

ISSN 0016-7762 (Print)
ISSN 2618-8708 (Online)

2026

Том 68, № 1
Vol. 68, #1

PROCEEDINGS OF HIGHER
EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS
GEOLOGY AND EXPLORATION

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

1

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет
имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
ГЕОЛОГИЯ
И РАЗВЕДКА
Научно-методический журнал

Том 68, № 1
2026

Журнал издается с января 1958 г.
Периодичность: 4 раза в год

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRU)

PROCEEDINGS OF HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS

GEOLOGY
AND
EXPLORATION

Scientific methodological journal

Vol. 68, No. 1
2026

The journal has been published since 1958
Frequency: Quarterly

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

В журнале «Известия высших учебных заведений. Геология и разведка» публикуются статьи, содержащие результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в вузах и научно-исследовательских учреждениях, геолого-разведочных предприятиях, а также в порядке личной инициативы авторов. Печатаются обзорные статьи, освещающие современное состояние актуальных проблем геологической науки и геолого-разведочной практики, материалы научных конференций, симпозиумов и совещаний. Журнал пропагандирует передовой производственный опыт.

Журнал «Известия высших учебных заведений. Геология и разведка» за более чем 60 лет своей деятельности утвердил себя как одно из ведущих и авторитетных научных периодических изданий в области наук о Земле. Он действительно участвует в решении научно-технических проблем, пропагандирует новейшие достижения и укрепляет авторитет вузовской и отраслевой науки в области геологии, способствует повышению уровня подготовки высококвалифицированных инженерных, научных и педагогических кадров.

Главный редактор

Петров Владислав Александрович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия

Заместители главного редактора

Кузнецов Николай Борисович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, Геологический институт Российской академии наук, г. Москва, Россия

Попов Юрий Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Сколковский институт науки и технологий, г. Москва, Россия

Члены редакционной коллегии

Гаранин Виктор Константинович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва, Россия

Дроздов Дмитрий Степанович, доктор геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт криосферы Земли Сибирского отделения РАН, г. Тюмень, Россия

Дронов Андрей Викторович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

Игнатьева Маргарита Николаевна, доктор экономических наук, профессор, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия

Леонов Михаил Георгиевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

Маслов Андрей Викторович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, Россия

Марин Юрий Борисович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

Плечов Павел Юрьевич, доктор геолого-минералогических наук, директор, Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана, г. Москва, Россия

Самсонов Александр Владимирович, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, Россия

Семинский Константин Жанович, доктор геолого-минералогических наук, Институт земной коры Сибирского отделения РАН, г. Иркутск, Россия

Тихоцкий Сергей Андреевич, академик РАН, доктор физико-математических наук, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Толстов Александр Васильевич, заслуженный геолог Российской Федерации, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Акционерная компания АЛРОСА (ПАО), Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Россия

Фридовский Валерий Юрьевич, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, Институт геологии алмаза и благородных металлов Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Россия

Серов Сергей Геннадьевич, ответственный секретарь, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

Иностранцы члены редакционной коллегии

Амро Мухамед Муса, PhD, директор Института бурения и добычи, Технический университет «Горная академия Фрайберг», г. Фрайберг, Германия

Баосун Ма, PhD, профессор, профессор и руководитель аспирантов, Университет Сунь Ятсена, г. Гуанчжоу, Китай

Вердоа Массимо, PhD, профессор, Университет Генуи, г. Генуя, Италия

Гулиев Ибрагим Саид оглы, академик НАН Азербайджана, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Национальная академия наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Етирмишли Гурбан Джалал оглы, член-корреспондент НАН Азербайджана, доктор геолого-минералогических наук, генеральный директор Республиканского центра сейсмологической службы, Национальная академия наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджан

Фулун Нин, PhD, профессор, профессор и руководитель аспирантов Национального центра международных совместных исследований по глубокому бурению и разработке месторождений полезных ископаемых, Китайский геологоразведочный университет, г. Ухань, Китай

Хуанг Шаопенг, PhD, профессор, Сианьский университет Цзяотун, г. Сиань, Китай; Шэньчжэньский университет, г. Шэньчжэнь, Китай; приглашенный научный сотрудник, Университет Мичигана, г. Энн-Арбор, США

Шестопалов Юрий Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра электроники, математики и естественных наук, Университет Евле, г. Евле, Швеция

Эпельбаум Лев Виленович, Dr. Sci. (Geophys.), профессор кафедры геофизики, Тель-Авивский университет, г. Тель-Авив, Израиль

Редакционный совет

Председатель редакционного совета

Панов Юрий Петрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ректор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

Члены редакционного совета

Гусев Павел Николаевич, главный редактор, газета «Московский комсомолец», г. Москва, Россия (по согласованию)

Игнатов Пётр Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

Машковцев Григорий Анатольевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, директор, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, Россия (по согласованию)

Мустаев Рустам Наильевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

Назарова Зинаида Михайловна, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор экономических наук, профессор, Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, г. Москва, Россия

Трубецкой Климент Николаевич, академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

История издания журнала	Издается с января 1958 г.
Периодичность	4 раза в год
Префикс DOI	https://doi.org/10.32454/
ISSN print	0016-7762
ISSN online	2618-8708
Свидетельство о регистрации средства массовой информации	ПИ №ФС77-59165 от 18.09.2014 г. (Роскомнадзор)
Учредитель и издатель	ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ), 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
Редакция	ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», Серов Сергей Геннадьевич (ответственный секретарь) 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия +7 (495) 255-15-10, доб. 2289 https://www.geology-mgri.ru E-mail: journal-geology@mgri.ru
Тираж	100 экз.
Дата выхода в свет	30.04.2026
Типография	Отпечатано в ООО «Издательство «Триада»: 9, оф. 514, Чайковского пр., г. Тверь 170034, Россия
Копирайт	© Известия высших учебных заведений. Геология и разведка, 2024
Стоимость одного выпуска	Свободная цена
Условия распространения материалов	Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License
Индексация	Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по пяти научным специальностям: 1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки); 1.6.9. Геофизика (технические науки); 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические науки); 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (геолого-минералогические науки); 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр (геолого-минералогические науки). Белый список (ЕГПНИ), РИНЦ, DOAJ, GeoRef, Google Scholar, Chemical Abstracts, Worldcat. Включен в Ulrich's Periodicals Directory.

FOCUS AND SCOPE

Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration publishes original scientific articles presenting significant results of theoretical and experimental studies carried out by researchers from universities, research institutions and exploration companies, as well as by independent investigators. The Journal publishes review articles on topical issues of geological science and mineral resource exploration practice, along with the materials of such scientific events as conferences, workshops and roundtables. The Journal is also aimed at promoting advanced industrial experience.

During more than 60 years of its existence the Journal *Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration* has established itself as one of the leading and reputable scientific periodicals of the country in the field of Earth sciences. The Journal effectively participates in solving of scientific and technical problems, promoting the latest progresses and strengthens the authority of university and industry research in geology. It helps to improve the preparation of highly qualified engineers, scientists and teachers.

Editor-in-Chief

Vladislav A. Petrov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Director, Institute of Geology of ore deposits, petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Deputy Editors-in-Chief

Nikolay B. Kuznetsov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Deputy Director for research, Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Yuri A. Popov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

Editorial Board

Viktor K. Garanin, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Fersman Mineralogical Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Dmitry S. Drozdov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Researcher, Institute of the Earth Cryosphere of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

Andrey V. Dronov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Scientist, Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Margarita N. Ignatyeva, Dr. Sci. (Economics), Prof., Ural State Mining University, Yekaterinburg, Russia

Mikhail G. Leonov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Senior Scientist, Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Andrey V. Maslov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Yuriy B. Marin, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Pavel Yu. Plechov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Director, Fersman Mineralogical Museum, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Alexander V. Samsonov, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralo-

gy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Konstantin Zh. Seminsky, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Institute of the Earth's Crust of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Sergey A. Tikhotskiy, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Director, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Alexander V. Tolstov, Honored Geologist of the Russian Federation, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., ALROSA Public Joint Stock Company, Mirny, Yakutia, Russia

Valeriy Yu. Fridovsky, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Director, Diamond and Precious Metal Geology Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

Sergey G. Serov, executive secretary, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Foreign members of the Editorial Board

Moh'd M. Amro, PhD, Director of Institute of Drilling Technology and Fluid Mining, Technical University Bergakemie Freiberg, Freiberg, Germany

Ma Baosong, PhD, Prof., research supervisor of doctoral students, Sun YatSen University, Guangzhou, China

Massimo Verdoya, PhD, Prof., Università degli Studi di Genova, Genoa, Italy

Ibrahim S. Guliev, Academician of the NAS of Azerbaijan, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

Gurban J. Yetirmishli, Corresponding Member of Azerbaijan National Academy of Sciences (ANAS), Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), General director of Republican Seismic Survey Center of ANAS head of seismology division, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

Ning Fulong, PhD, Prof., research supervisor of doctoral students at the National Center for International Research on Deep Earth Drilling and Resource Development, China University of Geosciences, Wuhan, China

Shaopeng Huang, PhD, Prof., Shenzhen University, Institute of Deep Earth Sciences and Green Energy, Shenzhen,

China; Adjunct Research Scientist, Department of Earth and Environmental, University of Michigan, Ann Arbor, USA

Yury V. Shestopalov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Department of Electronics, Mathematics and Natural Sciences, University of Gävle, Gävle, Sweden

Lev V. Eppelbaum, Dr. Sci. (Geophys.), Prof., Department of Geophysics, Tel Aviv University, Tel-Aviv, Israel

Editorial Council

Chairman of the Editorial Council

Yuri P. Panov, Cand. Sci. (Tech.), Senior Researcher, Rector, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Members of the Editorial Council

Pavel N. Gusev, Editor-in-Chief, Moskovskii Komsomolets newspaper, Moscow, Russia

Petr A. Ignatov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Grigoriy A. Mashkovtsev, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Director, All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorovsky, Moscow, Russia

Rustam N. Mustaev, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Associate Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Zinaida M. Nazarova, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. Sci. (Economics), Prof., Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

Kliment N. Trubetskiy, Academician of the Russian Academy of Science, Dr. Sci. (Engineering), Prof., Academician N.V. Melnikov Institute of Problems of Integrated Development of Mineral Resources of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Founded	The journal has been published since January, 1958
Frequency	quarterly
DOI Prefix	https://doi.org/10.32454/
ISSN print	0016-7762
ISSN online	2618-8708
Mass Media Registration Certificate	PI No. FS 77-59165 issued 18.09.2014 by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor)
Founder and Publisher	Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
Editorial Office	Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Sergey G. Serov (executive secretary) 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia +7 (495) 255-15-10, ext. 2289 https://www.geology-mgri.ru E-mail: journal-geology@mgri.ru
Circulation	100 copies
Publication date	30.04.2026
Printing House	"Triada" publishing house: 9, Tchaikovsky Ave, office 514, Tver 170034, Russia
Copyright	© Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration
Price	Flexible
Distribution	The content is distributed under the Creative Common License CC BY
Indexation	The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications in which the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of sciences, for the degree of Doctor of Sciences in five scientific specialties should be published: 1.6.7. Engineering geology, permafrost and soil science (geological and mineralogical sciences); 1.6.9. Geophysics (technical sciences); 1.6.10. Geology, prospecting and exploration of solid minerals, minerogeny (geological and mineralogical sciences); 1.6.11. Geology, prospecting, exploration and exploitation of oil and gas fields (geological and mineralogical sciences); 2.8.3. Mining and oil and gas field geology, geophysics, surveying and subsurface geometry (geological and mineralogical sciences). The White List (EGPNI), Russian Science Citation Index (eLIBRARY.RU), DOAJ, GeoRef, Google Scholar, Chemical Abstracts, Worldcat, Ulrich's Periodicals Directory.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОЛОГИЯ

- 8 **МИНЕРАЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ РОССЫПИ Р. МАЛАЯ НЕСТЕРОВКА (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ) ПО ДАННЫМ МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА**
Е.И. МЕДВЕДЕВ, В.В. ИВИН
- 19 **О НОВОЙ НАХОДКЕ АММОНИТА СЕМЕЙСТВА DACTYLIOSERATIDAE NYATT (НИЖНЯЯ ЮРА, НИЖНИЙ ТОАР) В ТАВРИЧЕСКОМ ФЛИШЕ НА СЕВЕРНОМ СКЛОНЕ КАЧИНСКОГО ПОДНЯТИЯ (ГОРНЫЙ КРЫМ)**
Б.А. ЗАЙЦЕВ, В.Н. КОМАРОВ, А.В. ОВЧИННИКОВЗ, Ю.С. ПОЕЗЖАЕВ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- 32 **ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЗРАЧНЫХ СКАПОЛИТОВ МУЗКОЛЬСКОЙ МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ СЕРИИ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПАМИР**
А.К. ЛИТВИНЕНКО, Ш.А. ОДИНАЕВ, Г.К. ХАЧАТРЯН
- 50 **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД, МЕТАСОМАТИТОВ И РУД НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗОЛОТА ТУНАНЦА, ЭКВАДОР**
Х.П. МЕДИНА, П.А. ИГНАТОВ, А.А. ИВАНОВ, И.В. ВИКЕНТЬЕВ
- 63 **МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ ЮРСКИХ ПОРОД ФАН-ЯГНОБСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТАДЖИКИСТАН**
М. САЙМУДАСИРИ, А.К. ЛИТВИНЕНКО

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

- 79 **ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ОБЪЕМНО-ГЕНЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ МАСШТАБОВ ГЕНЕРАЦИИ И ЭМИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ РИФЕЙСКОГО КОМПЛЕКСА АНАБАРО-ЛЕНСКОЙ КРАЕВОЙ СИСТЕМЫ**
Д.В. ПЕСКОВ, А.М. ЖАРКОВ, М.А. КРАВЧЕНКО, И.Н. ЛУКОГОРСКИЙ, Е.Н. ЧЕЛНАКОВА
- 90 **ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ НИЖНЕПЕРМСКИХ ПОДСОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРАВОБЕРЕЖНОГО УЧАСТКА АСТРАХАНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**
А.А. ГОРБУНОВ

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

- 99 **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**
Е.А. КРАХИНА, В.Н. ЭКЗАРЬЯН
- 109 **ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СФЕРЫ ВЛИЯНИЯ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО СООРУЖЕНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ**
А.А. ГОРЛОВ, И.К. ФОМЕНКО, М.А. НАУМОВ
- 119 **РОЛЬ ТЕКТониКИ В ФОРМИРОВАНИИ ЛАТЕРИТНОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ ГВИНЕЯ**
Л.А. ЯРГ, А.С. КАМАРА, В.В. НЕВЕЧЕРЯ

