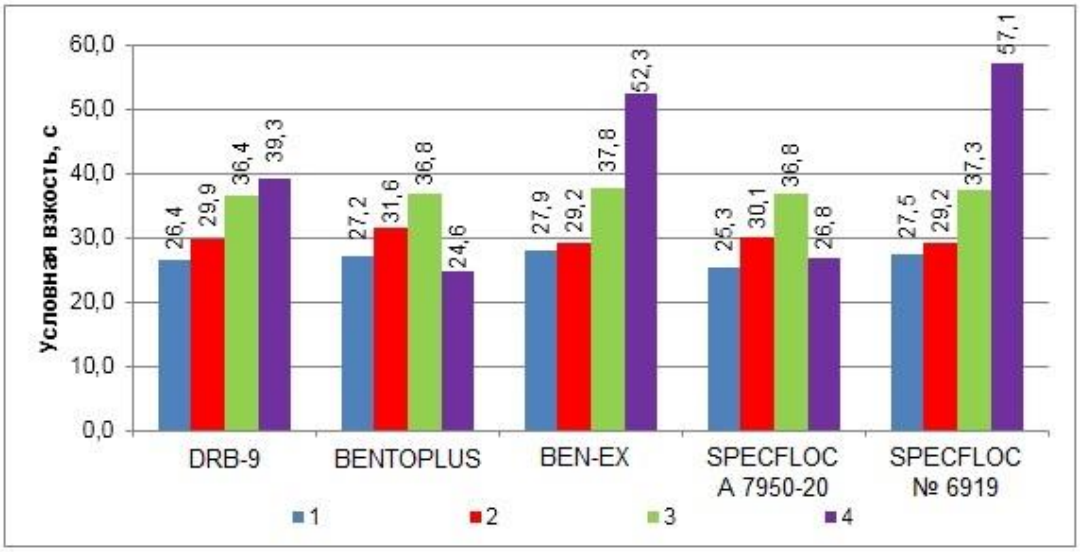



***Рис. 2. Диаграмма изменения условной вязкости в зависимости от концентрации химреагента:***
*1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³*
***Fig. 2. Diagram of the relative viscosity change as a function of the concentration of the chemical:***
*1 – bentonite suspension; 2 – concentration 0.1 kg/m³; 3 – concentration 0.2 kg/m³; 4 – concentration 0.3 kg/m³*

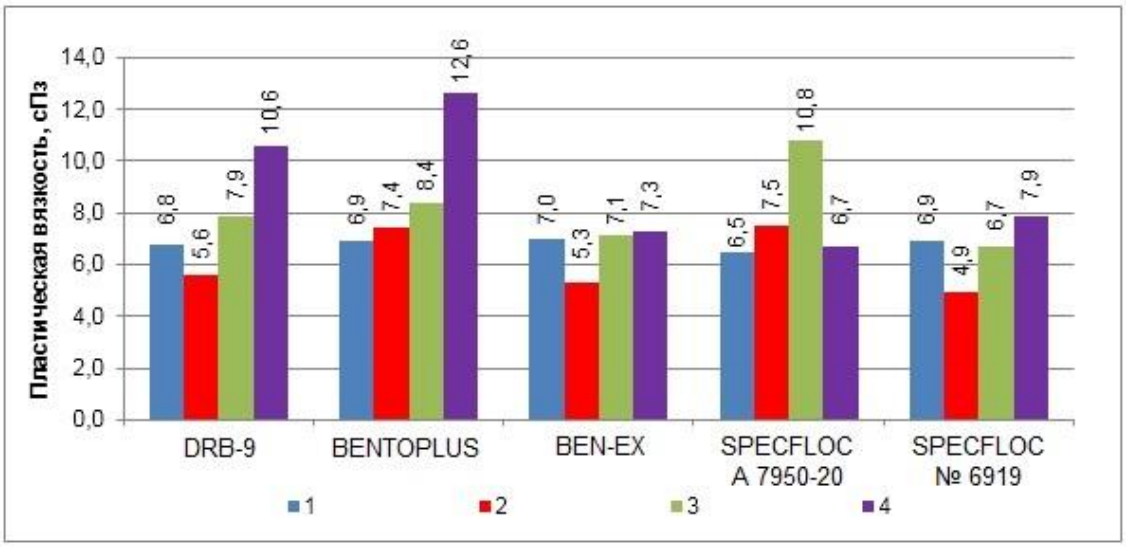



***Рис. 3. Диаграмма изменения пластической вязкости в зависимости от концентрации химреагента:***
*1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³*
***Fig. 3. Diagram of plastic viscosity change as a function of the concentration of the chemical:***
*1 – bentonite suspension; 2 – concentration 0.1 kg/m³; 3 – concentration 0.2 kg/m³; 4 – concentration 0.3 kg/m³*

концентрации добавки SPECFLOC A 7950-20 до 0,2 и 0,3 кг/м³ наблюдалось расслоение раствора, а на поверхности появлялась осветленная жидкость. Отмечено, что у раствора флокуляция выражена очень сильно в концентрации реагента 0,3 кг/м³, что привело к резкому росту фильтрации и понижению реологических свойств.

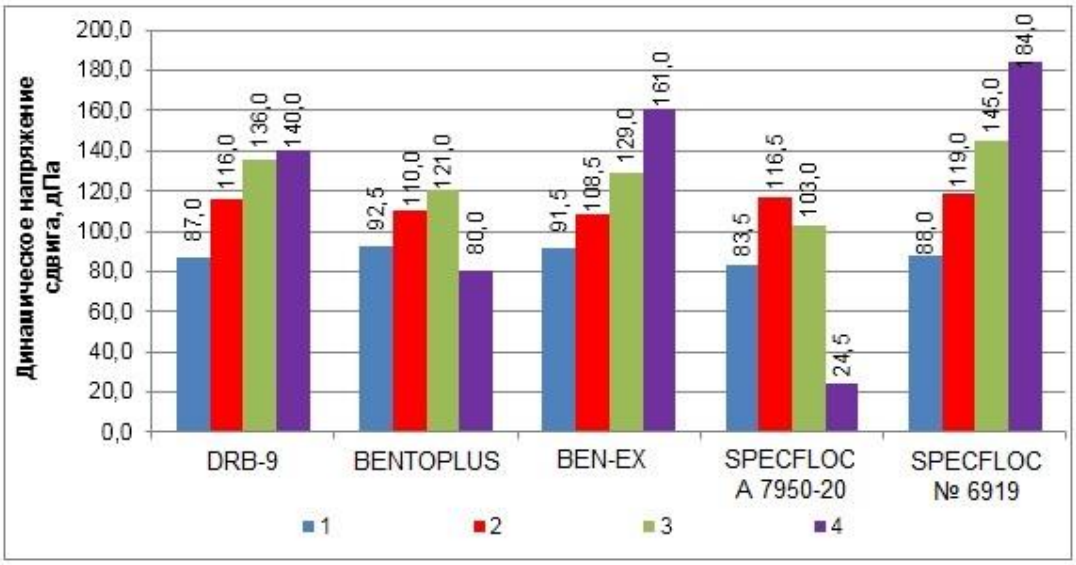



***Рис. 4. Диаграмма изменения динамического напряжения сдвига в зависимости от концентрации химреагента:***
*1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³*
***Fig. 4. Diagram of the dynamic shear stress change as a function of the concentration of the chemical:***
*1 – bentonite suspension; 2 – concentration 0.1 kg/m³; 3 – concentration 0.2 kg/m³; 4 – concentration 0.3 kg/m³*

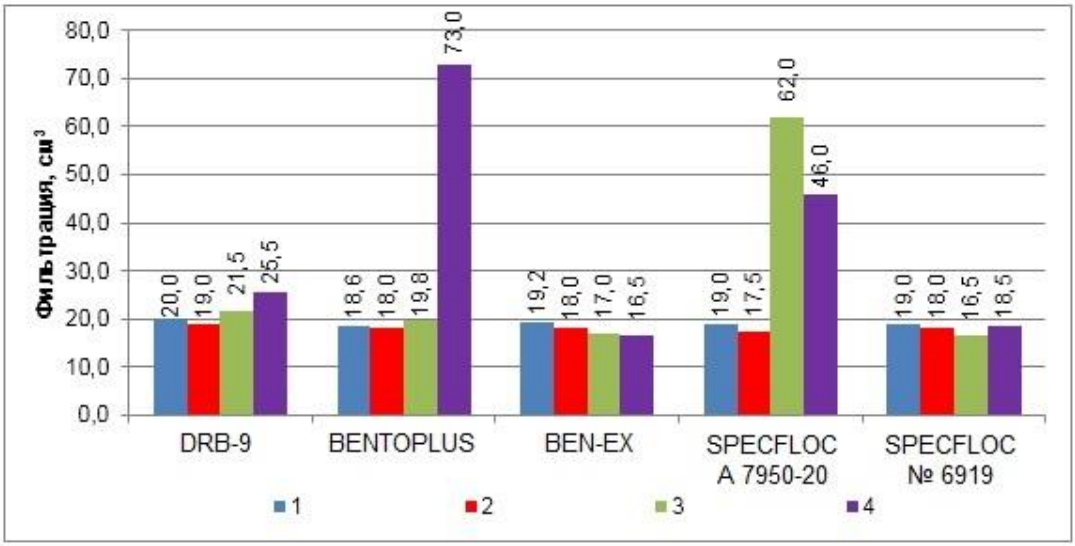



***Рис. 5. Диаграмма изменения фильтрации в зависимости от концентрации химреагента:***
*1 – бентонитовая суспензия; 2 – концентрация 0,1 кг/м³; 3 – концентрация 0,2 кг/м³; 4 – концентрация 0,3 кг/м³*
***Fig. 5. Diagram of the filtration change as a function of the concentration of the chemical:***
*1 – bentonite suspension; 2 – concentration 0.1 kg/m³; 3 – concentration 0.2 kg/m³; 4 – concentration 0.3 kg/m³*

При добавлении реагента SPECFLOC № 6919 в концентрации 0,2 и 0,3 кг/м³ повышалась условная вязкость и росло ДНС, но наблюдалось снижение СНС промывочной жидкости. Это может говорить о том, реагент начал проявлять себя как флокулянт. Кроме того, низкие значения СНС могут привести к тому, что

раствор не будет справляться со своими важнейшими функциями удержания выбуренной породы во взвешенном состоянии [11–15].

## Результаты исследования

Таким образом, на основе вышеизложенного можно утверждать следующее:

1. Реагенты BEN-EX, BENTOPLUS и DRB-9 могут применяться для повышения вязкости глинистого раствора при условии, что концентрация добавок BENTOPLUS и DRB-9 не будет превышать 0,2 кг/м$^3$.

2. Флокулянт SPECFLOC A 7950-20 может применяться для повышения вязкости глинистого раствора в концентрации до 0,1 кг/м$^3$, но только после проведения дополнительных исследований, направленных на получение бурового раствора с заданным набором технологических параметров за счет варьирования исходными концентрациями базовых реагентов. В концентрации 0,2 и 0,3 кг/м$^3$ добавка влияет на буровой раствор преимущественно как флокулянт, снижая СНС раствора и увеличивая фильтратоотдачу.

3. Если в процессе бурения буровым раствором с добавкой SPECFLOC № 6919 определяющим параметром является только ДНС, то его можно рекомендовать для использования. Во всех остальных случаях необходимо провести дополнительные исследования.

## Заключение

В целом полученные результаты демонстрируют сильное влияние реагентов-флокулянтов на параметры глинистой суспензии. Варьируя исходными концентрациями флокулянтов, можно получить буровые растворы с заданными технологическими параметрами.

**Библиографический список**

1. Лобанов Ф.И., Коробов А.С., Минибаев В.В. Опыт применения флокулянтов «Праестол» для очистки сточных вод и обезвоживания шлама при строительстве скважин и переработке нефти // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 3. С. 43–45.

2. Ковалев С.Ю., Резниченко И.Н., Яковлев Д.Н. Выбор и расчет дозировок флокулянтов при работе блоков коагуляции и флокуляции (БКФ) в системе очистки буровых растворов // Импортозамещающие технические средства и материалы: сб. науч. тр. межотрасл. науч.-практ. конф. НПО «Бурение». Анапа, 2003. № 9. С. 96–103.

3. Шакирова Э.В., Аверкина Е.В., Сабиров Т.Р. Влияние смазочных добавок на характеристики бурового раствора, применяемого при бурении скважин в Восточной Сибири // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 3 (56). С. 86–94.

4. Шарова О.Ю., Клеттер В.Ю., Самсыкин А.В., Валиева О.И., Агзамов Ф.А. Исследование эффектов синергетического взаимодействия композиций реагентов в глинистых буровых растворах // Территория «Нефтегаз». 2012. № 10. С. 16–19.

5. Averkina E.V., Shakirova E.V. Specifics of drilling wells in the abnormally-high-pressure rock beds in the oil-and-gas fields of Eastern Siberia // IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 229. P. 012032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012032

6. Gaisina L.M., Dorozhkin Yu.N., Yakupova G.A., Gainanova A.G., Gainanova E.I., Averkina E.V. The impact of the social demographic characteristics of the rural young family on the territories' development. A study case – the republic of Bashkortostan // Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering and Rural Development. 2018. Vol. 18. No. 3. P. 139–149.

7. Mpofu P., Addai-Mensah J., Ralston J. Investigation of the effect of polymer structure type on flocculation, rheology and dewatering behaviour of kaolinite dispersions // International Journal of Mineral Processing. 2003. Vol. 71. Iss. 1-4. P. 247–268. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00062-0

8. Wang D., Tang H. Modified inorganic polymer flocculant-PFSi: its preparation, characterization and coagulation behavior // Water Research. 2001. Vol. 35. Iss. 14. P. 3418–3428. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00034-3

9. Брантцко П., Минибаев В.В. Реагенты компании «Ашленд» для переработки отходов бурения // Бурение и нефть. 2012. № 3. С. 45–46.

10. Лушпеева О.А., Кошелев В.Н., Вахрушев Л.П., Беленко Е.В. О природе синергетического эффекта в полимер-глинистых буровых растворах // Нефтяное хозяйство. 2001. № 3. С. 28–30.

11. Таубаева Р., Месарош Р., Мусабеков К., Барань Ш. Электрокинетический потенциал и флокуляция суспензий бентонита в растворах ПАВ, полиэлектролитов и их смесей // Коллоидный журнал. 2015. Т. 77. № 1. С. 100–107. https://doi.org/10.7868/S0023291214060172

12. Лыков О.П., Низова С.А., Толстых Л.И., Янченко Е.Е. Изучение эффективности отечественных флокулянтов для обезвоживания глинистых дисперсий // Технологии нефти и газа. 2005. № 5-6 (40-41). С. 128–133.

13. Кудайкулова Г.А. Взаимодействие в системе полимер – полимер – глина и их влияние на технологические свойства буровых растворов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2006. № 3. С. 37–39.

14. Петров Н.А. Отечественные и зарубежные полимерные реагенты для буровых растворов // Нефтегазовое дело. 2016. № 1. С. 1–19. [Электронный ресурс]. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2016/ogbus_1_2016_p1-19_PetrovNA_ru.pdf (24.04.2020).

15. Петров Н.А. Сравнительные исследования некоторых отечественных и зарубежных полимерных реагентов в составе буровых растворов Западной Сибири // Нефтегазовое дело. 2016. Т. 14. № 1. С. 30–41. [Электронный ресурс]. URL: http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/1/ngdelo-1-2016-p30-41.pdf (24.04.2020).

**References**

1. Lobanov FI, Korobov AS, Minibaev VV. Practice of Praestol flocculants use for wastewater treatment and sludge dewatering in well construction and oil refining processes. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* = Occupational Safety in Industry. 2009;3:43–45. (In Russ.)

2. Kovalev SYu, Reznichenko IN, Yakovlev DN. Selection and calculation of flocculants dosages during the operation of coagulation and flocculation units (BCF) in the drilling mud cleaning system. In: *Importozameshchayushchie tekhnicheskie sredstva i materialy: sbornik nauchnykh trudov mezhotraslevoi nauchno-prakticheskoi konferentsii NPO "Burenie"* = Import-substituting equipment and materials: Proceedings of the Intersectoral Research and Practice Conference of the Scientific-Production Association "Drilling". Anapa; 2003. No. 9. p.96–103. (In Russ.)

3. Shakirova EV, Averkina EV, Sabirov TR. The effect of lubricating additives on characteristics of the mud used in well-drilling in Eastern Siberia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektsii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016;3:86–94. (In Russ.)

4. Sharova OYu, Kletter VYu, Samsykin AV, Valieva OI, Agzamov FA. Investigation of the effects of the synergetic interaction of reagent compositions in clay drilling muds. *Territorija Neftegas* = Oil and Gas Territory. 2012;10:16–19. (In Russ.)