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

- 128 **ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОЛОНН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА**
А.Г. ИВАНОВ, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ, Д.Д. ОРЕХОВ
- 139 **ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ (InSAR) В ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**
А.А. АНЖЕНКО, А.В. АНЖЕНКО, С.В. СЕРЕБРЯКОВ

GEOLOGY

- 8 **MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF HEAVY CONCENTRATE FROM THE MALAYA NESTEROVKA GOLD PLACER (PRIMORSKY KRAI): ELECTRON MICROPROBE DATA**
EVGENII I. MEDVEDEV, VITALY V. IVIN

- 19 **A NEW FINDING OF DACTYLIOCERATIDAE HYATT AMMONITE (LOWER JURASSIC, LOWER TOARCIN) IN THE TAURICAN FLYSCH ON THE NORTHERN SLOPE OF THE KACHA UPLIFT (MOUNTAINOUS CRIMEA)**
BOGDAN A. ZAITSEV, VLADIMIR N. KOMAROV, ALEXANDER V. OVCHINNIKOV, YURI S. POEZHAYEV

GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

- 32 **GENETIC FEATURES OF TRANSPARENT SCAPOLITES OF THE MUZKOL METAMORPHIC SERIES, CENTRAL PAMIR**
ANDREY K. LITVINENKO, SHARIFJON A. ODINAEV, GALINA K. KHACHATRYAN

- 50 **PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS, METASOMATITES, AND ORES AT THE TUNANTZA GOLD DEPOSIT, ECUADOR**
JUAN P. MEDINA, PETR A. IGNATOV, ANDREY A. IVANOV, ILYA V. VIKENTYEV

- 63 **METALLIFEROUS JURASSIC ROCKS OF THE FAN-YAGNOB SYNECLISE (CENTRAL TAJIKISTAN)**
MAHMADSHARIF SAYMUDASIRI, ANDREY K. LITVINENKO

GEOLOGY AND PROSPECTING FOR HYDROCARBON RESERVES

- 79 **GENERATION AND EXPULSION OF HYDROCARBONS FROM THE RIPHEAN COMPLEX OF THE ANABAR-LENA MARGINAL SYSTEM: PROBABILISTIC ESTIMATE USING THE VOLUMETRIC-GENETIC APPROACH**
DMITRY V. PESKOV, ALEXANDER M. ZHARKOV, MILENA A. ANTONOVA, IVAN N. LUKOGORSKY, EKATERINA N. CHELNAKOVA

- 90 **GEOLOGICAL SETTING AND HYDROCARBON PROSPECTS OF THE LOWER PERMIAN SUBSALT SUCCESSION WITHIN THE RIGHT-BANK SECTOR OF THE ASTRAKHAN GAS CONDENSATE FIELD**
ALEKSEI A. GORBUNOV

HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

- 99 **FORMATION AND DEVELOPMENT FEATURES OF LANDSLIDE PROCESSES IN MOSCOW OBLAST (RUSSIA) UNDER VARIOUS LITHOLOGICAL AND STRATIGRAPHIC CONDITIONS**
ELENA A. KRAKHINA, VLADIMIR N. EKZARIAN

- 109 **STOCHASTIC APPROACH TO ASSESSING THE IMPACT AREA OF THE RECONSTRUCTED FACILITY ON THE SURROUNDING DEVELOPMENT**
ANDREY A. GORLOV, IGOR K. FOMENKO, MIKHAIL A. NAUMOV

- 119 **ROLE OF TECTONICS IN THE FORMATION OF LATERITIC WEATHERING CRUST IN THE REPUBLIC OF GUINEA**
LIUDMILA A. YARG, ABOUBACAR S. CAMARA, VADIM V. NEVECHERIA

GEOLOGICAL EXPLORATION TECHNIQUES

- 128 **ISSUES IN THE DESIGN OF PRODUCTION STRINGS OF PROCESS WELLS FOR *INSITU* URANIUM LEACHING**
ALEXANDER G. IVANOV, YURI A. ARSENTYEV, DANILA D. OREKHOV

- 139 **APPLICATION OF INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (InSAR) IN GEODYNAMIC MONITORING OF MINING INDUSTRY FACILITIES: METHODOLOGICAL FOUNDATIONS, INHERENT LIMITATIONS, AND PRACTICAL EFFICIENCY**
ARTEM A. ANZHENKO, ALEXANDER V. ANZHENKO, SERGEY V. SEREBRYAKOV



МИНЕРАЛОГО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЯЖЕЛОЙ ФРАКЦИИ РОССЫПИ р. МАЛАЯ НЕСТЕРОВКА (ПРИМОРСКИЙ КРАЙ) ПО ДАННЫМ МИКРОЗОНДОВОГО АНАЛИЗА

Е.И. МЕДВЕДЕВ*, В.В. ИВИН

ФГБУН «Дальневосточный геологический институт» Дальневосточного отделения Российской академии наук
159, пр-т 100-летия Владивостока, Владивосток 690022, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Фадеевский рудно-россыпной узел (Приморский край) является перспективной золотоносной площадью, однако коренные источники многочисленных россыпей узла до настоящего времени остаются дискуссионными. Впервые для россыпи реки Малая Нестеровка, локализованной в пределах этого узла, проведено комплексное микрозондовое исследование вещественного состава самородного золота и его минералов-спутников в тяжелой фракции россыпи.

Цель. Минералого-геохимическое изучение самородного золота и его минералов-спутников в магнитной, электромагнитной и тяжелой фракциях россыпи р. М. Нестеровка с применением микрозондового анализа и сканирующей электронной микроскопии для реконструкции возможных типов коренных источников питания и последующих постседиментационных процессов, происходящих в россыпной системе.

Материалы и методы. Исследование выполнено на пробах шлихового материала. Первичный минералогический контроль проводился под бинокулярными микроскопами МБС-10 и Nikon SMZ 465. Для детального микрохимического анализа методом SEM-EDS были отобраны индивидуальные зерна золота, сульфидов и других минералов-спутников. Анализы выполнены в ЦКП ДВГИ ДВО РАН на микрорентгеноспектральном анализаторе Jeol JXA-8100 (Япония) и сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP (Германия) с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350.

Результаты. Выявлен комплексный полимиктовый состав, включающий четыре геохимических типа самородного золота: высокопробное, уран-рубидиевое, ртутьсодержащее и золото с органоминеральными пленками. В шлихах идентифицированы платиноидные минералы (сперрилит), высокохромистые шпинелиды ($Cr\# = 0,95-0,99$), ферробадделеит, сульфиды (борнит, пирротин) и гипергенные Cr-Mn-Si образования. Доказано, что поверхность золотин подвержена сорбции органического вещества и глинистых минералов с формированием органоминеральных пленок, содержащих до 14,5 мас.% C и 12,7 мас.% O.

Закключение. На основании парагенетического анализа предложена модель разнотипного источника питания россыпи, включающего: 1) ультрамафит-мафитовый массив (источник сперрилита, хромита и бадделеита); 2) среднетемпературную золото-кварцевую минерализацию; 3) низкотемпературную золото-ртутную минерализацию; 4) специализированную золото-уран-редкометалльную минерализацию. Сохранность химически неустойчивых сульфидов свидетельствует о близости коренных источников. Разработаны минералого-геохимические критерии прогнозирования скрытого оруденения в пределах Фадеевского рудного узла.

Ключевые слова: россыпь золота, Малая Нестеровка, Приморский край, микрозондовый анализ, самородное золото, геохимические типы, сперрилит, бадделеит, источники питания, гипергенез

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследования проведены по теме госзадания ДВГИ ДВО РАН № 125033104605–6.

Для цитирования: Медведев Е.И., Ивин В.В. Минералого-генетические особенности тяжелой фракции россыпи р. Малая Нестеровка (Приморский край) по данным микронзондового анализа. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):8–18. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-8-18> EDN: MMAOBR

Статья поступила в редакцию 20.01.2026

Принята к публикации 28.01.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

MINERALOGY AND GEOCHEMISTRY OF HEAVY CONCENTRATE FROM THE MALAYA NESTEROVKA GOLD PLACER (PRIMORSKY KRAI): ELECTRON MICROPROBE DATA

EVGENII I. MEDVEDEV*, VITALY V. IVIN

*Far East Geological Institute Far East Branch Russian Academy of Sciences
159, 100-years Vladivostok ave., Vladivostok 690022, Russia*

ABSTRACT

Background. The Fadeevsky ore-placer cluster (Primorsky Krai) is a promising gold-bearing area; however, the bedrock sources of its numerous placers remain a subject of debate. For the first time, a comprehensive microprobe study of the composition of native gold and its associated heavy fraction minerals has been conducted on the Malaya Nesterovka River placer, located within this cluster.

Aim. To perform a mineralogical and geochemical study of native gold and accessory minerals in the magnetic, electromagnetic, and heavy fractions of the Malaya Nesterovka placer using microprobe analysis and scanning electron microscopy for reconstructing potential types of primary source rocks and assessing subsequent post-sedimentary (supergene) processes within the placer system.

Materials and methods. Samples of natural concentrates were studied. Preliminary mineralogical inspection was carried out using MBS-10 and Nikon SMZ 465 binocular microscopes. For a detailed microchemical research, individual grains of gold and accessory minerals were selected and analyzed by scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS). The analyses were performed at the Center for Collective Use of the Far East Geological Institute FEB RAS using a Jeol JXA-8100 electron probe microanalyzer (Japan) and a Carl Zeiss EVO 50 XVP scanning electron microscope (Germany) equipped with an INCA Energy 350 spectrometer.

Results. The concentrates were found to have a complex polymictic composition. Four geochemical types of native gold were identified: high-fineness, uranium-rubidium-bearing, mercury-bearing, and carbonaceous/organomineral-coated gold. Heavy mineral concentrates yielded platinum-group minerals (sperrylite), high-chromium spinels ($Cr\# = 0.95-0.99$), ferrian baddeleyite, sulfides (bornite, pyrrhotite), and supergene Cr-Mn-Si formations. The surface of gold particles was established to be susceptible to sorption of organic matter and clay minerals forming organomineral films containing up to 14.5 and 12.7 wt % of C and O, respectively.

Conclusion. As a result of the paragenetic analysis, a heterogeneous/diverse model of placer source rocks was proposed, including: (1) ultramafic-mafic massif (source of sperrylite, chromite, and baddeleyite); (2) mesothermal gold-quartz formation; (3) low-temperature gold-mercury mineralization; and (4) specialized gold-uranium-rare metal mineralization. The preservation of chemically unstable sulfides indicates the proximity of primary source rocks. Mineralogical and geochemical criteria for predicting concealed mineralization within the Fadeevsky Ore Cluster were developed.

Keywords: gold placer, Malaya Nesterovka, Primorsky Krai, microprobe analysis, native gold, geochemical types, sperrylite, baddeleyite, source rocks, supergene processes

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: research was carried out on the subject of the State Assignment of the FEGI FEB RAS № 125033104605–6.

For citation: Medvedev E.I., Ivin V.V. Mineralogy and geochemistry of heavy concentrate from the Malaya Nesterovka gold placer (Primorsky krai): electron microprobe data. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):8–18. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-8-18> EDN: MMAOBR

Manuscript received 20.01.2026

Accepted 28.01.2026

Published 30.04.2026

* Corresponding author

Геологическое строение и характеристика россыпи

Россыпное месторождение р. Малая Нестеровка расположено в пределах Фадеевского рудно-россыпного узла (юго-запад Приморского края). В геологическом плане узел характеризуется широким распространением палеозойских (силурийских, пермских) магматических (преимущественно интрузивных) образований по сравнению с осадочными и вулканогенно-осадочными комплексами, сохранившимися лишь в межразломных впадинах и между крупными плутонами. В низах стратифицированного разреза Фадеевской площади распространены базальтово-кремнисто-туфогенные, кремнисто-глинистые, аргиллитовые и туфогенно-песчаниковые отложения (кордонкинская свита, S1–2), а также алевро-песчано-сланцевые толщи, чередующиеся с вулканогенными накоплениями кислого и среднего составов, содержащими прослойки известняков (решетниковская свита, P1–2). Породы вулканогенно-терригенного комплекса вблизи юго-западной и восточной границ узла прорваны крупными массивами гранитоидов позднепермского ($\gamma P2$) и среднепалеозойского ($\gamma Pz2$) возрастов. Силурийские (послекаледонские) интрузивы представлены мелкими телами габбро-диабазов, базит-гипербазитов и диоритов, преобладают поздние фазы внедрения. Все комплексы пород интенсивно дислоцированы в меридиональном и северо-восточном направлениях при крутом падении пластов на запад и прорваны крупными массивами гранитоидов. Их кровля полого наклонена на запад, в ней отмечается обилие малых интрузий и даек гранитов, гранодиоритов, порфиоров и порфиритов. Он представляет собой традиционный

золото-платиноидный район, где с начала прошлого века отрабатывались россыпи в аллювии рек Фадеевка и Золотая, связанные с размывом гранитоидов и черносланцевых толщ соответственно. К настоящему времени промышленные россыпи в основном отработаны (рис. 1) [1, 2], что повышает ценность детальных минералого-геохимических исследований, проведенных на россыпи р. Малая Нестеровка, и позволит разработать критерии прогнозирования скрытого оруденения не только в пределах Фадеевского узла, но и на других объектах страны. Исследуемая россыпь представляет собой комплексный источник золота и является сложной геологической системой, аккумулирующей информацию о составе возможных коренных источников питания россыпи р. М. Нестеровка [3, 4, 7].

Долина реки Малой Нестеровки расположена в области юго-западного окончания (р. Нестеровки) в зоне развития миоценовых отложений устьуйфунской свиты, представленных светло-серыми и пестро-цветными глинами, песчано-гравийно-галечным материалом с повышенным содержанием золота. В современном рельефе свита почти полностью эродирована и слагает лишь мелкие разрозненные эрозионные останцы плиоценовых террас. Долина имеет асимметричный корытообразный профиль шириной 300–450 м. Горное обрамление долины сложено осадочными породами кордонкинской свиты нижнего силура и интрузивными комплексами верхнепермского возраста (диориты, габбро-диориты, габброиды).

Мощность аллювия р. М. Нестеровка колеблется от 3,0 до 6,0 м. В разрезе рыхлых отложений можно выделить 3 слоя: 1) верхний — супеси, суглинки коричневого, буровато-серого цвета, фациально

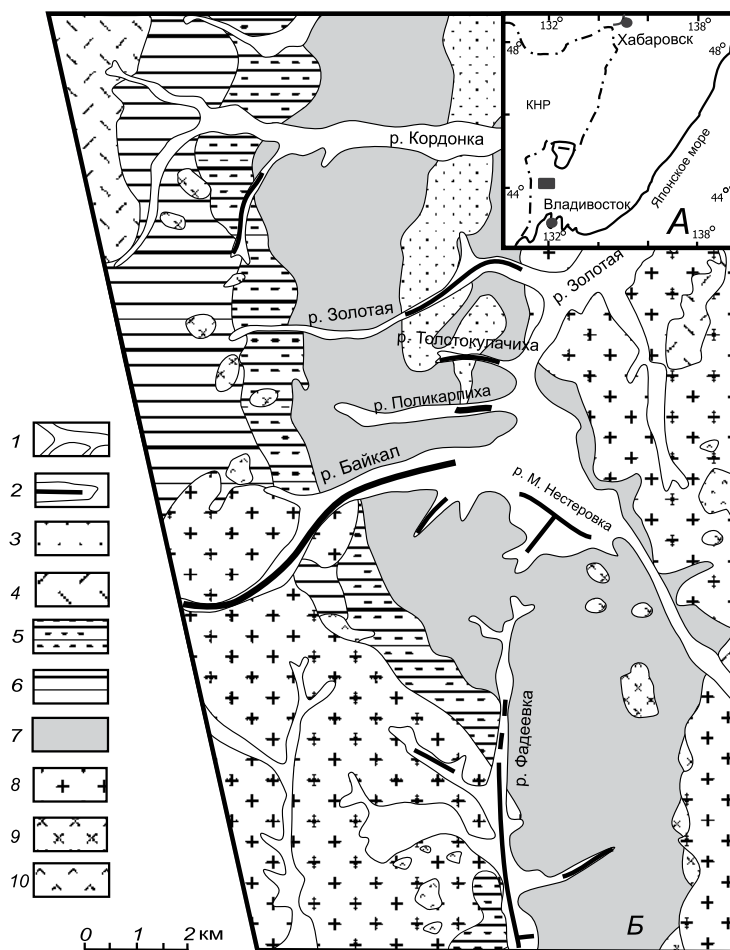


Рис. 1. Схема геологического строения Фадеевского рудно-россыпного узла [1, 2]: А — местоположение изученной площади; Б — 1 — четвертичные аллювиальные отложения; 2 — золотоносные россыпи; 3 — глины, песчаные глины, галечники, (N_1); 4 — риолиты, дациты и их туфы, (P_2br); 5 — алевролиты, аргиллиты, углестые сланцы, редкие прослои песчаников, кремней, умеренно-кислых вулканитов ($P_{1-2}rs_2$); 6 — переслаивание песчаников, алевролитов и аргиллитов ($P_{1-2}rs_1$); 7 — базальт-кремнисто-туфогенные, кремнисто-глинистые, туфогенно-песчаные отложения (S_{1-2}); 8 — гранитоиды (γP_2); 9–10 — штоки: 9 — диоритовых порфириров, диоритов, габбро ($\sigma\delta P_2$); 10 — сиенитов и сиенит-порфириров (ϵP_2)

Fig. 1. Geological sketch map of the Fadeyevka ore-placer cluster [1, 2]: А — Location of the study area; Б — 1 — Quaternary alluvial deposits; 2 — Auriferous placers; 3 — Clays, sandy clays, gravels (N_1); 4 — Rhyolites, dacites, and their tufts (P_2br); 5 — Siltstones, argillites, carbonaceous shales with rare interbeds of sandstones, cherts, moderately acidic volcanics ($P_{1-2}rs_2$); 6 — Alternation of sandstones, siltstones and argillites ($P_{1-2}rs_1$); 7 — Basalt-chert-tuffaceous, siliceous-argillaceous, tuffaceous-sandy deposits (S_{1-2}); 8 — Granitoids (γP_2); 9–10 — Stocks: 9 — Dioritic porphyrites, diorites, gabbro ($\sigma\delta P_2$); 10 — Syenites and syenite-porphyrines (ϵP_2)

замещающиеся темно-серым алевропилитом, включающим слаборазложившиеся растительные остатки, линзы и прослои гравийно-супесчаного материала; мощностью до 2 м; 2) средний — хорошо выдержанный по мощности и по простираению слой валунно-галечно-галечных отложений с супесчаным заполнителем серого, коричневатого-серого цвета; отложения обводнены, слабо связаны, обломочный материал преимущественно средней

окатанности; мощность 1–3 м; 3) предплотиковый слой, отличающийся повышенным содержанием глинистой фракции, представлен валунно-галечными отложениями, связанными суглинком с примесью грубо окатанного обломочного материала; отложения слабо обводнены; цвет коричневый, коричневатый-серый до серовато-желтого; мощность 0,5–1,5 м. Золотоносный пласт четко выражен, приурочен к основанию аллювия

и верхней части плотика, его мощность варьирует от 0,4 до 2,0 м. Ширина россыпи изменяется от 20 до 180 м (в среднем 85 м).

Тяжелая фракция россыпи (шлих) является концентратором химически и механически устойчивых минералов и служит ключевым объектом для решения задач металлогенического анализа и прогноза коренных проявлений на изучаемой россыпи [7, 9]. Основной минералого-геохимический интерес представляет комплексный состав шлихов россыпи р. М. Нестеровка, в которой, согласно предварительным данным, присутствуют минералы, относящиеся к разным генетическим типам благороднометалльной минерализации. Состав самородного золота является прямым индикатором условий его образования в коренных источниках, однако в гипергенных условиях россыпеобразования, оно может претерпевать значительные изменения под воздействием химических, биохимических и сорбционных процессов [13]. Применение современных методов микроанализа, таких как растровая электронная микроскопия с энергодисперсионной спектроскопией (SEM-EDS), позволяет с высокой точностью определять элементный состав отдельных зерен, выявлять микропримеси и диагностировать поверхностные образования, невидимые при оптическом изучении.

Целью данной работы является минералого-геохимическая характеристика самородного золота и их минералов-спутников в магнитной, электромагнитной и тяжелой фракциях россыпи р. М. Нестеровка на основе данных микрозондового анализа и сканирующей электронной микроскопии для реконструкции возможных типов коренных источников питания и последующих постседиментационных процессов, происходящих в россыпной системе.

Методы исследования

Исследования проведены на материале шлиховых проб, отобранных одним из соавторов статьи (Медведевым Е.И.) в ходе работ участковым геологом в ООО «Якком» на россыпи р. М. Нестеровка. Отбор и обработка проб осуществлялись по стандартной методике шлихового опробования [4]. Исходные пробы отмывались на лотке, после чего проводилось разделение концентратов с использованием магнитной и электромагнитной сепарации на три фракции: магнитную, электромагнитную и немагнитную. Первичный минералогический контроль проводился под бинокулярными микроскопами МБС-10 и Nikon SMZ 465. Для детального микрохимического исследования методом

SEM-EDS были отобраны индивидуальные зерна золота, сульфидов и других минералов — спутников благородных металлов. Анализ выполнялся в ЦКП ДВГИ ДВО РАН на микрорентгеноспектральном анализаторе JXA-8100 (Jeol) и сканирующем электронном микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP с энергодисперсионным спектрометром INCA Energy 350. Всего выполнено более 100 микрозондовых и 200 полуколичественных анализов для более чем 50 зерен золота и 80 сопутствующих минералов. Количественная обработка включала ZAF-коррекцию и пересчет в атомные пропорции для расчета структурных коэффициентов хромитов (Cr#).

Результаты и обсуждение

Золото россыпи р. Малая Нестеровка характеризуется широким диапазоном размеров и морфологических типов. Преобладают фракции 0,25–0,5 и 0,5–1,0 мм, на которые суммарно приходится около 75 мас.% золотин (рис. 2). По морфологии выделяются три группы:

1) окатанные комковидные зерна со следами длительного переноса: сглаженными формами и многочисленными микроударными структурами на поверхности;

2) пластинчатые зерна со средней степенью окатанности и загнутыми краями, часто образующие сростки различного размера. Их форма обусловлена как внутренней кристаллографической ориентировкой, так и механической деформацией в процессе транспортировки;

3) ажурные («дендритовидные») зерна, вероятно, близкие к рудному (мало транспортированному) облику. Их сложная форма может указывать на кристаллизацию в условиях быстрого пересыщения или агрегацию наночастиц золота в гипергенных условиях [11]. Поверхность золотин обычно неровная, ямчатая, часто покрыта тонкими пленками гидроокислов железа, глинистых и углеродистых минералов, заполняющих микроаверны, трещины и неровности рельефа (рис. 3).

Геохимические типы самородного золота

Применение микрозондового анализа позволило установить, что основная примесь в золоте — это серебро. Присутствует ртутистое золото с содержанием ртути от 1 до 5 мас.%. Необычно присутствие для изучаемой россыпи золота с примесью ртути (до Hg — 9,7 мас.%), в котором полностью отсутствует серебро, встречаются знаки золота с примесью меди, но ее примесь в целом незначительна и колеблется от 0,2 до 0,8 мас.%. Помимо этого,

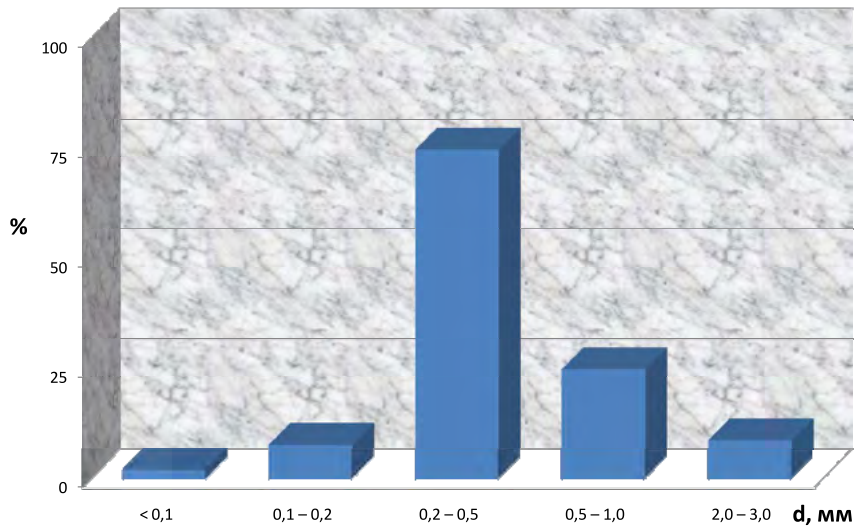


Рис. 2. Гранулометрический состав самородного золота россыпи р. Малая Нестеровка
Fig. 2. Granulometric composition of native gold from the Malaya Nesterovka River placer

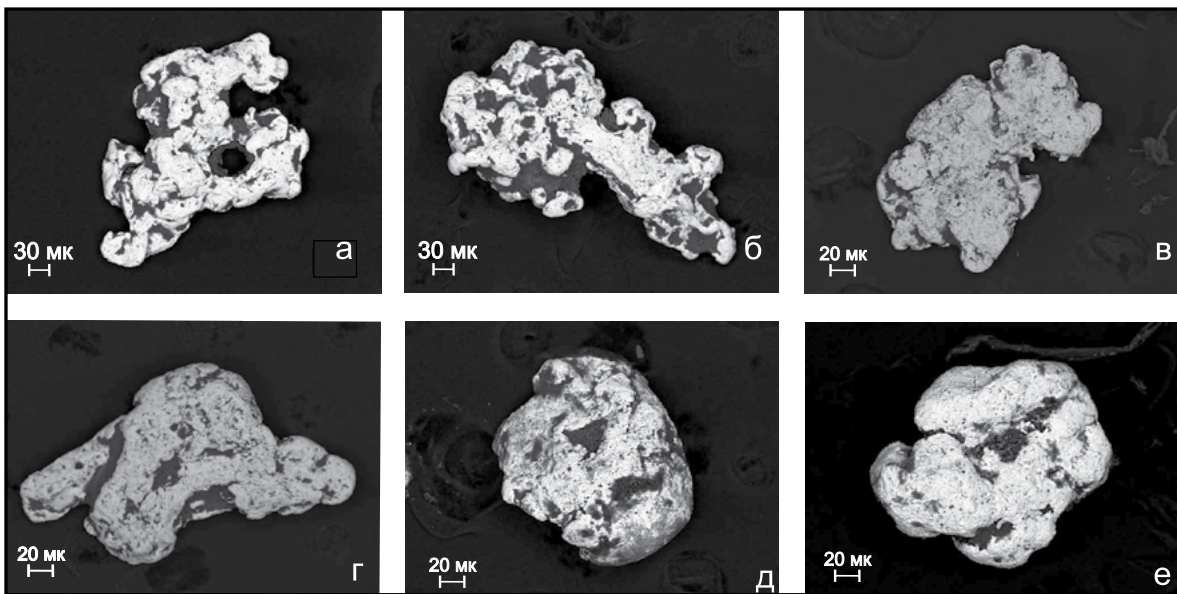


Рис. 3. SEM-изображение поверхности зерен золота: а, б — ажурные («дендритовидные») зерна, близкие к рудному золоту; в, г — пластинчатые знаки золота с загнутыми краями; д, е — комковидные окатанные зерна со следами переноса, покрытые органоминеральной пленкой и с включениями глинистых минералов
Fig. 3. SEM images of gold grain surfaces: а, б — lacy (dendritic) grains resembling primary (lode) gold; в, г — flaky gold particles with jagged edges; д, е — lumpy, rounded grains with signs of transport, coated by an organomineral film and containing inclusions of clay minerals

необычным является появление знаков золота, отобранных из плотика россыпи, в котором встречается примесь рубидия (Rb до 1,5 мас.%) и урана (U — 1,98 мас.%). Во всех анализах золота присутствует

повышенное содержание С и О и сопутствующих элементов: Al, Fe, N и Cl. Это указывает на формирование на поверхности золотин вторичных органоминеральных и/или углеродных пленок.

Таблица 1. Характеристика геохимических типов самородного золота россыпи р. Малая Нестеровка
Table 1. Characteristics of the geochemical types of native gold from the Malaya Nesterovka River placer

Параметр, мас. %	Тип I: Высокопробное	Тип II: Уран-рубидиевое	Тип III: Ртутьсодержащее	Тип IV: Углеродистое
Au	95,32–98,02	84,06–91,89	75,68–90,11	79,27–91,89
Ag	1,98–4,72	2,67–5,09	2,67–7,90	1,04–8,02
Hg	–	–	3,36–9,70	–
U	–	До 1,98	–	–
Rb	–	1,07–1,37	–	–
C	2,96–7,35	4,47–9,52	5,28–14,52	3,79–12,29
O	1,05–2,82	2,78–3,65	1,26–11,51	1,28–12,68

Анализ зерен золота выявил значительную вариацию составов золота и серебра и наличие аномальных (нехарактерных) микропримесей U, Rb, Hg, Си и т.д., а также сопутствующих им минералов-спутников, описание которых приводится ниже. Это позволило в соответствии с классификацией Н.В. Петровской [5] выделить четыре геохимических типа золота (табл. 1).