5. Averkina EV, Shakirova EV. Specifics of drilling wells in the abnormally-high-pressure rock beds in the oil-and-gas fields of Eastern Siberia. *IOP Conference. Series: Earth and Environmental Science.* 2019;229:012032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/229/1/012032

6. Gaisina LM, Dorozhkin YuN, Yakupova GA, Gainanova AG, Gainanova EI, Averkina EV. The impact of the social demographic characteristics of the rural young family on the territories' development. A study case – the republic of Bashkortostan. *Scientific Papers. Series: Management, Economic Engineering and Rural Development*. 2018;18(3):139–149.

7. Mpofu P, Addai-Mensah J, Ralston J. Investigation of the effect of polymer structure type on flocculation, rheology and dewatering behaviour of kaolinite dispersions. *International Journal of Mineral Processing.* 2003;71(1-4):247–268. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(03)00062-0

8. Wang D, Tang H. Modified inorganic polymer flocculant-PFSi: its preparation, characterization and coagulation behavior. *Water Research*. 2001;35(14):3418–3428. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00034-3

9. Branttsko P, Minibaev V. Ashland Co reagents for drilling wastes processing. *Burenie i neft'*. 2012;3:45–46. (In Russ.)

10. Lushpeeva OA, Koshelev VN, Vakhrushev LP, Belenko EV. On the nature of the synergetic effect in polymer-clay drilling muds. *Neftyanoe khozyaistvo*. 2001;3:28–30. (In Russ.)

11. Taubaeva R, Mesarosh R, Musabekov K, Baran' Sh. Electrokinetic potential and flocculation of bentonite suspensions in solutions of surfactants, polyelectrolytes and mixtures. *Kolloidnyi zhurnal*. 2015;77(1):100–107. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0023291214060172

12. Lykov OP, Nizova SA, Tolstykh LI, Yanchenko EE. Studying the effectiveness of domestically produced flocculants for clay dispersion dewatering. *Tekhnologii nefti i gaza*. 2005;5-6:128–133. (In Russ.)

13. Kudaikulova GA. Interaction in the polymer-polymer-clay system and its influence on the technological properties of drilling fluids. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more*. 2006;3:37–39. (In Russ.)

14. Petrov NA. Domestic and foreign polymeric reagents for drilling fluids. *Neftegazovoe delo*. 2016;1:1–19. Available from: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2016/ogbus_1_2016_p1-19_PetrovNA_ru.pdf [Accessed 24th April 2020]. (In Russ.)

15. Petrov NA. Comparative study of some domestic and foreign polymer reagent composition the drilling mud Western Siberia. *Neftegazovoe delo*. 2016;14(1):30–41. Aviailable from: http://ngdelo.ru/files/ngdelo/2016/1/ngdelo-1-2016-p30-41.pdf [Accessed 24th April 2020]. (In Russ.)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Аверкина Е.В., Шакирова Э.В., Бутакова Л.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Elena V. Averkina, Elvira V. Shakirova, Lyubov A. Butakova 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Аверкина Елена Владимировна,**
старший преподаватель кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: averkina@istu.edu
**Elena V. Averkina,**
Seniour Lecturer, Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: averkina@istu.edu

**Шакирова Эльвира Венеровна,**
кандидат политических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: viva160@mail.ru
**Elvira V. Shakirova,**
Cand. Sci. (Polit.),
Docent, Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: viva160@mail.ru

**Бутакова Любовь Александровна,**
специалист по учебно-методической работе кафедры нефтегазового дела,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: lyubov.elizarova.89@bk.ru
**Lyubov A. Butakova,**
Teaching and Methodological Work Specialist,
Department of Oil and Gas Engineering,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: lyubov.elizarova.89@bk.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 331.45:613.6**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-242-255**

# Современные требования к оценке профессиональных рисков на объектах золотодобычи

**© С.С. Тимофеева[a], И.В. Дроздова[b], С.С. Тимофеев[c]**
[a–c]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** В настоящее время в России идет процесс модернизации законодательства, прежде всего в вопросах охраны труда и промышленной безопасности, безопасности в чрезвычайных ситуациях, которые касаются системы управления охраной труда и промышленной безопасности на государственном уровне. Цель этой модернизации состоит в переходе от ранее действовавшей неэффективной системы, ориентированной на компенсационные выплаты в связи с утратой здоровья, медико-социальную помощь работникам, пострадавшим от производственных травм и профессиональных рисков, к современной системе, основанной на превентивных подходах, подразумевающих постоянное улучшение условий труда, повышение безопасности производства и формирование культуры безопасного поведения работающих, создание системы управления рисками. Целью настоящей работы является анализ нововведений в области управления охраной труда, обязывающих работодателей перейти к оценке профессиональных рисков и управлению ими, а также оценка профессиональных рисков на примере технологических процессов золотодобычи. В ходе исследования рассмотрены современные методологии оценки риска, на примере карьеров золотодобычи Бодайбинского района Иркутской области выполнено оценивание профессиональных рисков, проведен анализ рисков двумя методами, выявлены высокорисковые профессии. Проанализированы возможные причины несоответствия заявленным требованиям физических факторов производственной среды горнорабочих при выполнении работ в карьерах золотодобычи. Профессии, исследуемые в данной работе, относятся к высоким и средним по уровню риска категориям. Авторами подробно рассмотрен участок буровзрывных работ. Установлено, что неприемлемыми являются механические опасности, обусловленные выбрасыванием осколков горной массы, выбросами пыли и шумовым воздействием. Первоочередные мероприятия по улучшению условий труда должны быть направлены на ликвидацию этих неблагоприятных факторов.

***Ключевые слова:*** охрана труда, законодательство, профессиональный риск, оценка, открытые горные работы, золотодобыча

***Информация о статье:*** Дата поступления 07 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 15 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Тимофеева С.С., Дроздова И.В., Тимофеев С.С. Современные требования к оценке профессиональных рисков на объектах золотодобычи. *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 242–255. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-242-255

# Modern requirements for occupational risk assessment at gold mining sites

**© Svetlana S. Timofeeva[a], Irina V. Drozdova[b], Semen S. Timofeev[c]**
[a–c]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** Russia is currently in the process of modernizing its legislation, primarily in the areas of occupational safety and health, industrial safety and emergency safety, which concerns the management system for occupational and industrial safety on a state level. The aim of the modernization is to make a transition from the previous inefficient system to the modern one. The old system focuses on health compensation, medical and social assistance to the employees suffering work injuries and occupational risks, while the new system is based on a preventive approach that presupposes continuous improvement of the working conditions, industrial safety enhancement, development of a safe working behavior culture, and creation of a risk-management system. The purpose of the article is to analyze the occupational safety and health management innovations encouraging the employers to implement risk assessment and risk management, and to evaluate the occupational risks in gold mining processes. The authors have examined the modern procedures of risk assessment, evaluated the occupational risks for the gold mines of the Bodaibo district, Irkutsk region, analyzed the risks by two methods and identified high-risk professions.

Possible reasons for the incompliance of the physical factors of the gold miners' working environment with the claimed requirements have been analyzed. The investigated professions are classified as high- and middle-risk ones. The detailed study of the drilling-and-blasting site has concluded that the mechanical hazards caused by the rock fragmentation, dust, or noise are unacceptable. Thus, the priority measures on improving the working conditions should focus on eliminating these adverse factors.

***Keywords:*** occupational safety and health, legislation, occupational risk, assessment, opencast mining, gold mining

***Information about the article:*** Received April 07, 2020; accepted for publication May 15, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Timofeeva SS, Drozdova IV, Timofeev SS. Modern requirements for occupational risk assessment at gold mining sites. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):242–255. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-242-255

## Введение

Предприятия по добыче и переработке золота занимают одно из ведущих мест в экономическом развитии любой страны. Россия входит в пятерку стран-лидеров по добыче золота: уже много лет ее доля в мировом обороте составляет 7–9 %. Около 75 % золотоносных рудников и месторождений России приходится на Сибирь и Дальний Восток [1]. Среди перспективных регионов выделяется Иркутская область, Бодайбинский район, где эксплуатируются россыпные и рудные месторождения. При этом персонал, участвующий в добыче золота, подвергается воздействию неблагоприятных факторов как природного, так и техногенного происхождения. Одним из условий обеспечения безопасности предприятия и получения стабильной прибыли является соблюдение требований охраны труда и сохранение квалифицированных работников, соблюдение требований трудоохранного законодательства.

В настоящее время в России идет процесс модернизации законодательства, прежде всего в вопросах охраны труда и промышленной безопасности, безопасности в чрезвычайных ситуациях, которые касаются системы управления охраной труда и промышленной безопасности на государственном уровне. Цель этой модернизации состоит в переходе от ранее действовавшей неэффективной системы, ориентированной на компенсационные выплаты в связи с утратой здоровья, медико-социальную помощь работникам, пострадавшим от производственных травм и профессиональных рисков, к современной системе, основанной на превентивных подходах, подразумевающих постоянное улучшение условий труда, повышение безопасности производства и формирование культуры безопасного поведения работающих, создание системы управления рисками.

17 августа 2016 г. в России принято Постановление Правительства № 806 «О применении риск-ориентированного подхода при организации отдельных видов государственного контроля (надзора) и внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации», согласно которому в контрольно-надзорные функции государства внедряется риск-ориентированный подход (РОП). Это метод организации и осуществления государственного контроля, при котором в законодательно установленных случаях выбор интенсивности (формы, продолжительности, периодичности) проведения мероприятий по контролю за нарушениями обязательных требований и мероприятий по профилактике возникновения данных требований определяется категорией риска и классом опасности [2].

РОП внедрен и широко применяется в мире, его применение позволило сократить общее количество поверок от 60 до 90 %, а в отдельных секторах бизнеса – вообще отказаться от необходимости прохождения плановых проверок [3]. Международное нормативное понимание РОП представлено в стандартах Группы разработки финансовых мер борьбы с отмыванием денег (ФАТФ, англ. *Financial Action Task Force on Money Laundering – FATF*). ФАТФ представляет

собой межправительственную организацию, которая занимается разработкой мировых стандартов в сфере противодействия отмыванию преступных доходов и финансированию терроризма. Согласно стандарту ФАТФ 2012 г., РОП представляет собой «определение и оценку рисков и принятие шагов, в том числе определение органа и механизма по координации мер по оценке рисков, а также распределение ресурсов с целью эффективного снижения рисков»[1]. Внедрение такого подхода в России [4, 5] позволит снизить на 40 % количество проверок и на 30 % – число ревизоров, что позволит сэкономить 20 % бюджетных средств.

Основная концепция внедрения РОП предполагает разработку и совершенствование нормативно-правовой документации. В настоящее время в России запущен механизм «регуляторной гильотины» [6], разработан план мероприятий (дорожная карта) по реализации данного механизма. Термин «регуляторная гильотина» в правительстве трактуют как инвентаризацию всех действующих и обязательных для бизнеса требований с целью понять, соответствуют ли они современным реалиям. Утверждается, что в действующих нормативных актах содержится более 2 млн обязательных требований для бизнеса. Предполагается, что к 1 января 2021 г. весь массив норм, устанавливающих обязательные требования, будет полностью заменен на новые. Министерство юстиции предполагает «пустить под гильотину» 3,7 тыс. нормативных правовых актов СССР. В настоящее время «регуляторную гильотину» применили в своей практике уже более 100 стран, в том числе Хорватия, Великобритания, Мексика, Вьетнам, Египет и другие [7].

Целью настоящей работы является анализ нововведений в области управления охраной труда, обязывающих работодателей перейти к оценке профессиональных рисков и управлению ими, а также оценка профессиональных рисков на примере технологических процессов золотодобычи.

## Объект и методы исследования

Объектом исследования являлись профессиональные риски на объектах золотодобычи Иркутской области, стандартизация процедуры их оценки и ранжирование промышленных объектов по величине рисков, нормативно-правовая документация, регулирующая данные риски.

В ходе работы оценивали профессиональные риски основных профессий горнорабочих, занятых добычей золотоносной руды, двух карьеров:

– карьер горно-обогатительного комбината (ГОК) «Вернинский» (АО «Вернинское»), расположенный в долине р. Ныгри;

– карьер ГОК «Невский» (ООО «Друза») в долине р. Вача.

Исходными данными служили результаты специальной оценки условий труда рабочих следующих профессий: взрывники, машинисты бульдозера, экскаватора, автомобильного крана, буровой, наносной установки, водители автомобилей, а также рабочих других профессий, занятых в технологических процессах, представленных на рис. 1.

Оценку профессиональных рисков проводили в соответствии с классификацией условий труда согласно Методике проведения специальной оценки условий труда[2], а также Методике прогнозной оценки профессиональных рисков[3] [8, 9].

---

[1] Рекомендации ФАТФ. Международные стандарты по противодействию отмыванию денег, финансированию терроризма и финансированию распространения оружия массового уничтожения / пер. с англ. М.: Вече, 2012. 176 с.

[2] Тимофеева С.С. Специальная оценка условий труда: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2018. 432 с.

[3] Тимофеева С.С. Методы и технологии оценки производственных рисков: практикум. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. 180 с.

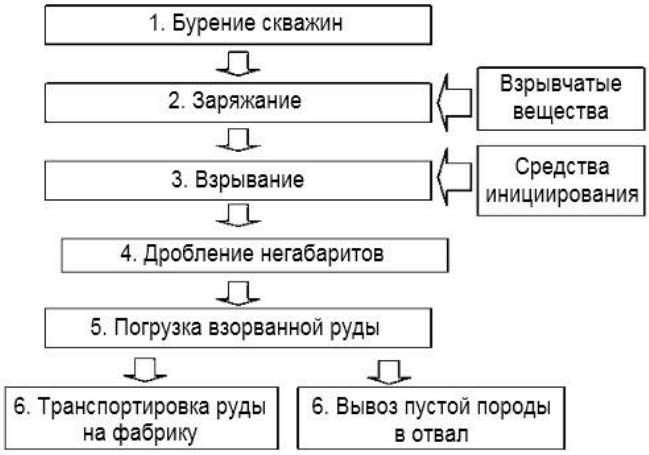



***Рис. 1. Схема технологического процесса на карьерах по добыче рудного золота***
***Fig. 1. Flowsheet for gold ore open pits***

## Результаты исследования и их обсуждение

В современное российское законодательство понятие «профессиональный риск» впервые введено Федеральным законом от 24 июля 1998 г. № 125-ФЗ «Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний». Согласно данному закону, «профессиональный риск – это вероятность повреждения (утраты) здоровья или смерти застрахованного, связанная с исполнением им обязанностей по трудовому договору»[4]. Этим законом были установлены классы профессиональных рисков в зависимости от уровня травматизма и профзаболеваний, а также обязательные платежи, отчисляемые работодателем в Фонд социально страхования Российской Федерации.

Позднее в 2011 г. понятие «профессиональный риск» введено в Трудовой кодекс РФ (Федеральный закон от 18 июля 2011 г. № 238-ФЗ «О внесении изменений в Трудовой кодекс Российской Федерации»). Профессиональный риск определен как «вероятность причинения вреда здоровью в результате воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору или в иных случаях, установленных Кодексом, другими федеральными законами»[5]. Там же впервые было введено понятие об управлении профессиональными рисками, под которым понимается «комплекс взаимосвязанных мероприятий, включающих в себя меры по выявлению, оценке и снижению уровней профессиональных рисков». В настоящий момент оценка профессиональных рисков рассматривается как составная часть системы управления охраной труда, направленная на реализацию превентивных мер по обеспечению безопасности работающих.

Нормативной основой осуществления процедуры создания системы управления охраной труда в организации в России являются национальные стандарты, а именно ГОСТ Р 12.0.010-2009 «Система управления охраной труда. Определение и оценка рисков». Структура системы управления охраной труда в организации узаконена Приказом Минтруда РФ от 19 августа 2016 г. № 438н

[4] Об обязательном социальном страховании от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: федер. закон РФ № 125-ФЗ от 24 июля 1998 г. // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_19559/ (10.01.2020).
[5] О внесении изменений в Трудовой кодекс Российской Федерации: федер. закон РФ № 238-ФЗ от 18 июля 2011 г. // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116979/ (10.01.2020).

«Об утверждении Типового положения о системе управления охраной труда».

Долгое время применение оценки профессиональных рисков носило рекомендательный характер. Однако в 2019 г. были внесены изменения в X раздел Трудового кодекса РФ. Теперь процедура оценки профессиональных рисков является для предприятий обязательной и будет контролироваться Инспекцией по труду, о чем свидетельствует Приказ Роструда от 21 марта 2019 г. № 77 «Об утверждении Методических рекомендаций по проверке создания и обеспечения функционирования системы управления охраной труда». Приказ определил перечень документов, необходимых в рамках внеплановых проверок и расследований несчастных случаев. Государственным инспекторам даны четкие методические указания о том, что следует проверять с точки зрения выполнения предприятиями оценки профессиональных рисков.

В настоящее время в России действует целая серия стандартов «Менеджмент риска»[6,7] и «Системы управления охраной труда»[8–10], где прописаны процедуры идентификации опасностей и качественной и количественной оценки рисков для обеспечения безопасности выполнения работ.

Оценка профессиональных рисков начинается с идентификации опасностей, а правильнее сказать – с понимания того, какие источники профессиональных рисков присутствуют и сколько их. Тем самым создается целый ряд перечней: зданий и сооружений; оборудования; технологических процессов и видов работ; инструментов и приспособлений; материалов и сырья; объектов территории. Согласно новым государственным стандартам на каждом рабочем месте необходимо оценивать:

– риски воздействия: сочетание случайной возможности воздействия опасности на организм работающего и значимости (тяжести) последствий такого воздействия;

– ситуационные риски (риски инициирования): сочетание случайной возможности возникновения и значимости (тяжести) последствий опасной ситуации, в которой не исключен риск воздействия и в которой могут появиться новые опасности с соответствующими рисками воздействия или инициирования.

Процедура оценивания рисков заключается в определении степени риска и присвоении ему того или иного ранга шкалы порядка, балльного или вербального. Ранжирование рисков представляет собой процедуру упорядочения объектов в порядке убывания или возрастания какого-либо их качественного свойства при измерениях в шкале порядка. Степень риска – это мера риска, балльная и/или вербальная, ранжирующая по шкале порядка место данного риска среди других рисков. По степени риска различают:

– пренебрежимо малую степень риска: степень такого риска, наличием которого можно пренебречь и, не предпринимая никаких специальных мер обеспечения безопасности, допустить персонал к выполнению работ, производимых

[6] ГОСТ Р 51897-2011. Руководство ИСО 73:2009. Менеджмент риска. Термины и определения // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200088035 (10.01.2020).
[7] ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200170253 (10.01.2020).
[8] ГОСТ 12.0.230.2-2015. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда в организациях. Оценка соответствия. Требования // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200136074 (10.01.2020).
[9] ГОСТ 12.0.230.4-2018. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы идентификации опасностей на различных этапах выполнения работ // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200160464 (10.01.2020).
[10] ГОСТ 12.0.230.5-2018. Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда. Методы оценки риска для обеспечения безопасности выполнения работ // Консорциум кодекс [Электронный ресурс]. URL: http://docs.cntd.ru/document/1200160465 (10.01.2020).

в рамках общих мер безопасного поведения и безопасных приемов труда, практически без использования специально предусмотренных мер и средств обеспечения безопасности;

– допустимую степень риска (допустимый риск): степень такого риска, при котором организация может допустить работающих к выполнению работ, но только при строгом соблюдении установленных регламентов выполнения работ и использования регламентированных мер и средств безопасности;

– недопустимую степень риска (недопустимый риск): степень такого высокого социально значимого риска, при котором организация не может допустить персонал к выполнению работ при применяемых регламентах выполнения работ, регламентированных мер и средств безопасности из-за возможности серьезного происшествия.

В результате осуществления оценки риска организация должна получить:

– максимально объективную информацию о состоянии условий труда, имеющихся опасностях и рисках их воздействия на работающих;

– упорядоченные перечни рисков, ранжированные по степени риска, позволяющие выявить наиболее уязвимые моменты обеспечения безопасности труда, выработать поэтапные меры по управлению рисками и надежному обеспечению безопасности труда работающих;

– максимально подробную информацию для принятия обоснованных решений по управлению рисками, позволяющую разработать и внедрить предупредительные и регулирующие меры по защите работающих от рисков в порядке приоритетности.

Крайне важно понимать, что план мероприятий (мер управления) профессиональными рисками может быть только поэтапным, так как ни один работодатель не обладает такими ресурсами, которые за один прием могли бы снизить уровень риска по всем идентифицированным рискам одномоментно, а тем более исключить их при сегодняшнем уровне техники и технологии. Поэтому крайне важно, внедряя новые средства обеспечения безопасности, повторно оценивать риски и выполнять мониторинг условий труда.

При этом необходимо помнить, что процесс снижения риска не может быть бесконечным: следует определиться с уровнем достаточной разумности и использовать организационные мероприятия, такие как внедрение культуры безопасности поведенческого диалога и ряда современных приемов снижения риска, на основе не только технических и технологических решений, но и вовлечения персонала в обеспечение безопасности труда и активизацию мотивации на безопасный труд. Результаты оценки профессиональных рисков должны лечь в первую очередь в основу процессов обеспечения работников средствами индивидуальной защиты (СИЗ), информирования и подготовки персонала, в том числе при проведении всех видов инструктажей и обучения работников.

В соответствии с ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки рисков», вступившего в силу с 1 марта 2020 г., предприятиям предлагается множество методик оценки рисков, которые они вправе использовать при определении класса риска для своей организации.

Выбор методики анализа рисков остается непосредственно за исследователем. Основываясь на результатах собственных исследований по оценке рисков горных предприятий [8, 9], свой выбор авторы данной статьи остановили на балльной методике по результатам фактических замеров факторов, непосредственно воздействующих на участников технологического процесса, а также матричном методе.

В условиях использования высокопроизводительного горного оборудования при открытой добыче золотоносодержащих руд на карьерах ГОК «Вернинский» и «Невский» на рабочих, участвующих

в технологическом процессе (бульдозерист, экскаваторщик, водитель большегрузных автосамосвалов), действует комплекс производственных факторов (пыль, токсические вещества, шум, вибрация, неблагоприятный микроклимат и др.). Факторы могут изменяться в широком диапазоне в течение смены и часто превышать предельно допустимые величины. Общая оценка условий труда на рабочих местах этих профессий характеризуется вредным третьим классом с разной степенью вредности. Ведущими факторами являются шумо-вибрационный, пылевой на фоне неблагоприятного микроклимата. По статистическим данным у горнорабочих карьеров в последние годы отмечается рост регистрации профессиональных заболеваний, основную массу которых составляет вибрационная болезнь, что и определяется повышенными уровнями вибрации на рабочих места, превышающими предельно допустимые уровни на 3–10 дБ, а также повышением эквивалентного корректированного уровня виброскорости на рабочих местах у машинистов буровых установок, экскаваторов и водителей большегрузных карьерных автосамосвалов. Негативные последствия усиливаются охлаждающим микроклиматом рабочих мест, работой в вынужденных и неудобных позах, поступлением в воздух рабочей зоны газов: оксида углерода, оксидов азота, диоксида серы, сероводорода и аэрозолей, образующихся при буровзрывных работах [10–15].

Обобщенный уровень безопасности на каждом рабочем месте равен произведению всех уровней безопасности по каждому фактору производственной среды для отдельно взятой профессии.

В результате расчетов получены средние значения обобщенных уровней профессионального риска для карьеров ГОК «Вернинский» и «Невский» (рис. 2). Для сравнения на рис. 2 также приведены данные по карьеру месторождения Мурунтау в Узбекистане – самому крупному в мире. Следует учесть, что в Узбекистане процедуры специальной оценки условий труда нет – там используется процедура аттестации рабочих мест, отличающаяся нормативами от российской.

Установлено, что уровни риска исследуемых профессий относятся к категориям высоких и средних (табл. 1).

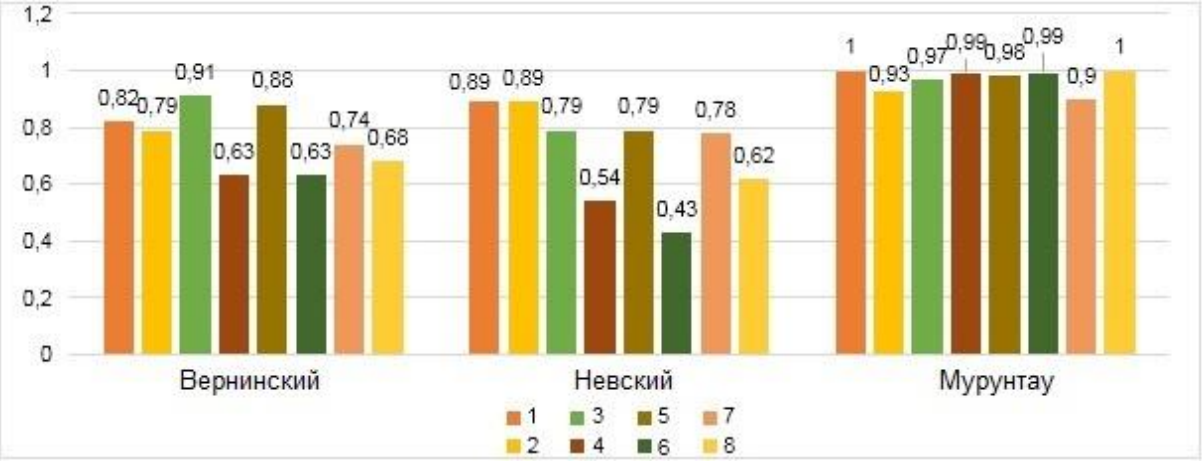



***Рис. 2. Значения обобщенных уровней профессионального риска для каждой рабочей профессии при ведении открытых горных работ в карьерах:***

*1 – машинист бульдозера; 2 – водитель автомобиля; 3 – машинист экскаватора; 4 – взрывник; 5 – машинист буровой; 6 – машинист насосных установок; 7 – машинист автомобильного крана; 8 – горный мастер*

***Fig. 2. Generalized levels of occupational risk for open pit working professions:***

*1 – bulldozer operator; 2 – automobile driver; 3 – excavator operator; 4 – blaster; 5 – drilling rig operator; 6 – pump machine operator; 7 – truck crane operator; 8 – mine foreman*

**Таблица 1**

**Уровни профессионального риска для каждой рабочей профессии на карьерах по добыче рудного золота**

**Table 1**

**Occupational risk levels for each profession at open pit gold mines**

| Профессия | Значение профессионального риска | | | Уровень риска |
|---|---|---|---|---|
| | Карьер ГОК «Вернинский» | Карьер ГОК «Невский» | Среднее значение | |
| Машинист бульдозера | 0,82 | 0,89 | 0,86 | Высокий |
| Водитель автомобиля | 0,79 | 0,89 | 0,84 | Высокий |
| Машинист экскаватора | 0,91 | 0,79 | 0,85 | Высокий |
| Взрывник | 0,63 | 0,56 | 0,60 | Высокий |
| Машинист буровой | 0,88 | 0,79 | 0,84 | Высокий |
| Машинист насосных установок | 0,63 | 0,43 | 0,53 | Средний |
| Машинист автомобильного крана | 0,74 | 0,78 | 0,76 | Высокий |
| Горный мастер | 0,68 | 0,62 | 0,65 | Средний |

На примере участка буровых работ выполнена оценка рисков матричным методом, рекомендованным ГОСТ Р 58771-2019, вступившим в силу с 1 марта 2020 г. В соответствии с данной методикой риск может принимать три значения: «неприемлемый», «высокий» и «приемлемый» – с учетом управленческих решений, направленных на минимизацию рисков. В табл. 2 и 3 представлены результаты процедуры оценки рисков при бурении скважин, а также реестр рисков для карьера ГОК «Вернинский». Как следует из этих данных, неприемлемыми рисками на участке буровзрывных работ являются механические опасности, обусловленные выбрасыванием осколков горной массы, выбросами пыли и шумовым воздействием. Применение организационно-технических мероприятий, а именно соблюдение норм и требований техники безопасности, обеспечение рабочих средствами защиты, позволяет перевести риск из категории высоких и неприемлемых в категорию приемлемых рисков.

Таким образом, первоочередные мероприятия по улучшению условий труда должны быть направлены на ликвидацию неблагоприятных факторов, воздействующих на взрывников и машинистов буровых установок, а также обеспечение работников более эффективными СИЗ от шума и вибрации.

## Заключение

Изменившееся законодательство Российской Федерации в области охраны труда требует от промышленных предприятий выполнять оценку профессиональных рисков, с 1 января 2020 г. эта процедура стала обязательной для высокорисковых производств, где реализуются технологические процессы с неблагоприятными производственными факторами, и будет контролироваться Инспекцией по труду при возникновении несчастных случаев на предприятии.

В настоящее время Трудовым кодексом Российской Федерации установлена обязанность работодателя по обеспечению создания и функционирования системы управления охраной труда. Управление профессиональными рисками как комплекс взаимосвязанных мероприятий, являющихся элементами системы управления охраной труда, имеет целью снижение рисков до допустимых значений. В связи с этим более точная оценка рисков дает возможность обоснованно подойти к выбору мероприятий по снижению рисков, в том числе и по экономическим показателям.

**Таблица 2**

**Результаты процедуры оценки рисков при бурении скважин**

**Table 2**

**Risk assessment results for a well drilling process**

| Описание источника опасности | Последствия воздействия источника опасности | Существующие меры | Первоначальная оценка | | Мероприятия по снижению риска до допустимого уровня до начала производства работ | Повторная оценка | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Тя-жесть | Вероят-ность | | Тя-жесть | Вероят-ность |
| Опасность раздавливания, в том числе из-за попадания под движущиеся части механизмов, из-за обрушения горной породы, из-за падения | Травмирование, в том числе со смертельным исходом | Составление схемы движения автотранспорта на карьере, установление скоростных ограничений, укрепление уступов карьера | 2 ▲ | E ▲ | Ограждение участка буровых работ, запрет на нахождение посторонних лиц | 3 △ | E △ |
| Опасность травмирования, в том числе в результате выброса подвижной обрабатываемой детали, падающими или выбрасываемыми предметами, движущимися частями оборудования, осколками при обрушении горной породы | Травмирование | – | 2 ■ | C ■ | Ограждение участка буровых работ, запрет на нахождение посторонних лиц | 2 △ | E △ |
| Опасность поражения током вследствие контакта с токоведущими частями, которые находятся | Травмирование, в том числе со смертельным исходом | Изоляция токоведущих частей, использование СИЗ | 5 △ | E △ | – | – | – |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| под напряжением, из-за неисправного состояния (косвенный контакт) | | | | | | | |
| Опасность поражения током от наведенного напряжения на рабочем месте | Травмирование, в том числе со смертельным исходом | Изоляция токоведущих частей, использование СИЗ | 5 | E | – | – | – |
| Опасность воздействия пониженных температур воздуха | Нарушение физиологических функций организма человека | Использование спецодежды | 5 | C | – | – | – |
| Опасность воздействия повышенных температур воздуха | Нарушение физиологических функций организма человека | Использование спецодежды | 5 | C | – | – | – |
| Опасность от пониженного барометрического давления | Нарушение физиологических функций организма человека | – | 5 | C | – | – | – |
| Опасность повреждения мембранной перепонки уха, связанная с воздействием шума высокой интенсивности | Напряжение слухового аппарата человека (возможна тугоухость, в дальнейшем – глухота) | Шумоизоляция кабины | 2 | B | Использование СИЗ (вкладыши, беруши) во время работы | 4 | C |
| Опасность воздействия пыли на глаза | Напряжение глаз (ведет к ухудшению зрения) | Изоляция кабины | 4 | Д | – | – | – |
| Опасность повреждения органов дыхания частицами пыли | Возникновение заболеваний верхних дыхательных путей (астма) | Изоляция кабины | 4 | Д | – | – | – |
| Опасность воздействия пыли на кожу | Раздражение кожи | Изоляция кабины | 4 | Д | – | – | – |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Опасность, связанная с выбросом пыли | Острое заболевание или внезапное резкое ухудшение здоровья | – | 3 ▲ | Д ▲ | Поливание участка буровых работ водой перед началом работ | 3 Δ | Е Δ |
| Опасность, связанная с воздействием общей вибрации | Нарушение физиологических функций организма человека (вибрационная болезнь, тремор верхних конечностей) | Виброизоляция рабочего места (сиденья) | 5 Δ | Д Δ | – | – | – |
| Опасность, связанная с рабочей позой | Нарушение напряжения организма человека | Соблюдение режима труда и отдыха | 5 Δ | Е Δ | – | – | – |

*Примечание.* ■ – риск неприемлемый, и работу начинать нельзя из-за вероятности серьезного происшествия; ▲ – риск высокий, и работу можно начинать после письменного одобрения руководителя работ; Δ – риск приемлемый, и работу можно начинать с учетом существующих корректирующих мер.

*Note.* ■ – the risk is unacceptable, the work cannot be done because of the high probability of a serious hazard; ▲ – the risk is high, the work can start with a supervisor's written approval; Δ – the risk is acceptable, the work can start with the account of the current update measures.

Система управления профессиональными рисками должна основываться на идентификации всех опасностей, которые могут иметь место на рабочих местах, их количественной оценке и ведении мониторинга проводимых измерений, оценке защищенности работников СИЗ от средних и высоких рисков и установлении взаимосвязей состояния условий труда и состояния здоровья работников на основе определения индивидуальных профессиональных рисков. В настоящее время в России создана нормативно-правовая база в виде национальных стандартов, но требуется ее внедрение на каждом предприятии. Исход реализации законодательства определяется прежде всего приверженностью руководителей идеям сохранения человеческих ресурсов и социальной ответственностью бизнеса.

Основными причинами несоответствия заявленным требованиям физических факторов на рабочих местах горных производств являются:

– несовершенство технологических процессов и оборудования;

– отсутствие своевременного ремонта и обслуживания (планово-предупредительные ремонты), повышенный износ горного оборудования, машин, механизмов;

– отсутствие эффективного производственного контроля;

– недостаточная ответственность руководителей производств за состояние условий и охраны труда.