Тип I — высокопробное. Преобладающий тип золотой минерализации с низким содержанием серебра, что характерно для золота метаморфогенных или глубинных магматогенных гидротермальных систем, бедных серебром, таких как золото-кварцевая формация [3]. В целом его состав соответствует золоту из коренных месторождений, связанных с процессами регионального метаморфизма или гранитным магматизмом.

Тип II — уран-рубидиевое. Уникальная ассоциация, имеющая важное прогнозно-поисковое значение. Присутствие урана является прямым указанием на пространственную и генетическую связь с урановой минерализацией. Аналоги золота с ураном известны в золото-урановых конгломератах Витватерсранда и некоторых гидротермальных месторождениях в кислых породах [10]. Примесь рубидия — крайне редкое явление для самородного золота. Рубидий может быть, как захвачен золотом в условиях интенсивного калиевого метасоматоза (березитизация), так и быть связанным с флюидами специализированных щелочных магматических комплексов. Данный тип золота указывает на возможное существование в области сноса уникальной золото-уран-редкометалльной минерализации.

Тип III — ртутьсодержащее. Присутствие ртути может быть как первичным признаком низкотемпературного золото-ртутного или золото-сурьмяно-ртутного оруденения [4], так

и результатом вторичного гипергенного обогащения. Равномерное распределение Hg (~3,36 мас.%) в объеме зерен может указывать на сингенетическую примесь. В то же время обогащение ртутью до 9,70 мас.%, особенно в краевых частях зерен, является классическим признаком гипергенного осаждения ртути на золото в россыпной среде. Особый интерес представляет золото, в котором ртуть присутствует при полном отсутствии серебра, что может указывать на специфические условия формирования — глубинные углеродитые флюиды [1, 2].

Тип IV — углеродистое. Повышенные содержания C и O, а также сопутствующих Al, Fe, N и Cl связаны не с внутренней примесью, а с формированием на поверхности золотин вторичных адсорбционных пленок, содержащих органическое вещество (гуминовые кислоты) и глинистые минералы. Этот процесс сорбции широко распространен в органико-обогащенных отложениях и значительно влияет на миграцию и пассивацию золота в гипергенных условиях [13, 14]. Практически все изученные зерна в той или иной степени несут признаки такого поверхностного изменения.

Минералы-спутники благороднометалльной минерализации и их генетическая интерпретация

Хромшпинелиды — представлены в шлихе зернами субмикронного размера правильной — дипирамедальной и неправильной форм преимущественно темно-серого и до темно-зеленого цвета. Согласно данным микрозондового анализа выделяются два принципиально различных типа хромитов (табл. 2). Тип 1 «богатый»: Cr₂O₃ до 47,4 мас.%, MnO ~13,7 мас.%, Cr# = 0,99. Высокое содержание марганца и ванадия, а также экстремально высокий коэффициент Cr# являются типоморфными признаками хромшпинелидов

Таблица 2. Состав хромшпинелидов россыпи р. М. Нестеровка (мас.%)
Table 2. Composition of chromian spinels from the M. Nesterovka River placer (wt.%)

Оксид	Тип 1	Тип 1	Тип 2
Cr ₂ O ₃	44,96	47,40	27,51
FeO	1,66	3,68	0,37
MnO	13,68	13,22	8,20
TiO ₂	1,83	1,60	4,13
Al ₂ O ₃	0,50	0,53	1,42
SiO ₂	4,96	3,25	18,51
Cr#	0,99	0,99	0,95

из высокодифференцированных дунитов офиолитовых ассоциаций или расслоенных интрузий. Тип 2 «обедненный»: пониженное содержание Cr₂O₃ (27,5 мас.%), высокое SiO₂ (18,5 мас.%), Cr# = 0,95. Является продуктом глубокого гипергенного преобразования первичных хромитов в коре выветривания с активным выносом Al и Mg и привносом кремнезема. Экстремально высокие значения Cr# (0,95–0,99) указывают на формирование первичных хромитов в высокодифференцированных ультраосновных породах (дунитах), подвергшихся интенсивному метасоматозу. Это однозначное указание на мантийный, ультраосновной источник [15].

Платиноиды и бадделейт

В шлихах тяжелой фракции обнаружен минерал платиновой группы состава Pt — 53,97 мас.%, As — 41,26 мас.%, Te — 0,72 мас.% S — 0,26 мас.% — сперрилит (PtAs₂): присутствие в нем микропримесей Te и S подтверждает его магмогенную природу и связь с сульфидными расплавами ультраосновных-основных комплексов [2, 8]. Сперрилит является главным минералом платины в дунитах и хромититах.

Циркониевые минералы. В тяжелой фракции идентифицирован редкий аксессуарный минерал бадделейт (ZrO₂) — его железистая разновидность (ферробадделейт) имеет состав: Zr — 54,94 мас.%, O — 38,63 мас.%, Fe — 6,87 мас.%, где железо изоморфно замещает цирконий в кристаллической решетке. Стабильность бадделейта, а не циркона (ZrSiO₄) однозначно указывает на кристаллизацию из кремнезем-недосыщенного расплава, что характерно исключительно для ультраосновных-основных пород [12]. Помимо этого, рассчитанный для хромитов коэффициент хромистости

(Cr# = Cr / (Cr + Al)) составляет 0,99 для первичных разновидностей (табл. 1). Столь высокие значения Cr# характерны для хромшпинелидов из дунитов, сформировавшихся в условиях высоких степеней плавления мантийного вещества, и являются типоморфным признаком офиолитовых ассоциаций или дифференцированных расслоенных интрузий. В сочетании с находками сперрилита и бадделейта данный парагенезис однозначно указывает на наличие в области питания россыпи ультраосновного-основного магматического комплекса, перспективного на платиноиды и хромиты [2, 12, 15].

Сульфиды

Присутствие неизменных зерен борнита (Cu — 75,75 мас.%, Fe — 9,44 мас.%, S — 14,82 мас.%) и пирротина (Fe — 43,03 мас.%, S — 48,47 мас.%) и их совместное нахождение указывает на наличие в области сноса высоко- или среднетемпературного рудного объекта, вероятно, скарнового или медно-порфирового типа. Сохранность химически неустойчивого в гипергенных условиях борнита является важным поисковым признаком, определяющим расстояние транспортировки первыми километрами, и свидетельствует о близости коренного высоко- или среднетемпературного источника [3, 9].

На основе комплексного анализа данных предложена возможная модель формирования россыпи за счет размыва нескольких полигенных источников: Ультраосновной-основной магматический комплекс (расслоенная интрузия или офиолитовый аллохтон?). Среднетемпературная золото-кварцевая гидротермальная система — источник высокопробного золота (тип I), характерного для многих месторождений Сихотэ-Алиня. Низкотемпературная золото-ртутная

(сурьмяно-ртутная) минерализация. Источник ртутистого золота (тип III). Наличие таких проявлений согласуется с общей металлогенической специализацией региона [6]. Специализированная золото-уран-редкометалльная формация. Уникальный источник золота с примесями U и Rb (тип II), ранее неизвестный в районе исследования. Его выявление представляет значительный научный и поисковый интерес.

Заключение

Россыпь р. Малая Нестеровка характеризуется комплексным полимиктовым составом тяжелой фракции, указывающим на множественные источники питания. На основе микрозондового анализа выделены четыре геохимических типа самородного золота: высокопробное, уран-рубидиевое,

ртутьсодержащее и углеродистое. Выявление золота с содержанием U и Rb свидетельствует о наличии в регионе ранее неизвестной золото-уран-редкометалльной минерализации. Обнаружение ассоциации сперрилит + высокохромистый шпинелид ($Cr\# = 0,99$) + бадделеит является неоспоримым доказательством размыва ультраосновного-основного магматического массива, вероятно, расслоенной интрузии. Широкое развитие органоминеральных пленок на золоте и гипергенно измененных хромитов отражает активность постседиментационных процессов в россыпи. Близость коренных источников подтверждается сохранностью неустойчивых сульфидов (борнит) и определяет высокие перспективы выявления первичного оруденения в непосредственной близости от россыпи р. М. Нестеровка.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев Е.И., Молчанов В.П. Амальгама золота и ее минералы спутники (Дальний Восток, Приморье). Фундаментальные исследования. 2013. № 11–5. С. 958–963.
2. Молчанов В.П., Фэнгуй С. Платиноидно-золотые россыпи из углеродсодержащих пород сопредельных территорий юга дальнего востока России и северо-востока Китая: особенности состава, размещения и происхождения. Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2018. № 3. с. 11–18.
3. Моисеенко В.Г., Кузнецова И.В. Геохимическое сродство Au, U, и Th. Доклады Академии Наук. 2013. Т. 450. № 1. С. 335.
4. Патык-Кара Н.Г. Минерагения россыпей: типы россыпных провинций. М.: ИГЕМ РАН, 2008. 528 с.
5. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука. 1973. 347 с.
6. Ханчук А.И. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 680 с.
7. Alam, M., Li, S.R., Santosh, M., Yuan, M.W. Morphology and chemistry of placer gold in the Bagrote and Dainter streams, northern Pakistan: Implications for provenance and exploration. Geological Journal. 2019. No. 54. P. 1672–1687
8. Barkov A.Y., Tolstykh N.D., Nikiforov A.A., Martin R.F. The platinum-group minerals of the river Ko watershed, Sisim placer zone, Eastern Sayans, Russia, and the differentiation of multicomponent melts. The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology. 2023. Vol. 61. No. 4. P. 805–824.
9. Craw D., Youngson J.H., Leckie D.A. Transport and concentration of detrital gold in foreland. Ore Geology Reviews. 2006. Vol. 28. No. 4. P. 417–430.
10. Fuchs S.S., Williams-Jones D., Murray A.E., Couillard A.J., et al. Gold and uranium concentration by interaction of immiscible fluids (hydrothermal and hydrocarbon) in the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. Precambrian Research. 2017. Vol. 293. P. 39–55.
11. Large R.R., Gregory D.D., Steadman J.A., et al. Gold in the oceans through time. Earth and Planetary Science Letters. 2015. Vol. 428. P. 139–150.
12. Okrugin A., Gerasimov B. Paragenetic association of platinum and gold minerals in placers of the Anabar river in the Northeast of the Siberian platform. Minerals. 2023. Vol. 13. No. 1. С. 1–13.
13. Reith F., et al. Biogeochemical cycling of gold: Transforming gold particles from arctic Finland. Chemical Geology. 2018. Vol. 483. P. 511–529.
14. Townley B.K., Herail G., Makshev V., Palacios C., Parseval P., Sepulveda F., Orellana R., Rivas P., Ulloa C. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis. 2003. Vol. 3. P. 29–38.
15. Yudovskaya M.A., Kinnaird J.A., Abramova V.D., Grobler D.F., Dunnett T., Costin G., Barnes S.J. Zonation of Merensky-style platinum-group element mineralization in turfspruit thick reef facies (Northern limb of the Bushveld complex). Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists. 2017. Vol. 112. No. 6. P. 1333–1365.

REFERENCE

1. Medvedev E.I., Molchanov V.P. Gold amalgam and its associated minerals (Far East, Primorye). *Fundamental Research*. 2013. No. 11–5. P. 958–963 (In Russ.).
2. Molchanov V.P., Fenggui S. Platinum-gold placers from carbon-bearing rocks of the adjacent territories of the southern Russian Far East and northeastern China: features of composition, location and origin. *Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch*. 2018. No. 3. P. 11–18 (In Russ.).
3. Moiseenko V.G., Kuznetsova I.V. Geochemical relationship between Au, U, and Th // *Doklady Earth Sciences*. 2013. T. 450. № 1. C. 562–565
4. Patyk-Kara N.G. *Modern Methods of Placer Prediction*. Moscow: Nauka, 2010. 345 p. (In Russ.).
5. Petrovskaya N.V. *Native Gold*. Moscow: Nauka, 1973. 347 p. (In Russ.).
6. Khanchuk A.I. *Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Russian East: in 2 books*. Ed. A.I. Khanchuk. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. 680 p. (In Russ.).
7. Alam, M., Li, S.R., Santosh, M., Yuan, M.W. Morphology and chemistry of placer gold in the Bagrote and Dainter streams, northern Pakistan: Implications for provenance and exploration. *Geological Journal*. 2019. No. 54. P. 1672–1687
8. Barkov A.Y., Tolstykh N.D., Nikiforov A.A., Martin R.F. The platinum-group minerals of the river Ko watershed, Sisim placer zone, Eastern Sayans, Russia, and the differentiation of multicomponent melts. *The Canadian Journal of Mineralogy and Petrology*. 2023. Vol. 61. No. 4. P. 805–824.
9. Craw D., Youngson J.H., Leckie D.A. Transport and concentration of detrital gold in foreland. *Ore Geology Reviews*. 2006. Vol. 28. No. 4. P. 417–430.
10. Fuchs S.S., Williams-Jones D., Murray A.E., Couillard A.J., et al. Gold and uranium concentration by interaction of immiscible fluids (hydrothermal and hydrocarbon) in the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*. 2017. Vol. 293. P. 39–55.
11. Large R.R., Gregory D.D., Steadman J.A., et al. Gold in the oceans through time. *Earth and Planetary Science Letters*. 2015. Vol. 428. P. 139–150.
12. Okrugin A., Gerasimov B. Paragenetic association of platinum and gold minerals in placers of the Anabar river in the Northeast of the Siberian platform. *Minerals*. 2023. Vol. 13. No. 1. C. 1–13.
13. Reith F., et al. Biogeochemical cycling of gold: Transforming gold particles from arctic Finland. *Chemical Geology*. 2018. Vol. 483. P. 511–529.
14. Townley B.K., Herail G., Maksaev V., Palacios C., Parseval P., Sepulveda F., Orellana R., Rivas P., Ulloa C. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. 2003. Vol. 3. P. 29–38.
15. Yudovskaya M.A., Kinnaird J.A., Abramova V.D., Grobler D.F., Dunnett T., Costin G., Barnes S.J. Zonation of Merensky-style platinum-group element mineralization in turfspruit thick reef facies (Northern limb of the Bushveld complex). *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*. 2017. Vol. 112. No. 6. P. 1333–1365.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Медведев Е.И. — работая на данной территории, собрал полевой каменный материал для статьи, разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ивин В.В. — подготовил аналитические данные статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Evgeniy I. Medvedev — while working in this area, collected field rock material for the article, developed the article concept, prepared the article text, gave final approval to the published version, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Vitaliy V. Ivin — developed the article concept, prepared the article's analytical data, gave final approval to the published version, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Медведев Евгений Иванович* — научный сотрудник ФГБУН «Дальневосточный геологический институт» Дальневосточного отделения Российской академии наук.