В ходе представленного в данной статье исследования на примере открытых горных работ по добыче залотосодержащей руды в карьерах ГОК, эффективно функционирующих в Бодайбинском районе, оценены профессиональные риски и составлен реестр высокорисковых профессий. Установлено, что неприемлемыми являются механические

**Таблица 3**

**Реестр рисков**

**Table 3**

**Risk register**

| Идентифицированная опасность | Подразделение | Цех | Уровень риска | Мероприятия по снижению риска до допустимого уровня |
|---|---|---|---|---|
| Опасность раздавливания, в том числе, из-за попадания под движущиеся части механизмов, из-за обрушения горной породы, из-за падения | Карьер ГОК «Вернинский» | Участок буровых работ | Высокий | Ограждение участка буровых работ, запрет на нахождение посторонних лиц |
| Опасность травмирования, в том числе в результате выброса подвижной обрабатываемой детали, падающими или выбрасываемыми предметами, движущимися частями оборудования, осколками при обрушении горной породы | | | Неприемлемый | |
| Опасность повреждения мембранной перепонки уха, связанная с воздействием шума высокой интенсивности | | | Неприемлемый | Использование СИЗ (вкладыши, беруши) во время работы |
| Опасность, связанная с выбросом пыли | | | Высокий | Поливание участка буровых работ водой перед началом работ |

опасности, обусловленные выбрасыванием осколков горной массы, выбросами пыли и шумовым воздействием. Первоочередные мероприятия по улучшению условий труда должны быть направлены на ликвидацию этих неблагоприятных факторов.

**Библиографический список**

1. Десять стран – самый большой золотой запас в мире // Goldomania [Электронный ресурс]. URL: http://goldomania.ru/menu_002_010.html/ (20.12.2019).

2. Эффективный инструмент охраны труда // SRG-ECO Group of companies [Электронный ресурс]. URL: https://www.srgroup.ru/mass-media/srg-smi/effektivnyy-instrument-okhrany-truda/ (10.01.2020).

3. Мартынов А.В. Применение риск-ориентированного подхода при осуществлении государственного контроля и надзора как необходимое условие снижения давления на бизнес // Юрист. 2016. № 18. С. 22–27.

4. Егорова Н. Три года без проверок // Информационный бюллетень «Экспресс-бухгалтерия». 2015. № 29. С. 11–13.

5. Бабич М.Е. Риск-ориентированный подход при осуществлении государственного экологического надзора // Справочник эколога. 2017. № 11 (59). С. 74–75.

6. Фейнберг А. Гильотина от правительства: как власти хотят снизить требования к бизнесу // Rbc [Электронный ресурс]. URL: https://www.rbc.ru/economics/15/01/2019/5c3df76f9a7947214d11adcf/ (10.02.2020).

7. Александров О.В. «Регуляторные гильотины»: международный опыт устранения препятствий для бизнеса и инвестирования // Торговая политика. 2019. № 1 (17). С. 107–119.

8. Тимофеева С.С., Мурзин М.А. Профессиональные риски горнодобывающих предприятий Байкальского региона // Безопасность

в техносфере. 2014. Т. 3. № 3. С. 37–42. https://doi.org/10.12737/4940

9. Тимофеева С.С. Современные методы оценки профессиональных рисков и их значение в системе управления охраной труда // XXI век. Техносферная безопасность. 2016. № 1 (1). С. 14–23.

10. Бухтияров И.В., Головкова Н.П., Чеботарев А.Г., Сальников А.А., Николаев С.П. Условия труда, профессиональная заболеваемость на предприятиях открытой добычи руд // Медицина труда и промышленная экология. 2017. № 5. С. 44–49.

11. Аверин В.А., Смехнева О.В., Машустина Э.М. Риск-ориентированная модель охраны труда в ОАО «Лебединский ГОК» // Медицина труда и промышленная экология. 2015. № 9. С. 16–18.

12. Castelo Branco J., Rebbah R., Duarte J., Baptista J.S. Risk assessment in the open pit mining industry – a short review // Occupational and Environmental Safety and Health. Studies in Systems, Decision and Control / eds. P. Arezes, et al. Vol. 202. Springer: Cham, 2019. P. 13–21.

13. Badri A., Nadeau S., Gbodossou A. A mining project is a field of risks: a systematic and preliminary portrait of mining risks // International Journal of Safety and Security Engineering. 2012. Vol. 2. No. 2. P. 145–166.

14. Vinnikov D. Drillers and mill operators in an open-pit gold mine are at risk for impaired lung function // Journal of Occupational Medicine and Toxicology. 2016. Vol. 11. Iss. 27. https://doi.org/10.1186/s12995-016-0114-9

15. Vinnikov D., Blanc P.D., Brimkulov N., Redding-Jones R. Five-year lung function observations and associations with a smoking ban among healthy miners at high altitude (4000 m) // Journal of Occupational and Environmental Medicine. 2013. Vol. 55. Iss. 12. P. 1421–1425. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3182a641e7

**References**

1. Ten countries: the worlds' biggest gold stock. *Goldomania.* Available from: http://goldomania.ru/menu_002_010.html/ [Accessed 20th December 2019]. (In Russ.)

2. Effective tool of occupational safety. *SRG-ECO Group of companies.* Available from: https://www.srgroup.ru/mass-media/srg-smi/effektivnyy-instrument-okhrany-truda/ [Accessed 10th January 2020]. (In Russ.)

3. Martynov AV. Application of a risk-oriented approach while exercising state control and supervision, as necessary condition for reduction of pressure on business. *Jurist.* 2016;18:22–27. (In Russ.)

4. Egorova N. Three years without audit. *Informatsionnyi byulleten' "Ekspress-bukhgalteriya"*. 2015;29:11–13. (In Russ.)

5. Babich ME. Risk-oriented approach in state environmental supervision. *Spravochnik ekologa*. 2017;11:74–75. (In Russ.)

6. Feinberg A. "Governmental guillotines": how the authorities try to lower the requirements to business. *Rbc*. Available from: https://www.rbc.ru/economics/15/01/2019/5c3df76f9a7947214d11adcf/ [Accessed 10th February 2020]. (In Russ.)

7. Aleksandrov OV. "Regulatory guillotines": international experience in removing barriers to business and investment. *Trade policy*. 2019;1:107–119. (In Russ.)

8. Timofeeva SS, Murzin MA. Professional risks of mining industry in the Baikal region. *Bezopasnost' v tekhnosfere* = Safety in Technosphere. 2014;3(3):37–42. (In Russ.) https://doi.org/10.12737/4940

9. Timofeeva SS. Modern professional risk assessment methods and their role in labor protection management system. *XXI vek. Tekhnosfernaya bezopasnost'* = Technosphere Safety. XXI Century. 2016;1:14–23. (In Russ.)

10. Bukhtiyarov IV, Golovkova NP, Chebotarev AG, Salnikov AA, Nikolaev SP. Work conditions, occupational morbidity on open-cast ores extraction enterprises. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2017;5:44–49. (In Russ.)

11. Averin VA, Smekhneva OV, Mashustina EM. Risks oriented occupational safety model in "Lebedinsky GOK". *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya* = Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology. 2015;9:16–18. (In Russ.)

12. Castelo Branco J, Rebbah R, Duarte J, Baptista JS. Risk assessment in the open pit mining industry – a short review. In: Arezes P, et al. (eds.). *Occupational and Environmental Safety and Health. Studies in Systems, Decision and Control*. Vol. 202. Springer: Cham; 2019. p.13–21.

13. Badri A, Nadeau S, Gbodossou A. A mining project is a field of risks: a systematic and preliminary portrait of mining risks. *International Journal of Safety and Security Engineering*. 2012;2(2):145–166.

14. Vinnikov D. Drillers and mill operators in an open-pit gold mine are at risk for impaired lung function. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2016;11(27). https://doi.org/10.1186/s12995-016-0114-9

15. Vinnikov D, Blanc PD, Brimkulov N, Redding-Jones R. Five-year lung function observations and associations with a smoking ban among healthy miners at high altitude (4000 m). *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2013;55(12):1421–1425. https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e3182a641e7

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Тимофеева С.С., Дроздова И.В., Тимофеев С.С. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Svetlana S. Timofeeva, Irina V. Drozdova, Semen S. Timofeev 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Тимофеева Светлана Семеновна,**
доктор технических наук, профессор,
зав. кафедрой промышленной экологии
и безопасности жизнедеятельности,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: timofeeva@istu.edu
**Svetlana S. Timofeeva,**
Dr. Sci. (Eng.), Full Professor,
Head of the Department of Industrial Ecology and Life Safety,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
✉ e-mail: timofeeva@istu.edu

**Дроздова Ирина Владиславовна,**
магистрант,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ibzhevskaya@mail.ru
**Irina V. Drozdova**
Master Degree Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ibzhevskaya@mail.ru

**Тимофеев Семен Сергеевич,**
старший преподаватель кафедры промышленной экологии
и безопасности жизнедеятельности,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательсий технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: samtim@mail.ru
**Semen S. Timofeev,**
Senior Lecturer, Department of Industrial Ecology and Life Safety,
Institute of Subsoil Use,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: samtim@mail.ru

**Оригинальная статья / Original article**
**УДК 551.4.022**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-256-270**

# Условия формирования основных экзогенных процессов в юго-западной части Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточной части Южно-Китайского блока (Китай)

**© Л.И. Аузина[a], Юнчжань Чжан[b], А.О. Устюжанин[c], И.А. Ярощук[d], О.С. Масликов[e], К.К. Ковтун[f]**
[a,c–f]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия
[b]Нанкинский университет, г. Нанкин, Китай

***Резюме:*** Целью работы являлся анализ и сопоставление причин и условий формирования экзогенных процессов юго-западной части Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточной части Южно-Китайского блока (Китай) с акцентом на процессы выветривания, а также процессы гравитационные и связанные с деятельностью поверхностных вод. В качестве ключевого участка в Байкальской рифтовой системе принята территория Тункинской зоны. Объектом для сопоставления явилась восточная часть Южно-Китайского блока, в пределах которого расположены основные точки наблюдения, приуроченные к дельте р. Янцы и прилегающим к ней территориям. Основные методы исследования – это полевые маршруты с визуальным обследованием точек наблюдения и замерами отдельных характеристик и параметров, подбор и анализ опубликованной и фондовой литературы. В результате сравнения геодинамических процессов, формирующихся на исследуемых территориях, был сделан вывод о том, что наиболее распространенными на обеих территориях являются выветривание и гравитационные процессы, в данном случае оползнеобразование. На интенсивность процессов в первую очередь оказывает влияние резкорасчлененный рельеф. Различия обусловлены климатическими особенностями регионов, в том числе разным уровнем осадков, температурными перепадами, а также степенью сейсмичности, наличием ледниковых форм и ландшафтными особенностями, что в совокупности предопределяет селевую активность Тункинской ветви рифтовых впадин и ее почти полное отсутствие в дельте р. Янцзы. Анализ выделенных факторов позволяет прогнозировать вероятность возникновения таких экзогенных процессов, как оползни и сели, и своевременно предпринимать меры по минимизации их негативных воздействий. Отсутствие крупномасштабных карт, отражающих опасные территории, и надлежащего контроля по выделению земель, заведомо нуждающихся в защите от воздействия геодинамических процессов, с каждым годом приводит к расширению зон опасностей и рисков как в восточной части Китая, так и по всему Байкальскому региону России.

***Ключевые слова:*** экзогенные процессы, выветривание, оползни, сели, Байкальский регион, восточная часть Китая

***Благодарности:*** Коллектив авторов выражает благодарность за профессиональную помощь и поддержку профессору Р.М. Лобацкой и ассистенту А.А. Войтюк.

***Информация о статье:*** Дата поступления 06 февраля 2020 г.; дата принятия к печати 11 марта 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Аузина Л.И., Чжан Юнчжань, Устюжанин А.О., Ярощук И.А., Масликов О.С., Ковтун К.К. Условия формирования основных экзогенных процессов в юго-западной части Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточной части Южно-Китайского блока (Китай). *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 256–270. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-256-270

# Conditions of the formation of the main exogenous processes in the southwest part of the Baikal rift system (Russia) and in the eastern part of the south China block (China)

**© Larisa I. Auzina[a], Yongzhan Zhang[b], Alexandr O. Ustyuzhanin[c], Ilya A. Yaroshchuk[d], Oleg S. Maslikov[e], Ksenia K. Kovtun[f]**
[a,c–f]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia
[b]Nanjing University, Nanjiing, China

***Abstract:*** The aim of the study is to analyze and compare the causes and conditions for the formation of the exogenous processes in the southwestern part of the Baikal rift system (Russia) and in the eastern part of the South China block (China) with the emphasis on the weathering, gravitational and surface-water processes. The Tunka rift zone is taken as the main site. It is compared with the eastern part of the South China block where the main observation points are associated with the Yangtze River delta and adjacent territories. The main research methods include field routes with visual examination of the observation points and measurement of certain characteristics and parameters, as well as selection and analysis of the published and archive literary sources. The comparison of the geodynamic processes emerging in the study territories has concluded that the dominant processes are weathering and gravitational processes, namely, landslide formation. The intensity of the processes is primarily determined by the sharply broken relief. The differences between the two study regions are determined by the climatic peculiarities including the precipitation level and temperature change, as well as by the seismicity, the presence of the glacier forms, and the landscape features. The combination of the above factors predetermines the wet landslide activity of the Tunka branch of the rift depressions vs. almost none of the kind in the Yangtze River delta. The analysis of the defined factors makes it possible to predict exogenous processes such as landslide and mudslide, and take timely measures on minimizing the negative impact of the above. The lack of the large scale maps showing the danger zones and adequate control of identifying the land areas that are knowingly in need of protection from the geodynamic processes' impact, are increasingly leading to the extension of the danger zones and associated risk both in the eastern part of China and throughout the Baikal region.

***Keywords:*** exogenous processes, weathering, landslide, mudslide, Baikal region, Eastern China

***Acknowledgements:*** The authors highly appreciate the professional assistance and support of Professor Raisa Moiseevna Lobatskaya and Assistant Professor Alena Alexandrovna Voityuk.

***Information about the article:*** Received February 06, 2020; accepted for publication March 11, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Auzina LI, Zhang Yongzhan, Ustyuzhanin AO, Yaroshchuk IA, Maslikov OS, Kovtun KK. Conditions of the formation of the main exogenous processes in the southwest part of the Baikal rift system (Russia) and in the eastern part of the south China block (China). *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):256–270. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-256-270

## Введение

Современные экзогенные процессы наиболее широко развиваются в геодинамически нестабильных регионах. Таковыми являются юго-западная часть Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточная часть Южно-Китайского блока (Китай). Экзогенные процессы происходят на поверхности Земли под влиянием подземных и поверхностных вод, сил гравитации, промерзания и оттаивания грунтов, климатических факторов, обусловливающих выветривание. Они оказывают значительное влияние на формирование современных рельефа и ландшафтов, являются важным фактором природного риска, часто негативно сказываясь на социуме, экономике и экосистемах. Таковы, например, крупные деформации склонов, связанные с сильнейшими землетрясениями, сопровождающимися активизацией оползней, обвалов, лавин, осыпей и вызывающие катастрофические сели в пределах сейсмически активных районов и прилегающих территорий. Анализ факторов, способствующих возникновению данных процессов, позволяет минимизировать их разрушительное действие, а иногда и предупредить их возникновение.

В сентябре 2019 г. ознакомиться с экзогенными процессами и проанализировать причины, которые повлияли на их возникновение, представилась возмож-

ность студентам Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия) в рамках учебной геологической практики на базе Нанкинского университета (Китай). При этом перед ними стояла задача сопоставления экзогенных процессов, формирующихся на территории Тункинской рифтовой зоны, с аналогичными явлениями на территории Южно-Китайского блока.

Целью данной работы является анализ и сопоставление причин и условий формирования экзогенных процессов в юго-западной части Байкальской рифтовой системы (Россия) и восточной части Южно-Китайского блока (Китай).

**Объекты исследования**

Объектами исследования явились процессы выветривания, гравитационные процессы и процессы, связанные с деятельностью поверхностных вод.

Байкальская рифтовая система – глубинный разлом земной коры в континентальной части Евразии протяженностью около 1500 км, простирающийся с юго-запада на северо-восток. Территория приурочена к сочленению Байкало-Саянской складчатой области и Сибирской платформы. Байкало-Саянская складчатая область представлена породами архейского, протерозойского и кембрийского возрастов. Пониженные участки перекрыты четвертичными отложениями (рис. 1) [1].