159, пр-т 100-летия Владивостока, Владивосток, 690022, Россия

e-mail: Cage21@mail.ru

тел.: +7 (924) 232-05-52

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1791-2017>

Evgenii I. Medvedev* — Researcher, Far East Geological Institute Far East Branch Russian academy of science.

159, 100-years Vladivostok ave., 690022, Vladivostok, 690022, Russia

e-mail: Cage21@mail.ru

tel.: +7 (924) 232-05-52

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1791-2017>

Ивин Виталий Викторович — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией нелинейной металлогении ФГБУН «Дальневосточный геологический институт» Дальневосточного отделения Российской академии наук.

159, пр-т 100-летия Владивостока, Владивосток, 690022, Россия

e-mail: ivin_vv@mail.ru

тел.: +7 (924) 232-05-52

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7673-0099>

Vitaliy V. Ivin — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Head of the Laboratory, Laboratory of Nonlinear Metallogeny, Far East Geological Institute Far East Branch Russian academy of science.

159, 100-years Vladivostok ave., 690022, Vladivostok, 690022, Russia

e-mail: ivin_vv@mail.ru

tel.: +7 (924) 232-05-52

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7673-0099>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



О НОВОЙ НАХОДКЕ АММОНИТА СЕМЕЙСТВА DACTYLIOSERATIDAE HYATT (НИЖНЯЯ ЮРА, НИЖНИЙ ТОАР) В ТАВРИЧЕСКОМ ФЛИШЕ НА СЕВЕРНОМ СКЛОНЕ КАЧИНСКОГО ПОДНЯТИЯ (ГОРНЫЙ КРЫМ)

Б.А. ЗАЙЦЕВ¹, В.Н. КОМАРОВ^{2,*}, А.В. ОВЧИННИКОВ³, Ю.С. ПОЕЗЖАЕВ³

¹ НСПК «Пещера Таврида», ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»
4, проспект Академика Вернадского, Симферополь 295007, Республика Крым, Россия

² ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая., Москва 117997, Россия

³ ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»
85, ул. Победы., Белгород 308015, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Породы таврической серии, слагающие складчатый фундамент Крымских гор, являются наиболее древними стратифицированными отложениями Горного Крыма. История их изучения насчитывает более 230 лет. К настоящему времени из таврической серии известны очень редкие ископаемые остатки. Новые находки аммонитов имеют важнейшее значение для уточнения относительного возраста и детальной корреляции отложений.

Цель. Изучение впервые обнаруженного в Крыму раннетоарского аммонита рода *Peronoceras* сем. Dactylioceratidae.

Материалы и методы. Материалом является неполный деформированный отпечаток с частью ядра молодой раковины аммонита *Peronoceras* sp. ind. Его препарирование проводилось механическим способом, а фотосъемка и обработка ее результатов — с использованием цифровых технологий.

Результаты. Детально изучен впервые обнаруженный в Крыму раннетоарский аммонит рода *Peronoceras*. Показано биостратиграфическое значение этой находки.

Закключение. Возможно, крымский экземпляр близок к *Peronoceras subarmatum* (Young et Bird, 1822) с регулярными, широко посаженными грубыми ребрами и фибуляцией, присутствующей уже на внутренних оборотах. Слои с *Peronoceras* sp. в Крыму предположительно имеют более высокое положение, чем слои с *Dactylioceras* cf. *athleticum* (Simpson, 1855), что согласуется с биостратиграфическим строением классического разреза тоара Великобритании.

Ключевые слова: аммониты, нижний тоар, таврическая серия, Качинское поднятие, Крым

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Зайцев Б.А., Комаров В.Н., Овчинников А.В., Поезжаев Ю.С. О новой находке аммонита семейства Dactylioceratidae Hyatt (нижняя юра, нижний тоар) в таврическом флише на северном склоне Качинского поднятия (горный Крым). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):19—31. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-19-31> EDN: [MNDRCX](https://edn.nmrcx.ru/)

Статья поступила в редакцию 06.01.2026

Принята к публикации 21.01.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

A NEW FINDING OF DACTYLIOCERATIDAE HYATT AMMONITE (LOWER JURASSIC, LOWER TOARCIAN) IN THE TAURICAN FLYSCH ON THE NORTHERN SLOPE OF THE KACHA UPLIFT (MOUNTAINOUS CRIMEA)

BOGDAN A. ZAITSEV¹, VLADIMIR N. KOMAROV^{2,*}, ALEXANDER V. OVCHINNIKOV³, YURI S. POEZHAYEV³

¹ Scientific Speleological and Paleontological Complex «Tavrida Cave», Vernadsky Crimean Federal University
4, Vernadsky Ave., Simferopol 295026, Russia

² Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

³ Belgorod State National Research University
85, Pobedy str., Belgorod 308015, Russia

ABSTRACT

Background. The rocks of the Taurican series, which form the folded basement of the Crimean Mountains, are the most ancient stratified deposits in the mountainous Crimea. Their study has spanned over 230 years. The Taurican series is known for very rare fossils. New ammonite findings are essential for clarifying the relative age and detailed correlation of deposits.

Aim. To study the early Toarcian specimen of *Peronoceras* (Dactylioceratidae), newly found in Crimea.

Materials and methods. The specimen is an incomplete, deformed imprint containing a part of the shell core of a young *Peronoceras* sp. ind. Its preparation was performed mechanically; photography and processing of results were carried out using digital technologies. Before photography, the specimen was sprayed with ammonium chloride.

Results. The Lower Toarcian specimen of *Peronoceras* newly found in Crimea was studied in detail. The biostratigraphic significance of this finding was shown.

Conclusions. The Crimean specimen is possibly related to *Peronoceras subarmatum* (Young et Bird, 1822) with regular, widely spaced coarse ribs and fibulation already present on the inner whorls. Crimean strata containing *Peronoceras* sp. presumably occupy a higher position than those containing *Dactylioceras* cf. *athleticum* (Simpson, 1855), which is consistent with the biostratigraphic structure of the classic Toarcian section of Great Britain.

Keywords: ammonites, Lower Toarcian, Taurican series, Kacha Uplift, Crimea

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Zaitsev B.A., Komarov V.N., Ovchinnikov A.V., Poezhaev Yu.S. A new finding of Dactylioceratidae Hyatt ammonite (lower jurassic, Lower Toarcian) in the taurican flysch on the northern slope of the Kacha Uplift (Mountainous Crimea). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):19—31. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-19-31> EDN: MNDRCX

Manuscript received 06 January 2026

Accepted 21 January 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Таврический флиш («таврическая серия» [23, 24 и др.], «таврическая формация» [7, 40], «бассоморфная терригенная флишоидно-флишевая геологическая формация среднего триаса — нижней юры» [4]) слагает «складчатый фундамент» Крымских гор. Это

наиболее древние стратифицированные отложения Горного Крыма, история изучения которых насчитывает более 230 лет (слои «глинистого сланца» [16, 23, 33, 39 и др.]).

Породы таврической серии представляют собой моно-олигомиктовый глубоководный флиш.

Современные аналоги таких пород формируются на батинальных склонах и подножиях пассивных и активных континентальных окраин [15] и др.). Мощные толщи глубоководных турбидитных последовательностей, сходных по составу и возрасту с таврическим флишем, широко распространены вокруг всего Черноморского бассейна: в Северной Добрудже [42, 63, 64], на Кавказе [52], в центральной части Понтийских гор и вплоть до побережья Эгейского моря [61].

Таврический флиш имеет подтвержденный находками ископаемой фауны поздне триасово-ааленский возраст [2, 18, 30]. Указания на присутствие в его структуре среднего триаса [6, 17, 31, 44] впоследствии не нашли подтверждения: было показано, что известная в Горном Крыму среднетриасовая фауна происходит из глыб терригенных пород, не относящихся к таврическому флишу [1, 29, 30].

В структуре таврической серии представлена большая часть всего объема нижней юры Горного Крыма. При этом юрская часть серии обычно выделяется в качестве самостоятельной «верхнетаврической свиты» [24–26 и др.], иногда — в составе ряда последовательных литостратиграфических подразделений [30, 31 и др.]. При этом породы таврической серии очень сложно дислоцированы. В них можно наблюдать почти все типы надвиговых структур и разные типы складок: асимметричные, дважды опрокинутые, чешуйчатые веера, дуплексы и др. [47, рис. 2; 48, 49 и др.]. По этой причине «сколь-нибудь протяженные и продолжительные разрезы серии фактически неизвестны» [27, с. 20]. Кроме того, находки аммонитов (равно, как и другой стратиграфически значимой ископаемой фауны) в таврическом флише крайне редки. Вследствие чего породы таврической формации до сих пор остаются практически нерасчлененными.

Большинство аммонитов, когда-либо найденных в таврическом флише, происходит из нескольких местонахождений на северном склоне Качинского поднятия, что во многом объясняется хорошей геологической изученностью района [11, 12]. Все опубликованные описания аммонитов из этих местонахождений характерны для нижнего тоара. В их числе разнообразные представители *Dactylioceras* sp. [13, 24–26], *D. (D.) cf. athleticum* (Simpson) [39], *D. (D.) ex gr. commune* (J. Sowerby) и *D. (Orthodactylites) semicelatum* (Simpson) [10]), а также *Hildoceras* sp. [10], *Elegantoceras* sp., найденный на юго-западном склоне горы Большой

Кермен [11], и *Harpoceras* sp., обнаруженный возле с. Солнечноселье [3].

Отмечается, что плинсбахские *Liparoceras* Hyatt («*Aegoceras*» и «*Liparoceras*») из Мангушского оврага, обнаруженные близ с. Трудолюбовка Л.В. Фирсовым [24, с. 39], «к сожалению, не были описаны и впоследствии утеряны» [39, с. 24]. Хотя эти находки неоднократно цитировались как «типичные среднелейасовые» [25, с. 25; 29–31] и служили главным аргументом для обоснования плинсбахского возраста ряда местных стратиграфических подразделений, выделявшихся в структуре таврического флиша разными авторами: верхнетаврической свиты [24–26], патильской толщи [19, с. 27], верхней части толщи IV толсторитмичного флиша [31], нижней части толщи IV разноритмичного флиша [30].

В Юго-Восточном Крыму (Туакское поднятие) находки раннеюрских аммоноидей из таврического флиша упоминались только в работах Института геологических наук НАН УССР и всегда без изображений, описаний или сведений о месте хранения. Так, возле с. Морское отмечались находки «плохой сохранности», напоминающие «геттангские формы, известные по литературе из долины р. Бодрак» [33, с. 69]. Подчеркнем, что находки *Schlotheimiidae* Spath из терригенных пород Симферопольского меланжа в долине р. Бодрак [10] были впоследствии отнесены не к геттангу [18, с. 209], а к позднему синемюру [13]. Все другие находки из Юго-Восточного Крыма были сделаны «к северу от с. Рыбачье» и относятся к раннему (*Dactylioceras tenuicostatum* (Young et Bird)) и позднему (*Grammoceras subquadratum* (= *Pseudogrammoceras subquadratum* (Buckman) [60])) тоару [34, с. 104]. Кроме того, раннетоарский *D. ex gr. commune* (J. Sowerby), обнаруженный возле с. Приветное «в базальных горизонтах стратотипа скалтурашинской свиты» [35], также может происходить из таврического флиша [9, с. 73].

Раннеюрские (синемюрско-плинсбахские) аммоноидеи, собранные А.С. Моисеевым в пределах Южнобережного поднятия [21, 22], были найдены в нетипичных для таврической серии «экзотических» породах: кварцитовидных песчаниках («моховых камнях» [24, с. 38; 25, с. 25; 30, 43, с. 99]) и глыбах известняка [21, с. 962]. Отмечается, что эти породы вряд ли находились в коренном залегании [37, с. 159] и, вероятно, являются либо олистолитами внутри «Ливадийской гравитационно-оползневой олистостромы» [41, с. 66, с. 192], либо глыбами в Южнобережном меланже (выделен В.В. Юдиным [46]).

Нужно подчеркнуть, что ни в одной из процитированных выше работ находки раннеюрских аммоноидей за пределами северного склона Качинского поднятия не были изображены. Это делает приведенные в этих работах определения и основанные на них заключения о возрасте таврического флиша, строго говоря, непроверяемыми.

Фактический материал и методика исследования

Материалом для исследования послужила находка студента 1-го курса НИУ «БелГУ» специальности 21.05.02 «Прикладная геология» специализации «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» Ю.С. Поезжаева, сделанная 23 июня 2025 г. в ходе проведения учебной геологической практики [28]. Аммонит был обнаружен при прохождении учебного маршрута в правом борту Мангушской балки в 280 м к юго-западу от устья оврага Яман, в правом борту небольшого безымянного оврага в 60 м от его устья (рис. 1, 2).

Обнаруженный экземпляр имеет 2,2 см в поперечнике. Фрагментарно сохранились два оборота. Внутренний оборот частично представляет собой деформированное внутреннее ядро, а частично — отпечаток внешней поверхности раковины на темно-сером алевролите. На внутреннем обороте, помимо сохранившихся латеральных сторон, присутствует деформированный фрагмент вентральной стороны. Внешний оборот (сохранилось менее четверти) представляет собой отпечаток внешней поверхности раковины, область вентро-латерального перегиба не сохранилась. Аммонит хранится в отделе исторической геологии Учебно-выставочного центра «Геолого-минералогический музей имени А.Н. Петина», НИУ «БелГУ», г. Белгород (экз. № 10Ф1) (рис. 3).

Надсемейство Eoderoceratoidea Spath, 1929.
Семейство Dactylioceratidae Hyatt, 1867.
Подсемейство Dactylioceratinae Hyatt, 1867.
Род *Peronoceras* Hyatt, 1867.