Байкальский регион характеризуется высокой сейсмической активностью, наличием разновременных вулканических структур и подземных вод различной температуры, приуроченных к системам приповерхностных и глубоких разломов. Более детально рассмотрена территория Тункинской рифтовой зоны, входящая в состав Байкальской рифтовой системы. Тункинская ветвь ограничена с юга достаточно пологим кулисообразным Хамар-Дабанским сбросом, а с севера – крутым тектоническим эскарпом Тункинского разлома[1] [2], к которому приурочена значительная часть наиболее мощных сейсмических событий в Байкальском регионе. Климат – резко континентальный с весьма значительным перепадом температур: от +36 °С летом до -45 °С зимой. Годовая сумма осадков зависит от орографических условий и составляет 450–500 мм в гольцах, снижаясь до 300 мм в котловинах. Горная геосистема имеет альпийский крутосклонный рельеф, формирование которого сопряжено с воздействием тектонических процессов, связанных с развитием Байкальской рифтовой системы. Широкое распространение

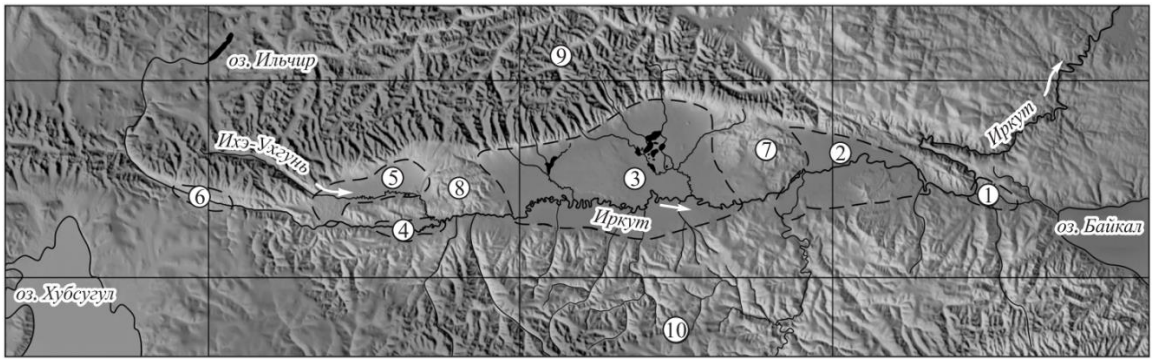



***Рис. 1. Схема Тункинской рифтовой зоны и ее горного обрамления (SRTM) [1]:***
*впадины: 1 – Быстринская, 2 – Торская, 3 – Тункинская, 4 – Туранская, 5 – Хойтогольская, 6 – Мондинская; междувпадинные перемычки: 7 – Еловский отрог, 8 – Ниловский отрог; хребты: 9 – Тункинские гольцы, 10 – Хамар-Дабан*

***Fig. 1. Scheme of the Tunka rift zone and the surrounding mountains [1]:***
*depressions: 1 – Bystrinskaya, 2 – Torskaya, 3 – Tunkinskaya, 4 – Turan, 5 – Khoytogolskaya, 6 – Mondinskaya; inter-depression connections: 7 – Elovsky spur, 8 – Nilovsky spur; ranges: 9 – Tunkinsky peaks, 10 – Khamar-Daban*

[1] Лобацкая Р.М., Мац В.Д., Аузина Л.И., Шиленков В.Г., Лиштва А.В. Международная полевая практика на Байкале. География, геология, зоология, ботаника: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 184 с.

получили гольцовые альпинотипные системы с проявлениями гляциального рельефа. Гольцовый пояс представлен, как правило, горно-тундровыми ландшафтами, ниже, на склонах, распространены каменистая, осоково-моховая, лишайниковая и щебенисто-лишайниковая тундровая растительность. Верхние части склонов заняты преимущественно лиственнично-редколесной фацией [3].

Объектом сравнения является восточная часть Южно-Китайского блока, к которой в орографическом отношении приурочена Южно-Китайская платформа, простирающаяся от Пекина до дельты р. Янцзы и прерывающаяся лишь магматическими провинциями Шаньдуньского полуострова. Южно-Китайский блок является сейсмически спокойным в отличие от Северо-Китайского: главные деформации земной коры, основная сейсмичность и большинство землетрясений восточной части Китая происходят в Северо-Китайском блоке. Климат – субтропический, температуры – от +35 °С летом до -10 °С зимой. Наибольшее количество осадков – до 180 мм – выпадает в июле, наименьшее – 32 мм – в декабре. К югу от р. Янцзы ландшафт в основном горный с преобладанием осадочных отложений и отложений кратона Янцзы [4].

Исследуемая территория входит в Восточно-Азиатскую флористическую область. Во многом особенности флоры Китая определяются тем, что территория страны не подвергалась четвертичным оледенениям и не заливалась океаном после триаса, то есть древняя флора развивалась практически беспрепятственно, сохранив вплоть до настоящего времени много третичных элементов. Среди растительности преобладают деревья и кустарники, соответствующие поясу субтропических лесов, в горных районах распространены многочисленные хвойные и листопадные виды.

Формирование восточной части Китая произошло в результате коллизии Индо-Австралийской и Евразийской плит, а также субдукции Тихоокеанской и Евразийской плит. Это привело к растяжению верхней части земной коры и образованию основных тектонических и геоморфологических элементов исследуемой территории (рис. 2) [5].

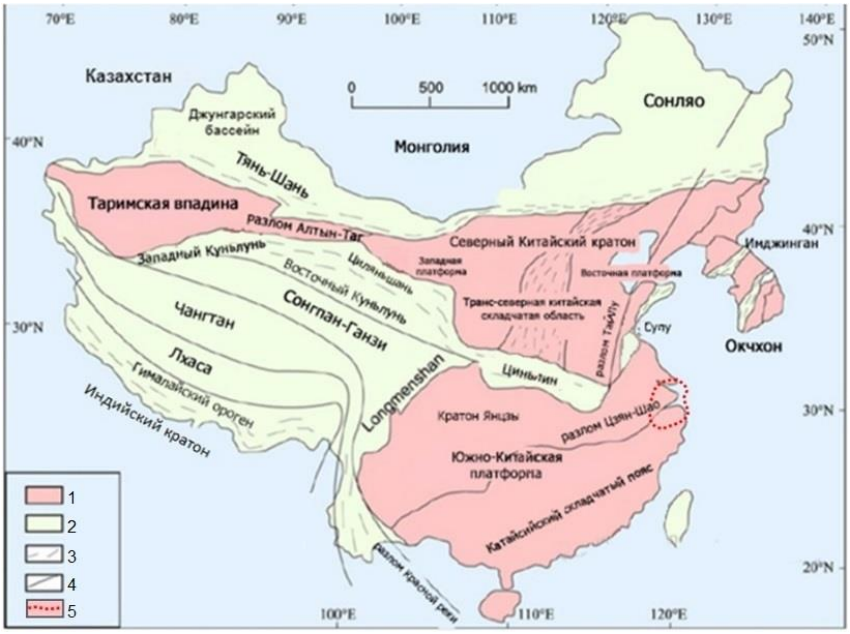



***Рис. 2. Схематическая структурно-тектоническая карта Китая [6]:***
*1 – докембрийская кратоническая плита; 2 – фанерозойская складчатая область; 3 – структурные зоны; 4 – основной разлом; 5 – контур исследуемой площади*
***Fig. 2. Schematic structural-tectonic map of China [6]***
*1 – Pre-Cambrian cratonic plate; 2 – Phanerozoic folded area; 3 – structural zones; 4 – main fault; 5 – the study area contour*

Районы исследования находились в дельте р. Янцзы и на прилегающих к ней территориях, основные из них – горы Циюньшань (Белые горы), Цзыцзиньшань (Пурпурная гора) и Хуаншань (Жёлтые горы) (рис. 3).

**Методы исследования**

В процессе прохождения практики и во время дальнейшей обработки полученных материалов использовались следующие методы исследований:

– полевые маршруты с визуальным обследованием точек наблюдения и с замерами отдельных характеристик и параметров;

– подбор и анализ опубликованной и фондовой литературы.

**Результаты исследования**

В ходе работы были выделены и описаны наиболее распространенные на обеих территориях геодинамические процессы, происходящие в результате выветривания, действия сил гравитации и поверхностных вод.

Выветривание – это процесс разрушения горных пород под воздействием климатических факторов, в результате которого формируется зона экзогенной трещиноватости. Различные физические свойства пород, а следовательно, и их устойчивость к выветриванию, формирует современный рельеф исследуемых территорий, что явственно отражается на внешнем облике обоих исследуемых регионов.

Тункинские гольцы, продолжающие свой рост и имеющие абсолютные отметки в районе Тункинской долины от 1500 до 2500 м, характеризуются превышениями над днищем долины в 800–1400 м. Горное сооружение сложено преимущественно кристаллическими сланцами и гранитами. Наиболее хорошо выветриваемы кристаллические сланцы, более стойки граниты, которыми и сложены останцы в горноскладчатой системе. Значительную роль в формировании рельефа сыграли скопления льда, формирующиеся в горных впадинах в ледниковые периоды и препятствующие осадконакоплению на локальных площадях в постледниковый период. В итоге образовались характерные структуры – цирки, называемые каррами и разделенные хорошо выраженными гребнями – карлингами (рис. 4).

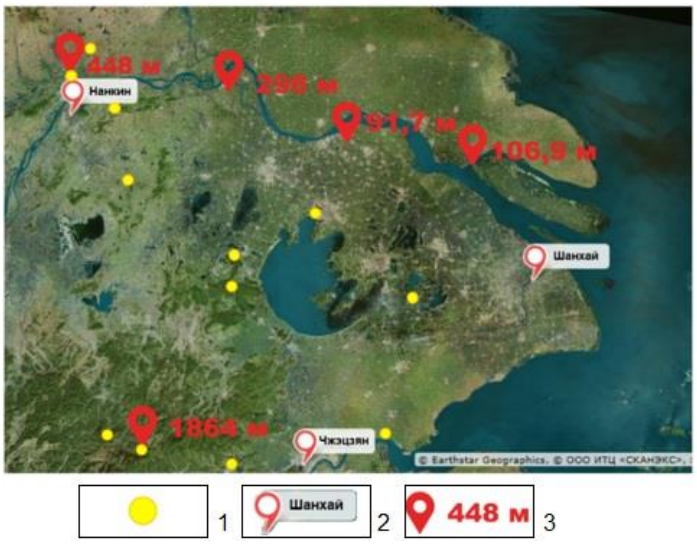



***Рис. 3. Регион исследований с основными точками наблюдения (фото с ресурса Яндекс.Карты, дополненное авторами)***

*1 – точки наблюдений; 2 – города, составляющие «золотой треугольник дельты р. Янцзы»; 3 – абсолютные отметки*

***Fig. 3. The study area with the main observation points (photo from Yandex.Maps website; supplemented by the authors)***

*1 – observation points; 2 – cities forming the "golden triangle of the Yangtze delta"; 3 – absolute marks*

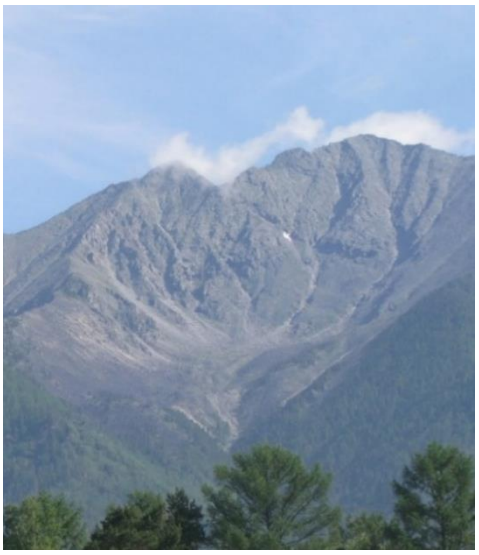


***Рис. 4. Тункинские гольцы (фото автора Л.И. Аузиной)***
***Fig. 4. Tunka peaks (photo by Larisa I. Auzina)***

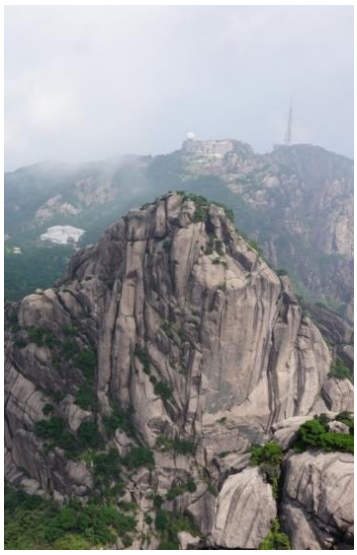


***Рис. 5. Останцы в горах Хуаншань (Жёлтые горы) (фото авторов)***
***Fig. 5. Huangshan (Yellow Mountains) peaks (photo by the authors)***

Во многом сходная ситуация сложилась в горах Хуаншань (Жёлтые горы) (восточная часть Китая). Абсолютные отметки их варьируют от 630 до 1864 м над уровнем моря. Горы, покрытые хвойной растительностью, сформировались в мезозойскую эру. Генетические предпосылки формирования рельефа этой территории, в целом связанные с коллизией Индостана и Евразии, до сих пор вызывают споры ученых и сводятся к двум основным позициям:

1. В среднеплейстоценовый период первоначальный рельеф был преобразован под воздействием ледников, явившихся причиной возникновения гранитных останцов различной формы [7, 8] (рис. 5).

2. На территории выделяются четыре палеоденудационные поверхности: высота первой поверхности, сформировавшейся в олигоцене, составляет 1600–1800 м над уровнем моря; высота второй поверхности, сформировавшейся в плиоцене, – 1200–1500 м; еще две поверхности образованы в четвертичном периоде и имеют отметки 1100–1200 м. Позднее потоки поверхностных вод размыли глубокие каньоны по тектонически ослабленным зонам и сформировали срединные горы [9].

Под действием сил гравитации формируются такие широко распространенные явления, как оползни. Они представляют собой движущуюся массу горных пород, состоящую обычно из рыхлого грунта, который не способен выдерживать нагрузку собственного веса, из-за чего и происходит его смещение. Данное геологическое явление очень опасно, поскольку подобные массы горных пород могут погребать под собой различные объекты, в том числе инженерные.

Увлажнение и размытие горных пород дождевой водой является наиболее частой причиной оползней. В результате этого грунт становится более тяжелым и подвижным, происходит его смещение под воздействием собственного веса [10].

Оползни возникают на склонах долин или речных берегов, в горах, на берегах морей. Наиболее часто они формируются на склонах, сложенных чередующимися водоупорными и водоносными породами. Если водоупорные слои сложены глиной, то при намокании во время обильных дождей глина становится скользкой. Силы трения, обеспечивающие сцепление грунтов или горных пород на склонах, оказываются меньше силы тяжести, и вся масса горной породы приходит в движение [11].

Оползни – типичные явления для Байкальского региона, они происходят с высокой частотой в летний период времени. Показательным примером является случай, когда в июле 1971 г. в период выпадения интенсивных осадков на участке протяженностью в 80 км между станциями Байкал и Култук произошло около 100 обвалов-оползней объемом от 5 до 1000 м$^3$ [12]. Еще один пример – это оползень, сошедший 27–28 июля 2019 г. на двух участках федеральной трассы Р-258 «Байкал»: на 155-м километре в Слюдянском районе в результате проливных дождей обрушилась часть склона горного массива (рис. 6) [13]. Угол склонового откоса на этом участке составляет около 60°. В летний период времени в данном регионе выпадает около 40 % осадков от их общего годового количества – до 240 мм из суммарных 560 мм в год. Очевидно, что основной причиной, которая привела к нарушению устойчивости массива грунта в откосах, являлось снижение механических характеристик (внутреннего угла трения и коэффициента сцепления) и увеличение объемного веса грунта в результате его обводнения. Таким образом, из-за сильных дождей произошло увлажнение и размытие горных пород дождевой водой. В результате этого грунт стал более тяжелым и подвижным и произошло его смещение.

Что касается Китая, то две трети территории страны занимают горно-складчатые сооружения, в связи с чем широкое распространение получили разнообразные склоновые процессы, в том числе и оползни. Формированию последних способствуют сильная расчлененность рельефа, состав горных пород, гидрологический режим, большая интенсивность ливневых осадков, выпадающих единовременно, хозяйственная деятельность человека [14].

Средняя плотность развития склоновых процессов на территории Китая к югу от р. Янцзы составляет 30–100 случаев на 1000 км$^2$, максимальна она в бассейне р. Байлунцзян в Сино-Тибетских горах; в восточных районах частота склоновых процессов уменьшается до 10–30 случаев на 1000 км$^2$ [15]. Таким образом, оползневая активность более характерна для южной, юго-западной и центральной частей Китая, что связано со значительной расчлененностью рельефа районов. Например, одним из наиболее разрушительных был оползень, произошедший 12 мая 2008 г. в уезде Вэньчуан в результате землетрясения. Примерно через 10 минут после землетрясения масса грунта обрушилась с высоты 980 м до высоты 660 м в объеме $14 \cdot 10^5$ м$^3$ менее чем за 10 секунд [16].

***Рис. 6. Оползень в Слюдянском районе, восточный берег Южно-Байкальской котловины Байкальского региона [13]***
***Fig. 6. Landslide in Slyudyansky district, eastern coast of the South Baikal basin, Baikal region [13]***

В восточной части Китая также имеет место формирование оползней, но в гораздо меньших количествах и масштабах. Так, например, во время полевой практики на территории восточной части Китая наблюдался оползень, сформировавшийся на южном склоне горы Цзыцзиньшань (Пурпурная гора). Годовая норма осадков в районе составляет около 700 мм в год. Здесь фиксируются отметки до 448 м над уровнем моря. Основной материал, слагающий оползневое тело, – это песчаники и аргиллиты. Угол склона достигает 45°. Внешний вид растительности свидетельствует о современном его формировании. В качестве инженерной защиты от схода данного оползня – в роли подпорной стенки – выступает деревянный забор (рис. 7).

Одними из наиболее распространенных являются геодинамические процессы, связанные с поверхностными водами, в том числе селеформирование. Сель – это внезапно формирующийся грязекаменный поток, в котором присутствует большой объем обломков горных пород, камней, минеральных частиц и др.

Главными условиями, от которых зависит образование селей, являются:

– климатические и микроклиматические условия района, с которыми связано неравномерное распределение осадков, образование ливней, накопление снега и ледников и бурное их таяние в определенные весенне-летние периоды;

– геоморфологические условия, определяющие размеры и форму водосборных бассейнов, высотное их положение, уклоны поверхностей рельефа и строение долин горных рек и временных водотоков;

– геологические условия, определяющие накопление рыхлого материала в водосборных бассейнах или в некоторых их частях, развитие разнообразных геологических процессов (выветривание, гравитационные и др.), участвующих в образовании этого материала, а также древние, новейшие и современные тектонические движения.

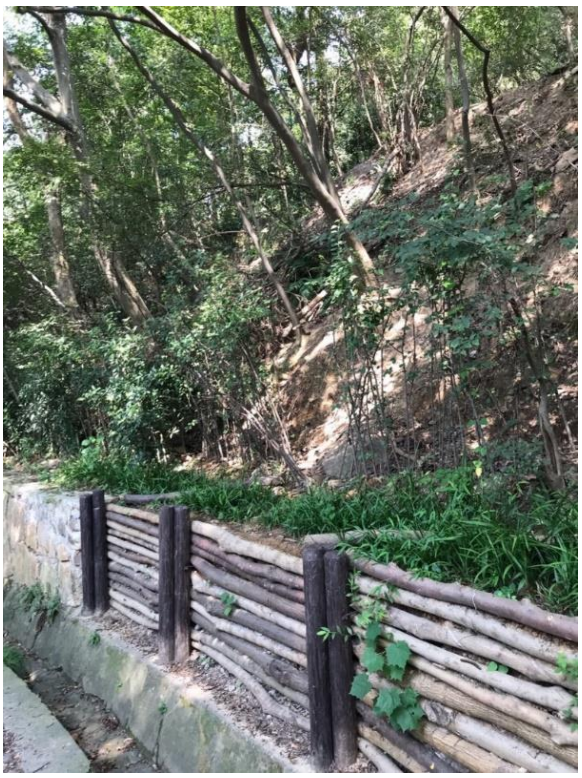


***Рис. 7. Оползень на южном склоне горы Цзыцзиньшань (Пурпурная гора) (фото авторов)***
***Fig. 7. Landslide on the southern slope of Zijin Shan (Purple Mountain) (photo by the authors)***

Весьма широко процесс селеформирования развит в пределах Тункинской рифтовой зоны. Пример тому – грязекаменный поток, сошедший со склонов Тункинских гор 28 июня 2014 г. в районе пос. Аршан (рис. 8). Селевый поток, достигший курортной и жилой зон, был сложен аллювиальными, делювиальными и пролювиальными отложениями мощностью до 6 м, представленными валунно-гравийными образованиями различной степени окатанности с большим количеством песчано-глинистого заполнителя (см. рис. 8). Материал был плохо отсортирован, что указывает на большую скорость потока. Ширина селевого потока составляла 250 м, постепенно увеличивалась при подходе к курорту «Саяны» до 350 м (без учета песчано-суглинистых отложений). Общая мощность отложений составила 4,5–6 м. Видимая длина – 1,5–2 км [17]. В ночь с 27 на 28 июня 2014 г. селевые потоки в районе пос. Аршан были сформированы вследствие выпадения обильных осадков в горах. Ливневый фронт имел локальный характер, был сконцентрирован в межгорной впадине долины р. Кынгарга, о чем свидетельствуют данные метеостанции Тунка, находящейся в 28 км южнее места событий, согласно которым зафиксированное количество осадков в это время (27–28 июня 2014 г.) не превысило норму и составило 7 мм [18].

Зависимость формирования селей от геологического строения заключается в том, что метаморфические породы при выветривании распадаются на фракции, размеры которых изменяются от мелких до крупных обломков, которые во время паводков легко вовлекаются в потоки и в общей массе транспортируются селями. В тех бассейнах, где распространены граниты, при выветривании распадающиеся на обломки, наиболее крупные из которых достигают 3–6 м в диаметре, а мелкие представлены дресвой, сели отсутствуют. Источниками рыхлообломочного материала для селей в Прибайкалье являются оползни-сплывы, оползни-блоки, обвалы и осыпи [12].

На территории Китая более 80 % всех селевых потоков формируется в восточных районах Юньнаньского нагорья, горных районах западной части Сычуаньской котловины (в 1980 г. в 50 уездах произошло более 1000 селей), в горном районе Циньлин – Дабешань, на восточных окраинах Цинхай-Тибетского плато, в горах юга провинции Ляонин и в бассейне р. Байлунцзян в провинции Ганьсу [14].

***Рис. 8. Результат схода селя в пос. Аршан (фото автора Л.И. Аузиной)***
***Fig. 8. The result of the mudslide in the village of Arshan (photo by Larisa I. Auzina)***

Как показывает анализ литературных источников, селевые потоки для восточной части Китая не характерны, это подтверждают и результаты полевых работ. Вероятнее всего, данный факт связан с тем, что климатические, геоморфологические и геологические факторы селеформирования в этом районе выражены в меньшей степени, в частности здесь нет резких перепадов температуры, не выражены формы рельефа, благоприятные для накопления обломочного материала, сформировавшегося в результате выветривания, в том числе ледниковые формы.

**Обсуждение результатов**

Таким образом, основными факторами, предопределяющими интенсивность экзогенных процессов как в горном обрамлении Тункинской котловины, так и в горах Восточного Китая, являются (таблица):

– высокая степень расчлененности рельефа;

– интенсивность развития дизъюнктивных нарушений (наиболее мощное выветривание происходит по разуплотненным породам зон разломов);

– особенности литологического строения (в наибольшей степени выветриванию подвержены осадочные породы, значительно меньше – интрузивные тела);

– климат (важно количество атмосферных осадков, перепад температурного режима, физико-химическое взаимодействие горных пород с кислородом воздуха и поверхностными водами);

– растительный покров и корневая система растений[2].

**Сопоставление основных факторов формирования геодинамических процессов в рассматриваемых регионах**
**Comparison of the study regions: the main factors of the geodynamic processes formation**

| Фактор | Байкальская рифтовая система, Тункинская долина | Восточная часть Южно-Китайского блока, гора Цзыцзиньшань (Пурпурная гора) |
|---|---|---|
| Абсолютные отметки, м | 1500–2500 | 30–418 |
| Перепад высот, м | 1000 | 388 |
| Климат | Резко континентальный | Субтропический |
| Температура, °С | -45…+36 | -10…+35 |
| Среднегодовая норма осадков, мм/год | 367 | 700 |
| Сейсмичность | Высокосейсмичный район | Асейсмичная зона |
| Геологическое строение | Кристаллические сланцы, граниты | Граниты |
| Рельеф | Резкорасчлененный | Горный |
| Ландшафт | Горно-тундровый | Горно-лесной |
| Наличие ледниковых форм | Присутствуют | Отсутствуют |
| Растительность | Отсутствие растительности в результате преобладания гольцов | Широкое развитие тропических и хвойных лесов по всему горно-складчатому комплексу |
| Ведущие геодинамические процессы | Выветривание, оползни, сели | Выветривание |

[2] Лобацкая Р.М., Мац В.Д., Аузина Л.И., Шиленков В.Г., Лиштва А.В. Международная полевая практика на Байкале. География, геология, зоология, ботаника: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 184 с.

Наиболее распространенным на исследуемых территориях процессом, причины формирования которого на этих территориях сходны, является выветривание.

Развитие оползней зависит от морфологического облика рельефа, геологического строения, тектонической раздробленности и скорости выветривания коренных пород [12]. Для Байкальского региона характерна высокая оползневая активность. В восточной части Китая этот процесс выражен в меньшей степени. Как отмечалось выше, при формировании оползней большое значение имеет состав пород, слагающих разрез верхней части земной коры. Наибольшее количество оползневого материала представлено легко размываемыми песчано-глинистыми отложениями и сланцами, то есть осадочными породами. В меньшей степени разрушаются магматические и метаморфические породы. Песчаные отложения, находящиеся в различном сочетании с алевролитами, сланцами, гравелитами, конгломератами (восточный берег Южно-Байкальской котловины, Байкальская рифтовая система) и переслаивание песчаников с аргиллитами (южный склон горы Цзыцзиньшань, Южно-Китайский блок) являются основой для оползневой активности в регионах. В дополнение к литологии периодические ливневые осадки, высокая влажность и крутизна склонов также способствуют образованию оползней.

Резкая расчлененность рельефа, сейсмическая активность, интенсивность накопления рыхлого осадочного материала, образующегося в результате выветривания, крутизна склонов гор, наличие ледниковых каров и катастрофическое единовременное выпадение осадков инициируют сход селей на территории Тункинской рифтовой зоны. На территории восточной части Китая складывается иная ситуация: селеформирование там практически не наблюдается. Несмотря на то, что количество осадков здесь значительно выше, чем в Байкальском регионе, остальные факторы селеформирования выражены в значительно меньшей степени.

## Заключение

Формирование опасных геологических процессов происходит в результате сложного взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов, определяющих повторяемость, структуру и динамику их развития в зависимости от высокой сейсмотектонической активности, морфологического и геологического строения, климатических особенностей [12].

Сравнивая основные геолого-геоморфологические характеристики Байкальского района и района дельты р. Янцзы, можно сделать вывод о том, что интенсивный процесс выветривания характерен для обеих территорий, широко развитый в Тункинской зоне процесс оползнеобразования менее характерен для восточного Китая. Климатические особенности, в том числе различный уровень единовременных осадков, сейсмичность, наличие ледниковых форм и отсутствие мощной склоновой растительности, обусловливают селевую активность в Тункинских гольцах в районе Тункинской зоны и ее отсутствие в восточной части Китая.

Отсутствие крупномасштабных карт, отражающих опасные территории, и надлежащего контроля по отводу земель, заведомо нуждающихся в защите от геологических процессов, с каждым годом приводит к все большему расширению зон опасностей и рисков как в Восточной части Китая, так и по всему Байкальскому региону. Анализ реальной ситуации, фрагмент которого представлен в статье, позволяет прогнозировать вероятность возникновения таких опасных экзогенных процессов и своевременно предпринимать меры по минимизации их негативных воздействий, а также может быть основой для составления генетико-морфологических инженерно-геологических карт.

**Библиографический список**

1. Щетников А.А. Проявление гобийского механизма горообразования в Байкальской рифтовой зоне (на примере Тункинского рифта) // География и природные ресурсы. 2008. № 3. С. 31–35.

2. Диденков Ю.Н., Аузина Л.И. Гидротермальные системы различных окраин литосферных плит // Геотермальная вулканология, гидрогеология, геология нефти и газа: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. уч. «Geothermal Volcanology Workshop 2019». Петропавловск-Камчатский: Изд-во ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 35–38.

3. Котовщикова М.А. Развитие геосистем Южного Прибайкалья в условиях рифтогенеза // География и природные ресурсы. 2014. № 2. С. 54–61.

4. Геология, тектоника и глубинное строение Китая // Virtual Upper Mantle of the Earth [Электронный ресурс]. URL: http://www.virtualuppermantle.info/RU/China-Geology_RU (13.01.2020).

5. Earthquake Report: China // Jay Patton online [Электронный ресурс]. URL: http://earthjay.com/?p=5692 (15.09.2019).

6. Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. 1975. Vol. 189. Iss. 4201. P. 419–426. https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419

7. Хуаншань (горы) // Планета Земля. Историческая география [Электронный ресурс]. URL: https://geosfera.org/aziya/kitaj/2306-huanshan.html (13.01.2020).

8. Geology of China // Wikipedia [Электронный ресурс]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_China (13.01.2020).

9. Huang Pei-hua, Diffendal R.F., Yang Min-qing, Helland P.E. Mountain evolution and environmental changes of Huangshan (Yellow Mountain), China // Journal of Chinese Geography. 1999. Vol. 9. No. 1. P. 25–34.

10. Косырева Н.С. Мониторинг оползневых процессов в городе Ульяновск // В мире научных открытий: матер. II Междунар. студ. науч. конф. [Электронный ресурс]. URL: http://lib.ugsha.ru:8080/bitstream/123456789/14995/1/2018-09-50-52.pdf (13.01.2020).

11. Инженерная защита от оползней // Центр инженерно-геологических изысканий и проектирования «Геосфера» [Электронный ресурс]. URL: http://geospherecenter.ru/inzhenernaya-zashhita-ot-opolznej (09.01.2020).

12. Качура Р.А., Куклин А.С., Лапердин В.К., Тимофеев Н.В. Геологические опасности в зоне освоения побережья озера Байкал на участке порт Байкал – пос. Култук // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 3 (43). С. 22–29.

13. В Слюдянском районе на трассе «Байкал» сошел оползень // IRK.ru [Электронный ресурс]. URL: https://www.irk.ru/news/20190728/landslip (14.09.2019).

14. Фортыгина Е.А. Стихийные бедствия // КНР: экономика регионов. М.: Изд-во ИДВ РАН, 2015. С. 546–571.

15. Физическая география Китая // Синьхуа новости [Электронный ресурс]. URL: http://russian.news.cn/2016-03/21/c_135204440.htm (13.01.2020).

16. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б., Ганапати Г.П., Николаев А.В., Мельков Д.А. Оползневый риск в горных районах // Геология и геофизика Юга России. 2019. Т. 9. № 2. С. 109–126.

17. Денисенко И.А., Аузина Л.И. Оценка условий формирования и размеров селевого потока в пос. Аршан с использованием данных дистанционного зондирования Земли // Геология, поиски и разведка полезных ископаемых и методы геологических исследований: матер. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. уч. «Геонауки-2016». Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 76–80.

18. Рыбченко А.А., Кадетова А.В., Козырева Е.А. Особенности формирования селей и селевая опасность Тункинских гольцов (Республика Бурятия, Россия) // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: труды 5-й Междунар. конф. Тбилиси: Универсал, 2018. С. 550–558.

**References**

1. Shchetnikov AA. Manifestation of the Gobi mechanism of mountain formation in the Baikal rift zone: a case study of the Tunka rift. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2008;3:31–35. (In Russ.)

2. Didenkov YuN, Auzina LI. Hydrothermal systems of the various margins of lithospheric plates. In.: *Geotermal'naya vulkanologiya, gidrogeologiya, geologiya nefti i gaza: materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Geothermal Volcanology Workshop 2019"* = Geothermal Volcanology, Hydrogeology, Oil and Gas Geology: Materials of the All-Russian scientific conference with international participation "Geothermal Volcanology Workshop 2019". Petropavlovsk-Kamchatsky: Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; 2019. p.35–38. (In Russ.)

3. Kotovshchikova MA. Development of the Southern Baikal region geosystems in the conditions of rift genesis. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2014;2:54–61. (In Russ.)

4. Geology, tectonics and deep structure of China. *Virtual Upper Mantle of the Earth*. Available from: http://www.virtualuppermantle.info/RU/China-

Geology_RU [Accessed 13th January 2020]. (In Russ.)

5. Earthquake Report: China. *Jay Patton online*. Available from: http://earthjay.com/?p=5692 [Accessed 15th September 2019].

6. Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science*. 1975;189(4201):419–426. https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419

7. Huangshan (mountains). *Planeta Zemlya. Istoricheskaya geografiya* = Planet Earth. Historical geography. Available from: https://geosfera.org/aziya/kitaj/2306-huanshan.html [Accessed 13th January 2020]. (In Russ.)

8. Geology of China. *Wikipedia*. Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_China [Accessed 13th January 2020]. (In Russ.)

9. Huang Pei-hua, Diffendal RF, Yang Min-qing, Helland PE. Mountain evolution and environmental changes of Huangshan (Yellow Mountain), China. *Journal of Chinese Geography*. 1999;9(1):25–34.

10. Kosyreva NS. Monitoring of limited processes in the city of Ulyanovsk. *V mire nauchnykh otkrytii: materialy II Mezhdunarodnoi studencheskoi nauchnoi konferentsii* = In the world of scientific discoveries: Proceedings of the 2nd International Students' Scientific Conference. Available from: http://lib.ugsha.ru:8080/bitstream/123456789/14995/1/2018-09-50-52.pdf [Accessed 13th January 2020]. (In Russ.)

11. Landslide engineering protection. *Tsentr inzhenerno-geologicheskikh izyskanii i proektirovaniya "Geosfera"* = Center for Engineering and Geological Survey and Design "Geosphere". Available from: http://geospherecenter.ru/inzhenernaya-zashhita-ot-opolznej [Accessed 9th January 2020]. (In Russ.)