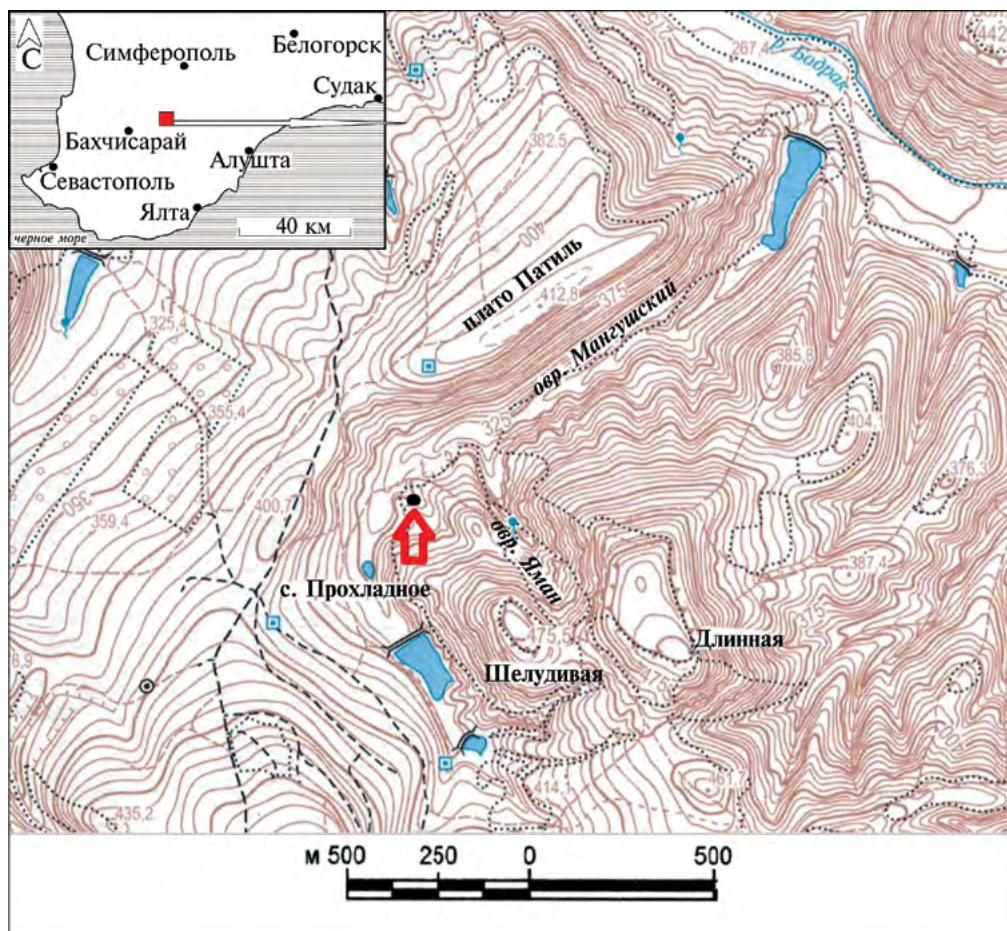


Рис. 1. Место находки *Peronoceras* sp.
Fig. 1. Place of discovery *Peronoceras* sp.



Рис. 2. Положение находки *Peronoceras* sp. в обнажении
Fig. 2. Position of the *Peronoceras* sp. find in the outcrop

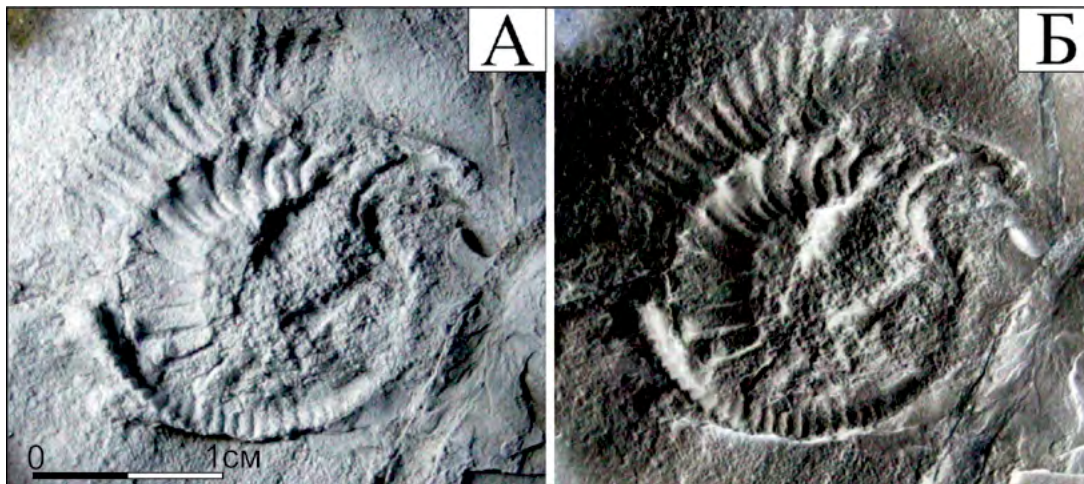


Рис. 3. *Peronoceras* sp., экз. № 10Ф1, неинвертированная (А) и инвертированная (Б) фотографии, ув. $\times 2$ (снято с напылением хлоридом аммония)

Fig. 3. *Peronoceras* sp., specimen No. 10F1, non-inverted (A) and inverted (B) photographs at a scale of $\times 2$ (photographed with ammonium chloride spraying)

Типовой вид: *Ammonites fibulatus* J. de C. Sowerby, 1823, p. 147, Tab. CCCCVII, fig. 2. В качестве типа рода обозначен С.С. Бакменом [53, p. v]. Лектотип происходит из Уитби (Северный Йоркшир, Англия), был выбран М.К. Ховартом [56, p. 260] из трех синтипов коллекции Соуэрби; переизображен в [54, 73, рис. 2] и в [57, 45 рис. 2а-б]. Хранится

в Музее естественной истории, Лондон (The Natural History Museum, London), № BMNH 43911.

Peronoceras sp.

Форма: раковина небольшого размера, офиоконовая, с едва соприкасающимися оборотами, которые в ходе онтогенеза очень медленно возрастают в высоту. Латеральные стороны

слабовыпуклые. Сохранившиеся обороты деформированы, что не позволяет судить о форме их сечения. Умбиликус очень широкий, мелкий, чашеобразный.

Скульптура: на внутреннем обороте ребристость относительно грубая — 17 первичных ребер на половину оборота. Первичные ребра прямые, приостренные, слабопорадиальные. В конце сохранившейся части внутреннего оборота ребра становятся слабовогнутыми и фибулируют, сливаясь попарно и образуя в месте слияния крупный, притупленный бугор, являющийся основанием для шипа (под фибуляцией здесь и далее понимается объединение двух или более боковых ребер одним бугорком, расположенным у внешнего края раковины ([5, 14, 53] и др.)). Точка ветвления ребер расположена непосредственно на вентролатеральном перегибе. На сохранившемся участке внутреннего оборота между тремя первичными ребрами на латеральной стороне располагается 7 вторичных ребер на вентральной стороне: таким образом, значительная часть первичных ребер в точке ветвления разделяется на три вторичных ребра.

На внешнем обороте ребристость значительно более плотная (сохранилось 14 первичных ребер на менее чем четверти оборота). По направлению к вентролатеральному перегибу ребра несколько утолщаются. Области вентролатерального перегиба и фибуляции не сохранились.

Сравнение и замечания. Согласно М.К. Ховарту, фибуляция ребер в сочетании со сжатым с боков сечением оборотов является диагностическим признаком, достаточным для отнесения к роду *Peronoceras* [56, с. 259]. Все другие *Dactyloceratidae*, для которых характерны фибулирующие ребра, имеют более широкие обороты, либо сжатые дорзовентрально, либо изометричные (с примерно равными шириной и высотой).

Описываемый экземпляр несет регулярно расположенные фибулирующие ребра в конце сохранившейся части внутреннего оборота. И хотя сохранность не позволяет установить форму сечения, тем не менее раковина имеет очень мелкий умбиликус. Это дает основание говорить об очень медленном нарастании оборотов в ширину и об их относительно узком, сжатом с боков сечении, характерном для *Peronoceras*. Таким образом, на основании сочетания фибуляции ребер и относительно узкого сечения оборотов, обсуждаемый аммонит с осторожностью отнесен к *Peronoceras*.

От близкого *Porpoceras* Buckman и распространенного в Средиземноморском регионе *Fibuloeloceras* Venturi et Ferri, *Peronoceras*

отличаются регулярно расположенными фибулирующими ребрами на определенных стадиях роста [56, 57], без чередования одиночных и фибулирующих ребер [59].

В отличие от *Rakusites* Guex, для которого также характерны фибулирующие ребра [65, с. 148], у *Peronoceras* обороты значительно медленнее возрастают в высоту. От *Septimaniceras* Faure отличается хорошо развитой ребристостью на внутренних оборотах; от *Nodicoeloceras* Buckman — значительно более мелким умбиликусом и менее крупными бугорками; от *Catacoeloceras* Buckman — фибуляцией ребер.

Возможно, крымский экземпляр близок к *Peronoceras subarmatum* (Young et Bird) с регулярными, широко посаженными грубыми ребрами и фибуляцией, присутствующей уже на внутренних оборотах.

Стратиграфическое распространение рода ограничено интервалом от терминальной подзоны Sublevisoni (зона Bifrons) нижнего тоара [55] до низов зон Variabilis/Gradata верхнего тоара [59]. Однако наиболее широко он распространен в нижней и средней частях подзоны Fibulatum (зона Bifrons). М.К. Ховарт вообще ограничивает стратиграфический интервал распространения рода подзоной Fibulatum [57]. Например, в Великобритании основание подзоны Fibulatum проводится по первому появлению видов *Peronoceras* [56, с. 245], а ее индексом является *Peronoceras fibulatum* (J. de C. Sowerby) [62]. Подзона Fibulatum (с *Peronoceras* и близкородственным ему *Porpoceras*) в Британии залегает непосредственно на подзоне Commune (Sublevisoni) с характерным для нее *Dactyloceras athleticum* (Simpson) [56, с. 259].

Интересно, что находка *Dactyloceras* cf. *athleticum* (Simpson), опубликованная ранее в работе [39], происходит из того же местонахождения, что и описываемый в нашей статье экземпляр *Peronoceras*. Вероятно, что, как и в классических разрезах тоара Великобритании, слои с *Peronoceras* sp. в Крыму имеют более высокое стратиграфическое положение, чем слои с *Dactyloceras* cf. *athleticum* (соответствуют терминальной подзоне Commune [56, с. 259]), соответствующее подзоне Fibulatum зоны Bifrons нижнего тоара [54].

Географическое распространение: род *Peronoceras* распространен в Европе, на Кавказе (зона Bifrons нижнего тоара Грузии [38]), в Северной Африке (горы Атлас), Вьетнаме, Иране, Памире, Японии, Канаде (Британская Колумбия, Альберта, Юкон), США (Аляска), Чили, Аргентине и Перу. В Крыму его присутствие устанавливается впервые.

Другие находки Dactyliosceratidae из тоара Крыма указываются из стратотипического разреза битакской свиты (выделена А.С. Моисеевым [20]). Здесь в районе с. Строгановка в 1972 г. в «грубозернистых желтовато-серых песчаниках с большим количеством растительных остатков» был обнаружен раннетоарский *Dactyliosceras* cf. *commune* (J. Sowerby) (изображен в [8], рис. на с. 130). Впрочем, отнесение этого аммонита к Dactyliosceratidae не является однозначным (М.А. Рогов, ГИН РАН, устное сообщение).

Находки тоарских Dactyliosceratidae известны также в породах, которые в настоящее время относят к Симферопольскому меланжу (выделен В.В. Юдиным [45]). В его структуре присутствуют глыбы (от десятков сантиметров до сотен метров в поперечнике) пород различного генезиса, возраста и состава, включенные в хаотически дислоцированный матрикс [50, 51].

В глыбах терригенных пород Симферопольского меланжа находили раннетоарских «*Dactyliosceras* ex gr. *commune* (J. Sowerby)» (флиш в долине р. Бодрак [33, с. 63]) и «*Dactyliosceras tenuicostatum* (Young et Bird)» («в районе с. Лозовое в глинистых сланцах» [34, с. 104]). Однако изображений и описаний этих находок не приводилось. Значительно больше находок известно

из глыб карбонатных пород Симферопольского меланжа. На южной окраине Симферополя из глыбы вишнево-красного известняка упомянута находка *Catacoeloceras* cf. *crassum* (Young et Bird) [58, с. 100]. Позднее этот аммонит был переопределен как *Nodicoeloceras fonticulum* (Simpson) [12]. В таких же глыбах обнаружены *Dactyliosceras* (*Dactyliosceras*) ex gr. *commune* (J. Sowerby) и *Nodicoeloceras* ex gr. *crassoides* (Simpson) [12].