12. Kachura RA, Kuklin AS, Laperdin VK, Timofeev NV. Geological hazards in the development area of Lake Baikal shores on the site Port Baikal – Kultuk settlement. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2010;3:22–29. (In Russ.)

13. Landslide on the route "Baikal", Slyudyansky district. *IRK.ru*. Available from: https://www.irk.ru/news/20190728/landslip [Accessed 14th September 2019]. (In Russ.)

14. Fortygina EA. Natural disasters. In: *KNR: ekonomika regionov* = China: regional economy. Moscow: Institute of Far Eastern Studies, RAS; 2015. p.546–571. (In Russ.)

15. Physical geography of China. *Sin'khua novosti* = Xinhua news. Available from: http://russian.news.cn/2016-03/21/c_135204440.htm [Accessed 13th January 2020]. (In Russ.)

16. Svalova VB, Zaalishvili VB, Ganapathy GP, Nikolaev AV, Melkov DA. Landslide risk in mountain areas. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii* = Geology and Geophysics of Russian South. 2019;9(2):109–126. (In Russ.)

17. Denisenko IA, Auzina LI. Estimation of the conditions and scale of the mudflow in the village of Arshan using the Earth remote sensing data. In: *Geologiya, poiski i razvedka poleznykh iskopaemykh i metody geologicheskikh issledovanii: materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Geonauki-2016"* = Geology, Exploration and Survey of Minerals, and Geological Research Methods: Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference with international participation "Geosciences-2016". Irkutsk: Irkutsk National Research Technical University; 2016. p.76–80. (In Russ.)

18. Rybchenko AA, Kadetova AV, Kozireva EA. Formation conditions and hazard analysis of debris flows in the Tunka ridge, Siberia, Russia. In: *Selevye potoki: katastrofy, risk, prognoz, zashchita: trudy 5-i Mezhdunarodnoi konferentsii* = Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection: Proceedings of the 5th International conference. Tbilisi: Universal; 2018. p.550–558. (In Russ.)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Аузина Л.И., Чжан Юнчжань, Устюжанин А.О., Ярощук Я.А., Масликов О.С., Ковтун К.К. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Larisa I. Auzina, Zhang Yongzhan, Alexandr O. Ustiuzhanin, Ilya A. Yaroshchuk, Oleg S. Maslikov, Ksenia K. Kovtun 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 interest regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

*All authors have read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторах / Information about the authors**

**Аузина Лариса Ивановна,**
кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
доцент кафедры прикладной геологии,
геофизики и геоинформационных систем,
Институт недропользования,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
✉ e-mail: lauzina@mail.ru
**Larisa I. Auzina,**
Cand. Sci. (Geol. & Mineral.), Docent,
Assosiate Professor, 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: lauzina@mail.ru

**Чжан Юнчжань,**
кандидат наук,
Школа географии и океанологии,
Нанкинский университет,
210023, г. Нанкин, просп. Сяньлинь, 163, Китай,
e-mail: zhangyzh@nju.edu.cn
**Yongzhan Zhang,**
PhD,
School of Geography & Ocean Science,
Nanjing University,
163 Xianlin Ave, Nanjing 210023, China,
e-mail: zhangyzh@nju.edu.cn

**Устюжанин Александр Олегович,**
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: al.ust7@yandex.ru
**Alexandr O. Ustyuzhanin,**
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: al.ust7@yandex.ru

**Ярощук Илья Александрович,**
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: ilya.yaroshuck@yandex.ru
**Ilya A. Yaroshchuk,**
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: ilya.yaroshuck@yandex.ru

**Масликов Олег Сергеевич,**
студент,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: maslikov-oleg@mail.ru
**Oleg S. Maslikov,**
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: maslikov-oleg@mail.ru

**Ковтун Ксения Константиновна,**
студентка,
Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,
e-mail: 89500941046k@gmail.com
**Ksenia K. Kovtun,**
Student,
Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,
e-mail: 89500941046k@gmail.com

**Персоналия / Personalia**
**УДК 929**
**DOI: http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-271-276**

# Человек дела (к 85-летию профессора Жана Вячеславовича Семинского)

**© А.Т. Корольков[a]**
[a]Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** Деятельность профессора Иркутского национального исследовательского технического университета Жана Вячеславовича Семинского многогранна и весьма результативна. Целью данной статьи, приуроченной к 85-летию ученого, является ознакомление широкой аудитории с достижениями производственной и многолетней научно-исследовательской работы Жана Вячеславовича. Основой написания публикации послужили разрозненные материалы различных изданий и личные контакты автора с юбиляром в полевой геологической обстановке при работе по совместным научно-производственным хоздоговорным темам, при подготовке совместных научных статей и докторской диссертации автора, когда Ж.В. Семинский был его научным консультантом. Жан Вячеславович 15 лет проработал на производстве в ПГО «Сосновгеология», где защитил кандидатскую диссертацию по исследованию древних вулканических комплексов, содержащих разнообразные рудные месторождения. Такой опыт геолога-производственника оказался весьма ценным для студенческой аудитории. Работая в Иркутском национальном исследовательском техническом университете, Ж.В. Семинский защитил докторскую диссертацию, подготовил 20 учебных пособий и монографий, стал научным руководителем для 17 аспирантов и докторантов. Изучение структур рудных полей и закономерностей формирования рудных месторождений, металлогении Восточной Сибири и Забайкалья с позиций тектоники плит поставили его в ряд ведущих специалистов на российском и международном уровне. 33 года Ж.В. Семинский руководил кафедрой минералогии, петрографии и полезных ископаемых, позже преобразованной в кафедру геологии и геохимии полезных ископаемых. В течение долгого времени он был и до сих пор остается председателем диссертационного совета Д 212.073.01 при Иркутском национальном исследовательском техническом университете по защите докторских и кандидатских диссертаций. Жан Вячеславович является академиком Российской академии естественных наук, Заслуженным деятелем науки Российской Федерации, Почетным разведчиком недр, Заслуженным работником образования Монголии, Заслуженным профессором Иркутского национального исследовательского технического университета, Почетным преподавателем Монголии. Особенно хочется отметить, что многолетняя работа Жана Вячеславовича легла в основу журнала, который Вы в данный момент держите в руках: в течение многих лет, помимо прочего, Ж.В. Семинский был главным редактором научного издания «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений» (позднее – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых»), входящего в перечень Высшей аттестационной комиссии.

***Ключевые слова:*** Ж.В. Семинский, вулканические комплексы, геология рудных месторождений, металлогения, тектоника плит

***Информация о статье:*** Дата поступления 17 апреля 2020 г.; дата принятия к печати 20 мая 2020 г.; дата онлайн-размещения 30 июня 2020 г.

***Для цитирования:*** Корольков А.Т. Человек дела (к 85-летию профессора Жана Вячеславовича Семинского). *Науки о Земле и недропользование.* 2020. Т. 43. № 2. С. 271–276. https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-271-276

# Man of action: on the 85th anniversary of Professor Zhan Vyacheslavovich Seminsky

**© Alexei T. Korolkov[a]**
[a]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** The work of Zhan Vyacheslavovich Seminsky, Professor of Irkutsk National Research Technical University is multifaceted and highly productive. The article is dedicated to the 85th anniversary of the scientist and aims at familiarizing a wider audience with the achievements in his multi-year research and production work. The article is based on the materials from different editions and personal contacts of the author with Seminsky in the field

geological conditions when working on joint research-and-production state budget projects and writing scientific articles together within the frames of preparation of the Ph.D. thesis of the author with Zh.V. Seminsky as the research supervisor. Professor Seminsky has worked for 15 years in the production geological association "Sosnovgeologia" where he defended his candidate thesis on ancient volcanic complexes containing various ore deposits. This experience became later of value for the student's audience. During his work at Irkutsk National Research Technical University, Professor Seminsky defended his Ph.D. thesis, prepared 20 manuals and a monograph, and became a scientific adviser for 17 postgraduates and Ph.D. students. His studies on the ore field structures, regularities of the ore deposits formation and the metallogeny of Eastern Siberia and Transbaikalia (plate tectonics approach) have made him known as one of the leading specialists in Russia and other countries. Zh.V. Seminsky for 33 years had been chief of the Department of Mineralogy, Petrography and Mineral Resources (later, the Department of Geology and Geochemistry of Mineral Resources). For many years, he has been Chairperson of the Dissertation Council D 212.073.01 of Irkutsk National Research Technical University. Professor Seminsky is full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Distinguished Mineral Explorer, Honorary Worker of the Education of Mongolia, Professor Emeritus of Irkutsk National Research Technical University, and Honorary Professor of Mongolia. Of special note is the fact that Seminsky's many-year work has become the base for this journal: Zh.V. Seminsky for many years had been Editor-in-Chief of the scientific edition "Proceedings of the Siberian Department of the Earth Sciences section of the Russian Academy of Sciences. Geology, prospecting and exploration for mineral deposits" that is on the list of the Higher Attestation Commission.

***Keywords:*** Zh.V. Seminsky, volcanic complexes**,** geology of ore deposits, metallogeny, plate tectonics

***Information about the article:*** Received April 17, 2020; accepted for publication May 20, 2020; available online June 30, 2020.

***For citation:*** Korolkov AT. Man of action: on the 85th anniversary of Professor Zhan Vyacheslavovich Seminsky. *Earth sciences and subsoil use.* 2020;43(2):271–276. (In Russ.) https://doi.org/10.21285/2686-9993-2020-43-2-271-276

## Детство и юность

Жан Вячеславович Семинский родился 11 мая 1935 года в г. Гомеле Белорусской ССР [1, 2]. Свое польское происхождение он не скрывал, но и особо не афишировал. Детство Жана Вячеславовича пришлось на тяжелые годы Великой Отечественной войны: когда война началась, Жану едва исполнилось 6 лет, а когда закончилась – почти 10. Голод, переезды и лишения ему запомнились на всю жизнь, как и всем детям войны. При этом после окончания войны он испытал великую гордость за страну, радость и жажду знаний в изучении профессии, наиболее востребованной для разрушенного хозяйства своей Родины. Высокое чувство ответственности, энтузиазм и патриотизм, возникшие среди молодежи после Победы, наложили отпечаток на всю его дальнейшую жизнь!

***Жан Вячеславович Семинский***
***Zhan Vyacheslavovich Seminsky***

## Сосновская экспедиция

В 1959 году Жан Вячеславович успешно закончил Томский политехнический институт и был направлен в г. Иркутск в Сосновскую экспедицию Министерства геологии СССР, которая занималась поисками и разведкой месторождений урана на огромной территории Восточной Сибири [1, 2]. Он активно работал в поле. Стал одним из первооткрывателей месторождений в Саянах. Здесь проявились его глубокие знания, точность и аккуратность, организаторские способности. С 1959 по 1975 год он прошел путь от геолога до главного геолога Сосновской экспедиции. Работая на производстве, Ж.В. Семинский проявил себя

как специалист, успешно сочетающий исследование структур рудных месторождений и металлогенических закономерностей их формирования. Зарекомендовал себя как очень дисциплинированный и пунктуальный человек, умеющий уважительно относиться к людям, при этом отличаясь высокой требовательностью.

**Иркутский политехнический институт – Иркутский национальный исследовательский технический университет**

После 15 лет производственной работы в 1975 году Жан Вячеславович Семинский перешел на преподавательскую деятельность в Иркутский политехнический институт (ИПИ, позднее – Иркутский государственный технический университет (ИрГТУ), Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет (НИ ИрГТУ), сейчас – Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)) [3]. Сначала работал доцентом, затем – профессором. В 1980 году защитил докторскую диссертацию, которая была посвящена исследованиям древних вулканических сооружений, содержащих рудные месторождения (Забайкальский край, Республика Бурятия). К практическим результатам исследований Жана Вячеславовича относятся: составление прогнозных карт различных масштабов для рудных районов Прибайкалья и Забайкалья; выявление закономерностей локализации промышленных месторождений золота и урана; оценка перспектив золотоносности Юго-Восточной Сибири; разработка поисковых критериев на урановое и золотое оруденения и др. По этой тематике подготовлены его книги «Структуры рудных месторождений Сибири» и «Модели рудных районов и месторождений Сибири». Книга «Металлогения Восточной Сибири» была выпущена совместно с профессором С.А. Вахромеевым, возглавлявшим в 60-е годы XX века кафедру минералогии, петрографии и полезных ископаемых ИПИ. Именно на этой кафедре началась преподавательская деятельность Ж.В. Семинского, когда его пригласили читать курс «Месторождения редких и радиоактивных металлов». Ученый особо отмечает среди своих учебных пособий издания «Промышленные типы месторождений благородных металлов» и «Геология полезных ископаемых». Эти небольшие книги были составлены на основе переработки внушительных томов геологической литературы специально для студентов, которые, к сожалению, редко читают учебники, пользуясь в основном Интернетом. На 100 страницах пособия «Геология полезных ископаемых» кратко изложен еще один курс, а учебник «Геология и полезные ископаемые» был подготовлен с коллегами по кафедре специально для студентов негеологических специальностей – горняков, обогатителей. В сжатом виде в нем дана вся необходимая информация по геологическим дисциплинам. Два издания выдержала книга «Месторождения металлических полезных ископаемых», в которую по просьбе группы московских профессоров Ж.В. Семинский включил раздел «Месторождения благородных металлов (золото, серебро, платина)». Жан Вячеславович также принял участие в международном проекте «Минеральные ресурсы, металлогения и тектоника Северо-Восточной Азии», который выполняли специалисты из геологических служб Соединенных Штатов Америки, Японии, Китая, Кореи, а также из Российской и Монгольской академий наук. Результаты исследований опубликованы на английском языке в электронной книге объемом 650 страниц. Ж.В. Семинский поделился впечатлениями о данной работе: «Для реализации этого масштабного проекта был создан коллектив из 40 человек, которой работал более 10 лет (1999–2010 гг.). С нашей стороны проектом руководил академик Михаил Кузьмин, также были выбраны ответственные коллеги с Дальнего Востока и Новосибирска. Сотрудникам кафедры минералогии, петрографии и полезных ископаемых Иркутского

политехнического института поручили написать несколько глав, поскольку именно у нас собран самый большой материал по месторождениям полезных ископаемых Восточной Сибири, есть карты металлогенического районирования с описанием и др. Международный коллектив, работавший над проектом, собирался для обсуждения задач в Китае, Монголии, Японии и США. Труд был проделан уникальный, поскольку весь материал мы свели в единое целое. В коллективе были подчас острые дискуссии, особенно по классификации месторождений полезных ископаемых. Американские геологи – это практики, а в России общепринятой является генетическая классификация. Надо отдать должное американцам – координатор с их стороны был хороший, коллектив получился дружный. Нам удалось найти компромисс и успешно завершить эту интересную, нерядовую работу» [4].

**Заведующий кафедрой**

С 1980 по 2001 год Ж.В. Семинский возглавлял кафедру минералогии, петрографии и полезных ископаемых ИПИ – ИРГТУ. В 2001–2013 годах был заведующим кафедрой геологии и геохимии полезных ископаемых, в том числе когда университет приобрел звание национального исследовательского (НИ ИРГТУ). Таким образом, 33 года Ж.В. Семинский являлся заведующим ведущей выпускающей кафедрой ИПИ – НИ ИРГТУ. Кафедра вела большую педагогическую, методическую и научно-исследовательскую работу по различным грантам и хоздоговорным темам с различными предприятиями: ООО «Сосновгео», ООО «ВВС», ООО «Бурятская геологическая компания», ООО «Станголд» и другими. Благодаря своему производственному и научному опыту ответственным исполнителем данного вида деятельности являлся Ж.В. Семинский. Для работы привлекались специалисты Иркутского государственного университета, студенты ИРНИТУ, аспиранты и докторанты. Результаты исследований стали основой для публикации ряда научных статей и монографий.

**Председатель диссертационного совета**

Очень большая и сложная работа выпала Ж.В. Семинскому в качестве председателя диссертационного совета Д 212.073.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций ИРНИТУ. Эта ответственная деятельность выдвинула его в ряды самых авторитетных и выдающихся геологов России по рудным месторождениям и металлогении.

**Редактор журнала**

Ж.В. Семинский много лет являлся главным редактором журнала «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений» (позднее – «Известия Сибирского отделения секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка месторождений полезных ископаемых»), созданного на основе межвузовского сборника «Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых». В Сибири это был единственный специализированный журнал по геологии рудных месторождений. География авторов – от Карелии до Дальнего Востока. Много лет назад журнал вошел в перечень изданий Высшей аттестационной комиссии, в которых соискатели ученых степеней могут опубликовать основные результаты научных работ. Необходимо отметить, что для ИРНИТУ журнал имеет особое значение в связи с тем, что в вузе действует диссертационный совет по геологическим наукам, который возглавляет Ж.В. Семинский. Работа главного редактора – очень трудная и кропотливая, требующая большой эрудиции, логики и отличного знания профессионального языка. Она не приносит особых материальных благ, но отнимает много времени.

**Наставник молодежи**

За эти годы сотни студентов и магистрантов ИПИ – ИРНИТУ получили

качественные знания по геологии рудных месторождений и закономерностям их формирования от доктора геолого-минералогических наук, профессора Ж.В. Семинского. Неоднократно с чтением лекций он выезжал за границу: в Монгольский технический университет (Монголия), Уханьский геологический университет (Китай), Университет Британской Колумбии (Канада), Горную школу Лондонского университета (Великобритания). Ж.В. Семинский был руководителем 17 кандидатских работ, 5 из которых защитили специалисты из Монголии, а также докторских диссертаций. Научным консультантом докторской диссертации автора настоящей статьи также был профессор Ж.В. Семинский. Вспоминаются корректные советы, дискуссии по различным проблемам рудной геологии, умение вдохновить на работу в сочетании с высокой требовательностью к тексту и графике, к формулировке основных защищаемых положений, поддержка новых идей. Всего Жан Вячеславович опубликовал 20 монографий и учебных пособий. Недавно в соавторстве с коллегами из Московского государственного университета он переиздал учебник для бакалавриата и магистратуры «Структуры рудных полей и месторождений», а вместе с коллегами из ИРНИТУ – учебное пособие «Геология и месторождения полезных ископаемых». Он является Заслуженным деятелем науки Российской Федерации, Почетным разведчиком недр, Заслуженным работником образования Монголии, Заслуженным профессором ИРНИТУ, Почетным преподавателем Монголии. За цикл монографий и статей по рудообразованию награжден медалью имени академика В.И. Смирнова и медалью имени академика А.Е. Ферсмана за успехи в геологии. Ж.В. Семинский – академик Российской академии естественных наук (РАЕН). Увлеченность наукой и стиль работы геолога-исследователя не могли не отразиться на его сыновьях, которые выбрали свой путь. Каждый из них отличается высочайшей работоспособностью и достиг значительных высот в профессиональной деятельности. Старший сын Жана Вячеславовича Игорь Жанович Семинский – доктор медицинских наук, профессор, член-корреспондент РАЕН, проректор по научной работе Иркутского государственного медицинского университета [5]. Младший, Константин Жанович Семинский – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заместитель директора Института земной коры СО РАН [6]. Как радуется отец успехам сыновей!

11 мая 2020 года академику Российской академии естественных наук, доктору геолого-минералогических наук, профессору Жану Вячеславовичу Семинскому исполнилось 85 лет. Оценивая его многогранную научную и педагогическую деятельность, хочется выразить от имени всех студентов, аспирантов, докторантов и многочисленных коллег-геологов огромную благодарность и пожелать ему крепкого здоровья, оптимизма и воплощения в жизнь многих задуманных проектов!

**Библиографический список**

1. Семинский Жан Вячеславович – биография // Виперсон [Электронный ресурс]. URL: http://viperson.ru/people/seminskiy-zhan-vyacheslavovich (03.05.2020).

2. Семинский Жан Вячеславович // Большая биографическая энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: https://scanword-base.ru/vocabulary.php?slug=seminskij-zan-va-ceslavovic&type=bol-saa-biograficeskaa-enciklopedia (03.05.2020).

3. Семинский Жан Вячеславович // Иркутский национальный исследовательский технический университет [Электронный ресурс]. URL: https://www.istu.edu/ob_irnitu/person/seminskiy_zhan_vyacheslavovich (03.05.2020).

4. Профессор ИРНИТУ Жан Семинский в соавторстве с коллегами из МГУ переиздал учебник «Структуры рудных полей и месторождений» // Иркутский национальный исследовательский технический университет [Электронный ресурс]. URL: http://www.istu.edu/news/28761/ (03.05.2020).

5. Семинский Игорь Жанович // Иркипедия [Электронный ресурс]. URL: http://irkipedia.ru/content/seminskiy_igor_zhanovich (03.05.2020).

6. Семинский Константин Жанович // Институт земной коры СО РАН [Электронный ресурс]. URL: http://www.crust.irk.ru/member_50.html (03.05.2020).

**References**

1. Seminsky Zhan Vyacheslavovich: biograpy. *Viperson.* Available from: http://viperson.ru/people/seminskiy-zhan-vyacheslavovich [Accessed 3d May 2020]. (In Russ.)

2. Seminsky Zhan Vyacheslavovich. *Bol'shaya biograficheskaya entsiklopediya* = Big biographical encyclopedia. Available from: https://scanwordbase.ru/vocabulary.php?slug=seminskij-zanvaceslavovic&type=bol-saa-biograficeskaa-enciklopedia [Accessed 3d May 2020]. (In Russ.)

3. Seminsky Zhan Vyacheslavovich. *Irkutsk National Research Technical University.* Available from: https://www.istu.edu/ob_irnitu/person/seminskiy_zhan_vyacheslavovich [Accessed 3d May 2020]. (In Russ.)

4. INRTU Professor Zhan Seminsky together with the MSU colleagues republished the textbook “Structures of ore fields and deposits”. *Irkutsk National Research Technical University.* Available from: http://www.istu.edu/news/28761/ [Accessed 3d May 2020]. (In Russ.)

5. Seminsky Igor Zhanovich. *Irkipedia.* Available from: http://irkipedia.ru/content/seminskiy_igor_zhanovich [Accessed 3d May 2020]. (In Russ.)

6. Seminsky Konstantin Zhanovich. *Institute of the Earth’s Crust, SB RAS.* Available from: http://www.crust.irk.ru/member_50.html [Accessed 3d May 2020]. (In Russ.)

**Критерии авторства / Authorship criteria**

Корольков А.Т. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.
Alexei T. Korolkov 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 interest regarding the publication of this article.

*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.*
*The author has read and approved the final version of this manuscript.*

**Сведения об авторе / Information about the author**

**Корольков Алексей Тихонович,**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор кафедры динамической геологии,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия,
✉ e-mail: baley51@mail.ru
**Alexei T. Korolkov,**
Dr. Sci. (Geol. & Mineral.),
Professor, Dynamic Geology Department,
Irkutsk State University,
1 Karl Marks St., Irkutsk 664003, Russia,
✉ e-mail: baley51@mail.ru

## Уважаемые авторы!

Требования к оформлению научных статей, изложенные ниже, разработаны редакцией журнала для того, чтобы помочь Вам предоставить все необходимые для публикации сведения и избежать наиболее распространенных ошибок.

1. Научный журнал «Науки о Земле и недропользование» принимает к публикации научные материалы в виде статей по следующим тематикам:

– геологическое строение месторождений полезных ископаемых;
– тектоника месторождений, рудных узлов, районов;
– минералогия и геохимия месторождений полезных ископаемых;
– генетические проблемы формирования месторождений полезных ископаемых и других геологических объектов;
– минерагения (металлогения): рудные зоны, районы, пояса, металлогенические карты;
– методы и методики поисков и разведки месторождений полезных ископаемых;
– экономическая оценка месторождений полезных ископаемых, правовые основы недропользования;
– физико-геологические модели месторождений полезных ископаемых;
– геоинформационные технологии в науках о Земле;
– технология и техника горно-буровых работ;
– технология и техника разработки месторождений полезных ископаемых;
– технология обогащения и переработки минерального сырья;
– геммология и технология художественной обработки минералов и горных пород;
– гидрогеология и инженерная геология;
– безопасность жизнедеятельности в горно-геологической отрасли;
– геоэкология.

2. Приоритетными для публикации являются статьи в области междисциплинарных и мультидисциплинарных исследований, а также результаты работ с использованием цифровых технологий.

3. Статьи принимаются на русском, английском, китайском и монгольском языках от авторов, работающих в российских и иностранных вузах, академических и отраслевых научно-исследовательских институтах, а также производственных горно-геологических организациях.

4. Статья сопровождается:

– электронными версиями всех документов (скан), в том числе:
авторского заявления, заполненного и подписанного всеми соавторами статьи;
авторского договора;
акта экспертного заключения о возможности открытой публикации материалов;
сведений обо всех авторах на русском и английском языках с указанием названия вуза, организации, учреждения, должности и структурного подразделения, наличия ученой степени, ученого звания, почтового и электронного адресов каждого автора статьи;
– цветными портретными фотографиями авторов на светлом фоне (деловой стиль) в хорошем качестве в формате *.JPEG;
– по желанию автора в статье могут быть указаны его профили в системах цитирования и другие сведения (профили в РИНЦ, ORCID, Scopus, 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!*

5. Статьи принимаются ответственным секретарем в электронном виде в формате Microsoft Word для Windows по электронной почте nzn@istu.edu. Шрифт – Times New Roman, размер шрифта – 12 (строки через 1 интервал), перенос слов – автоматический. Параметры страницы: отступы сверху, снизу, слева и справа – 2,5 см, абзацный отступ – 1 см, ориентация страницы – книжная.

6. Объем текста – от 10000 знаков, включая пробелы, иллюстрационный материал – до 6 рисунков.

7. Статьи должны быть структурированы и выполнены по международному стандарту IMRAD. Структура статьи: индекс УДК, название статьи, фамилия, имя, отчество авторов, название учреждения, где выполнена работа, аннотация и ключевые слова на языке оригинала (русском/китайском/монгольском) и английском языках, введение, 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, названным следующим образом: *Фамилия первого автора – Первые три-четыре слова названия.doc*).

8. Рекомендуемая длина названия статьи – до 100 знаков с пробелами. Название статьи должно быть лишено сокращений, аббревиатур, описывать содержание статьи точно и конкретно, при этом оно должно быть достаточно длинным, чтобы однозначно выразить главную идею статьи, и коротким настолько, чтобы ни одно слово нельзя было выбросить без потери смысла.

9. Аннотация должна отражать основную идею статьи, поскольку для большинства читателей она является главным источником информации о представленном исследовании. Объем аннотации – 1500–2000 знаков, примерная структура: цель, методы, предмет, объект и результаты исследования, выводы. Не следует ссылаться на таблицы и/или рисунки, приведенные в основном в тексте статьи, а также использованную литературу, поскольку аннотации также публикуются отдельно от статьи. Не используйте в аннотации сокращения, аббревиатуры, а также формулы, так как аннотации в большинстве баз данных, начиная с РИНЦ, публикуются в формате, исключающем отображение формул.

Ключевые слова должны отражать суть исследования, способствовать работе поисковых систем, по количеству не превышать 10 единиц, словосочетания – не более 3 единиц.

10. Формулы в тексте должны быть набраны в специальном редакторе формул. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в редакторе формул.

11. Таблицы должны содержать только необходимые данные и представлять собой обобщенные и статистически обработанные материалы с указанием обозначения переменных. Каждая таблица снабжается заголовком. Формат таблиц – книжный, направление шрифта – по горизонтали.

12. Графические материалы к статье (рисунки и фотографии) представляются в минимальном количестве (не более 6 единиц) и должны быть выполнены в соответствии с требованиями к геологической графике. Выбирается масштаб, пригодный для тиражирования, а размер – не более 160×245 мм. Графические материалы должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Каждый рисунок сопровождается надписями в содержательной части и подрисуночной подписью, в которой представляется объяснение всех его элементов. Названия рисунков и подрисуночные подписи должны быть максимально краткие, основная информация предоставляется в тексте.

13. Ссылки на литературные источники приводятся в квадратных скобках в порядке возрастания. Библиографический список формируется по мере упоминания источников в тексте. Рекомендуемое количество источников в библиографическом списке – не менее 20, из них не менее 5 ссылок на статьи из иностранных журналов. При этом самоцитиро-

вание 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. Редакционная коллегия рекомендует в списке литературы ссылаться на статьи из журналов, входящих в международные базы данных по глобальным индексам цитирования (Scopus, Web of Science и другие).

14. Список литературы составляется в двух вариантах. В библиографическом описании статьи необходимо указывать всех авторов. 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. Примеры оформления источников в списках можно посмотреть на нашем сайте в разделе «Требования к статьям».

15. При подаче статьи авторами предоставляются на английском языке следующие элементы работы: название статьи, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, благодарности, названия таблиц и подрисуночные подписи, библиография.

16. Авторы статей должны придерживаться обязанностей, предусмотренных «Редакционной политикой журнала».

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 научное и литературное редактирование статей с последующим согласованием с авторами.

19. Представленные статьи проходят проверку на наличие заимствований.

20. Журнал выпускается с периодичностью 4 номера в год.

**Внимание! Публикация статей является бесплатной. Стоимость печатного экземпляра журнала – 500 рублей.**

*Мы приглашаем Вас к участию в нашем проекте 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, ауд. Е-317.**

**Главный редактор Лобацкая Раиса Моисеевна, тел.: +7 (3952) 405115, e-mail: lobatskaya@gmail.com**

**Заместитель главного редактора Аузина Лариса Ивановна, тел.: +7 (3952) 405108, e-mail: lauzina@mail.ru**

**Заместитель главного редактора Красноштанов Сергей Юрьевич, тел.: +7 (3952) 405101, e-mail: geo_info@istu.edu**

**Статьи следует направлять ответственному секретарю Храмовских Виталию Александровичу, тел.: +7 (3952) 405069, e-mail: nzn@istu.edu, адрес: 664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-04.**

*Образец оформления статьи*

**УДК 549.09**

# Минералого-технологические типы руд Томинского месторождения меди (Южный Урал)

**© Е.М. Курчевская[a], М.В. Яхно[b], А.Е. Сенченко[c]**
[a,c]НИиПИ «Технологии обогащения минерального сырья», г. Иркутск, Россия
[b]Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

***Резюме:*** **Цель.** Цель данной работы 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-щебнистые и щебнистые руды. Глинистые руды залегают в самых верхних частях коры выветривания, глинисто-щебнистые руды слагают центральную ее часть, а руды в щебнистых образованиях отмечены в нижних горизонтах. Представлено петрографическое описание каждого из типов. Выявлены минералогические и структурно-текстурные особенности руд. В результате изучения петрографического состава каждого типа руд установлена различная степень метаморфизма и вследствие этого – изменение рудной минерализации. **Выводы.** Прослеживается влияние метасоматических процессов, изменивших строение и минеральный состав руд. Для первого типа руды характерно наличие первичных пород – диоритов с насыщенной сульфидной вкрапленностью и с незначительными метасоматическими изменениями. В зоне вторичного обогащения породы претерпели интенсивное метасоматическое изменение. Породы этой зоны насыщены гидроксидами железа. Для зоны интенсивного выветривания характерны глинистые и хлоритизированные породы. Рудная минерализация представлена исключительно окисленными минералами. Сульфиды единичны. Различия в минеральном составе трех типов руд влияют на выбор способов переработки руды в пределах Томинского месторождения.

***Ключевые слова:*** Томинское месторождение, медно-порфировое оруденение, метаморфизм, технологические типы руд
***Благодарности:***

# Mineralogical and technological types of Tominskoye deposit copper ores (Southern Ural)

**© Elena M. Kurchevskaya[a], Marina V. Yakhno[b], Arkady Y. Senchenko[c]**
[a,c]NIPI TOMS (Scientific Research and Design Institute “Technologies of Minerals Separation”), Irkutsk, Russia
[b]Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

***Abstract:*** **Purpose.** The purpose of the article is investigation of the technological types of Tominskoe copper deposit ores; examination of the mineral composition of the host rocks and ores of each of the three types; identification of mineralogical and structural-textural features of ores, research of the relationship of mineralization and metamorphism intensity alteration for each type of ore. **Methods.** Ore bodies of the Tominskoye porphyry copper deposit occurring in the diorites and quartz diorites are veinlet and porphyry-stringer clusters in crush zones. The deposit is characterized with the predominant metasomatic rocks of quartz-sericite formation. **Results.** Three geological and technological ore types are distinguished within the Tominskoye field. The first type is represented

by primary sulfide ores, which occur on average lower than 50–55 m depth. By composition they are chlorite-muscovite-quartz metasomatic rocks. The host rocks are represented by sericitized, chloritized and carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains carbonated diorites. Chalcopyrite and pyrite are predominant elements in ore composition. Chalcopyrite contains almost all of the copper. The second type includes the ore zones of secondary sulfide concentration. This type is composed of primary and secondary copper sulfides. All the rocks are dirty argillaceous and are represented by metasomatic rocks of different composition. All types of rocks feature ore mineralization. The third type covers oxidized ores, which form the oxidation zone of the deposit. They are divided into three subtypes: clay, claydetrital and detrital ores. Clay ores occur in the uppermost parts of the crust of weathering. Clay-detrital ores compose its central part, while ores in detrital formations have been found in the lower horizons. Each of the type is given a petrographic description. Mineralogical and structural-textural features of ores are identified. The study of the petrographic composition of each type of ores showed a varying degree of metamorphism that resulted in changes in ore mineralization. **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), **библиографический список** (references), **критерии авторства** (authorhip 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

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

12+

Научный журнал

**Том 43 № 2 (71) 2020**

Дизайнер А.А. Хохряков
Редактор Ф.А. Посысоева
Перевод на английский язык Е.Н. Петровой
Компьютерная верстка Ф.А. Посысоевой

Издание распространяется бесплатно

Выход в свет 30.06.2020 г. Формат 60×90/8.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 18,75.
Тираж 500 экз. Зак. 144. 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