Заключение

Присутствие рода *Peronoceras* в Крыму устанавливается впервые. Возможно, крымский экземпляр близок к *Peronoceras subarmatum* (Young et Bird), для которого характерны регулярно расположенные, широко посаженные грубые ребра с фибуляцией, присутствующей уже на внутренних оборотах. В Крыму слои с *Peronoceras* sp., по всей видимости, имеют более высокое положение, чем слои с *Dactyliosceras* cf. *athleticum*, что согласуется с биостратиграфическим строением классических разрезов тоарского яруса Великобритании.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Д.Б. Гуляеву (г. Ярославль) за участие в обсуждении и ценные замечания, которые позволили существенно улучшить рукопись.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев А.С., Кузьмичева В.И., Чернов В.Г. Первые находки поздне триасовых гидроидов в Горном Крыму. Вестник МГУ. Сер. 4. Геол. 1989. № 1. С. 45–51.
2. Аркадьев В.В., Федорова А.А. Новые данные о возрасте таврической серии в бассейне р. Бодрак (Юго-Западный Крым). Труды Крымской Академии наук. 2018. С. 43–49.
3. Атабекян А.А. Аммониты // в кн.: Аркадьев В.В., Богданова Т.Н. (ред.) Атлас меловой фауны Юго-Западного Крыма. СПб.: Горный ин-т., 1997. С. 107–145.
4. Бискэ Г.С., Палазьян И.Ю., Прозоровский В.А., Шванов В.Н. Формационное картирование северо-восточной части Качинского антиклинория в Крыму. Вестник ЛГУ. Сер. 7. 1989. Вып. 2. № 14. С. 12–20.
5. Дагис А.А. Тоарские аммониты (Dactyliosceratidae) севера Сибири. Труды Института геологии и геофизики Сибирского отделения Академии наук СССР. 1968. Вып. 40. 108 с.
6. Дагис А.С., Шванов В.Н. Об открытии среднего триаса в таврической свите Крыма. Доклады АН СССР. 1965. Т. 164. № 1. С. 161–163.
7. Двойченко П.А. Стратиграфия Крыма. Зап. Крымского о-ва естествоисп. и любителей природы. 1926. Т. IX. С. 15–38.
8. Довгаль Ю.М., Парышев А.В. К проблеме битакской свиты (Горный Крым). Геологический журнал. 1979. Т. 39. № 4. С. 127–131.
9. Зайцев Б.А. Раннеюрские аммоноидеи Горного Крыма. Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. Материалы IX Всероссийского совещания с международным участием. Сыктывкар, 9–16 сентября 2023 г. Отв. ред. Рогов М.А., ред. Щенетова Е.В., Ипполитов А.П., Тесакова Е.М. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2023. С. 72–77.
10. Зайцев Б.А., Аркадьев В.В. Новые данные о нижнеюрских аммонитах бассейна реки Бодрак (Юго-Западный Крым). Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 21–30.
11. Зайцев Б.А., Аркадьев В.В., Гаврилова В.А. О раннеюрских аммонитах и двустворках бассейна р. Бодрак (Юго-Западный Крым). В кн.: Цейслер В.М. (отв. ред.) XIII научные чтения «Проблемы региональной геологии Северной Евразии». Москва, 13 апреля 2022 г. Материалы конференции. М.: «ПАРАДИГМА», 2022. С. 32–36.
12. Зайцев Б.А., Ипполитов А.П., Рогов М.А., Тищенко А.И. Раннеюрские (плинсбах-тоар) аммоноидеи из глыб известняков Лозовского карьера

- (г. Симферополь, Центральный Крым). Стратиграфия и геологическая корреляция. 2026. Т. 34. № 2. (в печати).
13. Казакова В.П. К стратиграфии нижнеюрских отложений бассейна р. Бодрак (Горный Крым). Вестник МГУ. Сер. геол. 1962. № 1. С. 80–87.
 14. Казакова В.П. Материалы к систематике некоторых представителей семейства Dactyloceratidae Hyatt, 1867 (Ammonoidea, нижняя юра). Бюллетень МОИП. Отд. геол. 1973. Т. XLVIII. Вып. 5. С. 112–123.
 15. Кеннетт Дж. Морская геология: В 2-х т. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 397 с.
 16. Козин Г. Минералогическое описание горь, лежащих по Южному берегу Крымского полуострова. Горный журнал. 1828. Кн. V. С. 21–45.
 17. Логвиненко Н.В., Карпова Г.В., Шапошников Д.П. Литология и генезис таврической формации Крыма. Харьков: Изд. ХГУ, 1961. 400 с.
 18. Миклухо-Маклай А.Д., Поршняков Г.С. К стратиграфии юрских отложений бассейна р. Бодрак. Вестник Ленинградского ун-та. Геол. 1954. № . 4. С. 208–210.
 19. Милеев В.С., Вишневицкий Л.Е., Фролов Д.К. Триасовая и юрская системы. В кн.: Мазарович О.А., Милеев В.С. (ред.). Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма. Т. 1. Стратиграфия мезозоя. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. С. 5–79.
 20. Моисеев А.С. О возрасте песчаников и конгломератов дер. Битак близ Симферополя. Бюллетень Московского общества испытателей природы. отд. геол. 1924. № 1(2). С. 26–27.
 21. Моисеев А.С. О фауне из нижнеюрских известняков Крыма. Известия Геологического комитета. 1925. Т. XLIV. № . 10. С. 959–988.
 22. Моисеев А.С. О лейасовых аммонитах Крыма. Ученые записки ЛГУ. Сер. геол.-почв. наук. 1944. Вып. 11. С. 29–37.
 23. Монпере де. Д. Письмо о главных геологических явлениях в Крыму и на Кавказе, адресованное к Эли де Бомону. Выписка из другого письма г. Дюбуа к г. Бомону 9 мая 1837 года. Горный журнал. 1838. Ч. 1. № 3. С. 345–397.
 24. Муратов М.В. О стратиграфии триасовых и нижнеюрских отложений Крыма. Известия вузов. Геология и разведка. 1959. № 11. С. 31–41.
 25. Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. М.: ГОНТИ, 1960. 208 с.
 26. Муратов М.В. Руководство по учебной геологической практике в Крыму. Т. I: Методика проведения геологической практики и атлас руководящих форм. М.: Недра, 1973. 232 с.
 27. Никишин А.М., Романюк Т.В., Московский Д.В., Кузнецов Н.Б., Колесникова А.А., Дубенский А.С., Шешуков В.С., Ляпунов С.М. Верхнетриасовые толщи Горного Крыма: первые результаты U-Pb датирования детритовых цирконов. Вестник Московского ун-та. Сер.4. Геология. 2020. № . 2. С. 18–33.
 28. Овчинников А.В., Агафонова Г.В., Юрченко Г.Ю. Учебная геологическая практика: учеб. пособие. Белгород: ЦПП ИД «БелГУ» НИУ «БелГУ». 2025. 136 с.
 29. Панов Д.И., Болотов С.Н., Никишин А.М. Схема стратиграфического расчленения триасовых и нижнеюрских отложений Горного Крыма. В кн.: Геодинамика и нефтегазоносные системы Черноморско-Каспийского региона. Сборник докладов III Международной конференции «Крым-2001». Крым, Гурзуф, 17–21 сентября. Симферополь: «Таврия-Плюс», 2001. С. 127–134.
 30. Панов Д.И., Болотов С.Н., Косоруков В.Л., Камзолкин В.А., Пикулик Е.А., Шиханов С.Е. Стратиграфия и структура таврической серии (верхний триас-лейас) Качинского поднятия юго-западного Крыма. Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2009. Т. 84. Вып. 5. С. 52–73.
 31. Панов Д.И., Бурканов Е.И., Гайдук В.В., Илькевич Д.Г. Новые данные по геологии триасовых и нижнеюрских отложений в междуречье Марты и Бодрака (юго-западная часть Горного Крыма). Вестник МГУ. Сер. геол. 1978. № 1. С. 47–55.
 32. Паллас П.С. Краткое физическое и топографическое описание Таврической области. СПб.: Имп. тип., 1795. 72 с.
 33. Пермяков В.В. Розчленування лейасу геосинклінальних областей півдня Європейської частини СРСР. Геологический журнал. 1962. Т. 22. Вип. 3. С. 58–65.
 34. Пермяков В.В. Крим і Причорноморська западина. В кн.: Ямниченко І.М. (відп. ред.) Стратиграфія УРСР. Т. VII. Юра. Киев: Наукова думка, 1969. С. 101–125.
 35. Пермяков В.В., Пермякова М.Н., Чайковский Б.П. Новая схема стратиграфии юрских отложений Горного Крыма. Киев: Институт геол. наук АН УССР. 1991. Препринт. № 91–12. 38 с.
 36. Романовский Г.Д. Геологический очерк Таврической губернии и обзоръ Крымскаго полуострова относительно условий для артезианскихъ колодезь. Горный журнал. 1867. № . 7. С. 69–100.
 37. Славин В.И. Современные геологические процессы в Юго-Западном Крыму (учебное пособие по общегеологической практике). 2-е изд. М.: изд-во МГУ, 1975. 196 с.
 38. Топчишвили М.В., Ломинадзе Т.А., Церетели И.Д., Тодриа В.А., Надареишвили Г.Ш. Стратиграфия юрских отложений Грузии. Тр. Геол. ин-та им. А.И. Джанелидзе, Нов. сер. 2006. Вып.122. 453 с.
 39. Туров А.В., Комаров В.Н., Андрухович А.О., Шаройко Ю.А. О новых находках нижнеюрских аммонитов в восточной части Бахчисарайского района Крыма. Известия вузов. Геология и разведка. 2002. № 2. С. 23–28.
 40. Фохт К.К. Годовой, отчет за 1910 г. Известия Геологического Комитета. 1911. Т. XXX. № 3. С. 17–20.
 41. Чайковский Б.П. Отчет по изучению опорных разрезов триас-юрских (таврическая серия) отложений Горного Крыма, 1990–1994 гг. Симферополь: ПГО

- «Крымгеология», 1994. 252 с. <https://efgi.ru/object/3225854>
42. *Чемберски Х., Ранкова Т., Антова Н., Николов Г.* Триаската система в България — веществен състав, седиментационни обстановки и геодинамични събития. Сп. Бълг. геол. д-во. 1996. Т. 57. № 2. С. 1–18.
43. *Шалимов А.И.* Юрская система. Нижний отдел. Ред. Муратов М.В. Геология СССР. 1969. т. VIII: Крым. Часть 1: Геологическое описание. М.: Недра, 1969. С. 89–99.
44. *Шванов В.Н.* Литостратиграфия и структура таврической свиты в бассейне р. Бодрак в Крыму. Вестник Ленинградского ун-та. Геол. № 6. Вып. 1. 1966. С. 153–156.
45. *Юдин В.В.* Симферопольский меланж. Доклады РАН. 1993. Т. 333. № 2. С. 250–252.
46. *Юдин В.В.* Микститы Горного Крыма. Доклады АН. 1998. Т. 363. № 5. С. 666–669.
47. *Юдин В.В.* Надвиговые структуры в обнажениях Крыма для понимания сложных сейсмических моделей. Современные методы сейсморазведки при поисках месторождений нефти и газа в условиях сложнопостроенных структур (Сейсмо-2011): Тезисы 2-й Международной научно-практической конференции (г. Феодосия, АР Крым, Украина, 18–24 сентября 2011 г.). Феодосия, CD-R, № CS-2011: 2011а. С. 1–5.
48. *Юдин В.В.* Геодинамика Крыма. Монография. Симферополь: ДИАИПИ, 2011б. 336 с.
49. *Юдин В.В.* Происхождение складчатости во флише таврической формации Крыма. Труды Крымской Академии наук. 2021. С. 78–92.
50. *Юдин В.В., Зайцев Б.А.* Проблема эскиординской свиты в Крыму. Отв. ред. *Захаров В.А.*, ред. *Рогов М.А., Щепетова Е.В., Ипполитов А.П.* Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. VIII Всероссийское совещание. Научные материалы. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020а. С. 262–276.
51. *Юдин В.В., Зайцев Б.А.* Строение холма Хаясы в Симферопольском меланже (Республика Крым). Отв. ред. *Захаров В.А.*, ред. *Рогов М.А., Щепетова Е.В., Ипполитов А.П.* Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии. VIII Всероссийское совещание. Научные материалы. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020б. С. 277–281.
52. *Adamia S., Zakariadze G., Chkhotua T., Sadradze N., Tsereteli N., Chabukiani A., Gventsadze A.* Geology of the Caucasus: a review. Turkish Journal of Earth Sciences. 2011. V. 20. No. 5. P. 489–544.
53. *Buckman S.S.* Yorkshire Type Ammonites Vol. 1 parts III–V. London: Wheldon & Wesley. 1911. P. iii–vi, 23–44.
54. *Dean W.T., Donovan D.T., Howarth M.K.* 1961. The Liassic ammonite zones and subzones of the north-west European Province. Bulletin of the British Museum (Natural History). Geol. Series. 1961. V. 4. P. 435–505.
55. *Gabilly J.* Le Toarcien a Thouars et dans le centre-ouest de la France. Paris: Centre National Recherche Scientifique (Les Stratotypes Francais, 3). 1976. 217 p. (In French).
56. *Howarth M.K.* The stratigraphy and ammonite fauna of the Upper Lias of Northamptonshire. Bulletin of the British Museum (Natural History), Geol. series. 1978. V. 29. No. 3. P. 235–288.
57. *Howarth M.K.* Part L, Revised, Volume 3B, Chapter 4: Psiloceratoidea, Eodoceratoidea, Hildoceratoidea. Treatise Online. 2013. V. 57. P. 1–139.
58. *Ippolitov A.P., Tischenko A.I., Rogov M.A.* Finds of a Unique Upper Toarcian Fauna from the SW Crimea (Ukraine). Earth Science Frontiers. 2010. V. 17, Special Issue. P. 100–101.
59. *Kovacs Z.* Toarcian Dactylioceratidae (Ammonitina) from the Gerecse Mts (Hungary). Hantkeniana. 2014. V. 9. P. 45–77.
60. *Metodiev L.S.* Grammoceras, Pseudogrammoceras et Podagrosites (Grammoceratinae, Ammonitina) du Toarcien superieur dans la region du Balkan (Bulgarie). Taxonomie et biostratigraphie. Geologica Balcanica. 2002. V. 32. No. 2–4. P. 165–189. (In French).
61. *Okay A.I.* Was the Late Triassic orogeny in Turkey caused by the collision of an oceanic plateau? / *E. Bozkurt, J.A. Winchester, J.A.D. Piper* (eds) Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area. Geological Society of London, Special Publication. 2000. V. 173. P. 25–41.
62. *Page K.N.* The Lower Jurassic of Europe: its subdivision and correlation. Geol. Surv. Denmark Greenland Bull. 2003. No. 1. P. 23–59. DOI: 10.34194/geusb.v1.4646
63. *Sandulescu M.* Analyse geotectonique des chaines alpines situes autour de la Mer Noire occidentale. Ann. Inst. Geol. Geophys. 1980. V. 56. P. 5–54. (In French).
64. *Sengor A.M.C., Yilmaz Y., Sungurlu O.* Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: nature and evolution of the western termination of Palaeo-Tethys. Geological Society of America, Special Paper. 1984. V. 17. No. 1. P. 77–112.
65. *Venturi F., Ferri R.* Ammoniti Liassici dell'Appennino Centrale, 3rd edit. Tibergraph, Citta di Castello. Perugia. 2001. 268 p.

REFERENCES

1. *Alekseev A.S., Kuzmicheva V.I., Chernov V.G.* The first finds of Late Triassic hydroids in the Crimean Mountains. Vestn. Moscow State University. Ser. 4. Geol. 1989. No. 1. P. 45–51 (In Russ.).
2. *Arkadyev V.V., Fedorova A.A.* New data on the age of the Tauride series in the Bodrak River basin (southwestern Crimea). Proceedings of the Crimean Academy of Sciences. 2018. P. 43–49 (In Russ.).

3. Atabekyan A.A. Ammonites. In the book: Arkadyev V.V., Bogdanova T.N. (eds.) Atlas of the Cretaceous Fauna of Southwestern Crimea. St. Petersburg: Mining Institute, 1997. P. 107–145 (In Russ.).
4. Biske G.S., Palazyan I. Yu., Prozorovsky V.A., Shvanov V.N. Formational mapping of the northeastern part of the Kachin anticlinorium in Crimea. Vestn. LSU. Series. 7. 1989. Issue. 2. No. 14. P. 12–20 (In Russ.).
5. Dagens A.A. Toarcian ammonites (Dactyloceratidae) of northern Siberia. Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. 1968. Issue 40. 108 p. (In Russ.).
6. Dagens A.S., Shvanov V.N. On the discovery of the Middle Triassic in the Tauride Formation of Crimea. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1965. Vol. 164. No. 1. P. 161–163 (In Russ.).
7. Dvoichenko P.A. Stratigraphy of Crimea. Zap. Crimean Island of Naturalists and Nature Lovers. 1926. Vol. IX. P. 15–38 (In Russ.).
8. Dovgal Yu.M., Paryshev A.V. On the problem of the Bitak suite (Mountainous Crimea). Geological journal. 1979. Vol. 39. No. 4. P. 127–131 (In Russ.).
9. Zaitsev B.A. Early Jurassic ammonoids of the Crimean Mountains. Jurassic system of Russia: problems of stratigraphy and paleogeography. Proceedings of the IX All-Russian conference with international participation. Syktyvkar, September 9–16, 2023. Ed. Rogov M.A., ed. Shchepetova E.V., Ippolitov A.P., Tesakova E.M. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2023. P. 72–77 (In Russ.).
10. Zaitsev B.A., Arkadyev V.V. New data on the Lower Jurassic ammonites of the Bodrak River basin (Southwestern Crimea). Regional. geol. and metallogeny. 2019. No. 78. P. 21–30 (In Russ.).
11. Zaitsev B.A., Arkadyev V.V., Gavrilova V.A. On the Early Jurassic ammonites and bivalves of the Bodrak River basin (Southwestern Crimea). In the book: Zeisler V.M. (ed.) XIII Scientific Readings «Problems of Regional Geology of Northern Eurasia». Moscow, April 13, 2022. Conference Proceedings. Moscow: «PARADIGMA», 2022. P. 32–36 (In Russ.).
12. Zaitsev B.A., Ippolitov A.P., Rogov M.A., Tishchenko A.I. Early Jurassic (Pliensbachian-Toarcian) ammonoids from limestone blocks of the Lozovsky quarry (Simferopol, Central Crimea). Stratigraphy and geological correlation. 2026. Vol. 34. No. 2. (in press) (In Russ.).
13. Kazakova V.P. On the stratigraphy of the Lower Jurassic deposits of the Bodrak River basin (Mountainous Crimea). Vestn. MSU. Geological Series. 1962. No. 1. P. 80–87 (In Russ.).
14. Kazakova V.P. Materials for the systematics of some representatives of the family Dactyloceratidae Hyatt, 1867 (Ammonoidea, Lower Jurassic). Bulletin of MOIP. Separate Geological Survey. 1973. Vol. XLVIII. Issue 5. P. 112–123 (In Russ.).
15. Kennett J. Marine Geology: In 2 volumes. Vol. 1. Translated from English. Moscow: Mir, 1987. 397 p. (In Russ.).
16. Kozin G. Mineralogical description of the mountains lying on the southern coast of the Crimean Peninsula. Mining Journal. 1828. Vol. V. P. 21–45 (In Russ.).
17. Logvinenko N.V., Karpova G.V., Shaposhnikov D.P. Lithology and genesis of the Taurian formation of Crimea. Kharkov: Kharkiv State University Publ., 1961. 400 p. (In Russ.).
18. Miklouho-Maclay A.D., Porshnyakov G.S. On the stratigraphy of Jurassic deposits in the Bodrak River basin. Vestnik of the Leningrad University. Geol. 1954. No. 4. P. 208–210 (In Russ.).
19. Mileev V.S., Vishnevsky L.E., Frolov D.K. Triassic and Jurassic systems. In the book: Mazarovich O.A., Mileev V.S. (eds.). Geological structure of the Kachin uplift of the Crimean Mountains. T. 1. Stratigraphy of the Mesozoic. Moscow: Publishing house of Moscow University, 1989. P. 5–79 (In Russ.).
20. Moiseev A.S. On the age of sandstones and conglomerates of the village. Bitak near Simferopol. Bulletin of the Moscow Natural Research Department of Geology. 1924. No. 1(2). P. 26–27 (In Russ.).
21. Moiseev A.S. On the fauna from the Lower Jurassic limestones of Crimea. Izv. Geol. Committee. 1925. T. XLIV. No. 10. P. 959–988 (In Russ.).
22. Moiseev A.S. About Liassic ammonites of Crimea. Uch. zap. LSU. Ser. geol.-soil Sci. 1944. Issue. 11. P. 29–37 (In Russ.).
23. Montpere de. D. Letter on the main geological phenomena in the Crimea and the Caucasus, addressed to Elie de Beaumont. Extract from another letter from Mr. Dubois to Mr. Beaumont on May 9, 1837. Mining Journal. 1838. Part 1. No. 3. P. 345–397 (In Russ.).
24. Muratov M.V. On the stratigraphy of Triassic and Lower Jurassic deposits of Crimea. News of Higher Education Institutions. Geology and Exploration. 1959. No. 11. P. 31–41
25. Muratov M.V. Brief outline of the geological structure of the Crimean Peninsula. Moscow: GONTI, 1960. 208 p. (In Russ.).
26. Muratov M.V. Guide to educational geological practice in Crimea. Volume I: Methodology for conducting geological practice and atlas of guiding forms. Moscow: «Nedra», 1973. 232 p. (In Russ.).
27. Nikishin A.M., Romanyuk T.V., Moskovsky D.V., Kuznetsov N.B., Kolesnikova A.A., Dubensky A.S., Sheshukov V.S., Lyapunov S.M. Upper Triassic strata of the Crimean Mountains: first results of U-Pb dating of detrital zircons. Vestn. Moscow University. Ser. 4. Geology. 2020. No. 2. P. 18–33 (In Russ.).
28. Ovchinnikov A.V., Agafonova G.V., Yurchenko G. Yu. *Educational geological practice: textbook*. Belgorod: CPP ID «BelSU» NRU «BelSU». 2025. 136 p. (In Russ.).
29. Panov D.I., Bolotov S.N., Nikishin A.M. Scheme of stratigraphic subdivision of Triassic and Lower Jurassic deposits of Mountainous Crimea. In the book: Geodynamics and oil and gas systems of the Black Sea-Caspian region. Collection of papers of the III International Conference «Crimea-2001». Crimea,

- Gurzuf, September 17–21. Simferopol: «Tavria-Plus», 2001. P. 127–134 (In Russ.).
30. Panov D.I., Bolotov S.N., Kosorukov V.L., Kamzolkin V.A., Pikulik E.A., Shikhanov S.E. Stratigraphy and structure of the Tauride Series (Upper Triassic-Liassic) of the Kachinsky Uplift of the southwestern Crimea. Bulletin of MOIP. Geological Department. 2009. Vol. 84. Issue. 5. P. 52–73 (In Russ.).
 31. Panov D.I., Burkanov E.I., Gaiduk V.V., Ilkevich D.G. New data on the geology of Triassic and Lower Jurassic deposits in the Marta and Bodrak interfluvium (southwestern part of Mountainous Crimea). Vestn. MSU. Geological Series. 1978. No. 1. P. 47–55 (In Russ.).
 32. Pallas P.S. Brief physical and topographic description of the Tauride region. St. Petersburg: Imperial type, 1795. 72 p. (In Russ.).
 33. Permyakov V.V. Dismemberment of the lias of geosynclinal regions of the riverine part of the European part of the SRSR. Geol. magazine. 1962. T. 22. VIP. 3. P. 58–65 (In Russ.).
 34. Permyakov V.V. Krim and Prichernomorska depression. In the book: Yamnichenko I.M. (Vidp. ed.) Stratigraphy of the Ukrainian SSR. T. VII. Yura. Kyiv: Naukova Dumka, 1969. P. 101–125 (In Russ.).
 35. Permyakov V.V., Permyakova M.N., Tchaikovskiy B.P. New scheme of stratigraphy of Jurassic deposits of the Crimean Mountains. Kyiv: Institute of Geol. Sciences, Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, 1991. Preprint No. 91–12. 38 p. (In Russ.).
 36. Romanovsky G.D. Geological essay on the Tauride province and a review of the Crimean peninsula regarding conditions for artesian wells. Mining magazine. 1867. No. 7. P. 69–100 (In Russ.).
 37. Slavin V.I. Modern geological processes in the South-Western Crimea (a tutorial on general geological practice). 2nd ed. Moscow: Moscow State University Press, 1975. 196 p. (In Russ.).
 38. Topchishvili M.V., Lominadze T.A., Tsereteli I.D., Todria V.A., Nadareishvili G. Sh. Stratigraphy of the Jurassic deposits of Georgia. A.I. Janelidze Geological Institute Proceedings, Nov. series. 2006. Vol. 122. 453 p. (In Russ.).
 39. Turov A.V., Komarov V.N., Andrukhovich A.O., Sharoiko Yu.A. On new finds of Lower Jurassic ammonites in the eastern part of the Bakhchisarai region of Crimea. Izv. universities Geol. and intelligence. 2002. No. 2. P. 23–28 (In Russ.).
 40. Vogdt K.K. Annual report for 1910./ Izv. Geol. Com. 1911. T. XXX. No. 3. P. 17–20 (In Russ.).
 41. Chaikovskiy B.P. Report on the study of reference sections of Triassic-Jurassic (Tauride series) deposits of Mountainous Crimea, 1990–1994. Simferopol: PGO «Krymgeologiya», 1994. 252 p. <https://efgi.ru/object/3225854> (In Russ.).
 42. Chamberski H., Rankova T., Antova N., Nikolov G. Triaskata system in Bulgaria — material composition, sedimentation conditions and geodynamic changes. Sp. Balg. geol. d-vo. 1996. T. 57. No. 2. P. 1–18 (In Russ.).
 43. Shalimov A.I. Jurassic system. Lower section. Ed. Muratov M.V. Geology of the USSR. 1969. Vol. VIII: Crimea. Part 1: Geological description. Moscow: Nedra, 1969. P. 89–99 (In Russ.).
 44. Shvanov V.N. Lithostratigraphy and structure of the Tauride suite in the Bodrak River basin in Crimea. Vestn. Len. University. Geol. No. 6. Issue 1. 1966. P. 153–156 (In Russ.).
 45. Yudin V.V. Simferopol melange. Reports of the Russian Academy of Sciences. 1993. Vol. 333. No. 2. P. 250–252 (In Russ.).
 46. Yudin V.V. Mixed peoples of the Mountainous Crimea. Reports of the Academy of Sciences. 1998. Vol. 363. No. 5. P. 666–669 (In Russ.).
 47. Yudin V.V. Thrust structures in Crimean outcrops for understanding complex seismic models. Modern methods of seismic exploration in oil and gas field exploration in conditions of complex structures (Seismo-2011): Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference (Feodosia, Autonomous Republic of Crimea, Ukraine, September 18–24, 2011). Feodosia, CD-R, No. CS-2011: 2011. P. 1–5 (In Russ.).
 48. Yudin V.V. Geodynamics of Crimea. Monograph. Simferopol: DIAIPI, 2011. 336 p. (In Russ.).
 49. Yudin V.V. Origin of folding in the flysch of the Tauride formation of Crimea. Proceedings of the Crimean Academy of Sciences. 2021. P. 78–92 (In Russ.).
 50. Yudin V.V., Zaitsev B.A. The problem of the Eskiordina Formation in Crimea. Ed. Zakharov V.A., ed. Rogov M.A., Shchepetova E.V., Ippolitov A.P. Jurassic system of Russia: problems of stratigraphy and paleogeography. VIII All-Russian conference. Scientific materials. Syktyvkar: IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020. P. 262–276 (In Russ.).
 51. Yudin V.V., Zaitsev B.A. Structure of the Hayasy Hill in the Simferopol Melange (Republic of Crimea). Ed. Zakharov V.A., ed. Rogov M.A., Shchepetova E.V., Ippolitov A.P. Jurassic System of Russia: Problems of Stratigraphy and Paleogeography. VIII All-Russian Conference. Scientific Materials. Syktyvkar: IG Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2020. P. 277–281 (In Russ.).
 52. Adamia S., Zakariadze G., Chkhotua T., Sadradze N., Tsereteli N., Chabukiani A., Gventsadze A. Geology of the Caucasus: a review. Turkish Journal of Earth Sciences. 2011. V. 20. No. 5. P. 489–544.
 53. Buckman S.S. Yorkshire Type Ammonites Vol. 1, parts III–V. London: Wheldon & Wesley. 1911. P. iii–vi, 23–44.
 54. Dean W.T., Donovan D.T., Howarth M.K. 1961. The Liassic ammonite zones and subzones of the north-west European Province. Bulletin of the British Museum (Natural History). Geol. Series. 1961. V. 4. P. 435–505.
 55. Gabilly J. Le Toarcien a Thouars et dans le centre-ouest de la France. Paris: Centre National Recherche Scientifique (Les Stratotypes Francais, 3), 1976. 217 p. (In French).

56. Howarth M.K. The stratigraphy and ammonite fauna of the Upper Lias of Northamptonshire. *Bulletin of the British Museum (Natural History), Geol. series.* 1978. V. 29. No. 3. P. 235–288.
57. Howarth M.K. Part L, Revised, Volume 3B, Chapter 4: Psiloceratoidea, Eodoceratoidea, Hildoceratoidea. *Treatise Online.* 2013. V. 57. P. 1–139.
58. Ippolitov A.P., Tischenko A.I., Rogov M.A. Finds of a Unique Upper Toarcian Fauna from the SW Crimea (Ukraine). *Earth Science Frontiers.* 2010. V. 17, Special Issue. P. 100–101.
59. Kovacs Z. Toarcian Dactylioceratidae (Ammonitina) from the Gerecse Mts (Hungary). *Hantkeniana.* 2014. V. 9. P. 45–77.
60. Metodiev L.S. Grammoceras, Pseudogrammoceras et Podagrosites (Grammoceratinae, Ammonitina) du Toarcien superieur dans la region du Balkan (Bulgarie). *Taxonomie et biostratigraphie. Geologica Balcanica.* 2002. V. 32. No. 2–4. P. 165–189. (In French).
61. Okay A.I. Was the Late Triassic orogeny in Turkey caused by the collision of an oceanic plateau? *Bozkurt, J.A. Winchester, J.A.D. Piper (eds) Tectonics and Magmatism in Turkey and Surrounding Area. Geological Society of London, Special Publication.* 2000. V. 173. P. 25–41.
62. Page K.N. The Lower Jurassic of Europe: its subdivision and correlation. *Geol. Surv. Denmark Greenland Bull.* 2003. No. 1. P. 23–59. DOI: 10.34194/geusb.v1.4646
63. Sandulescu M. Analyse geotectonique des chaines alpines situes autour de la Mer Noire occidentale. *Ann. Inst. Geol. Geophys.* 1980. V. 56. P. 5–54. (In French).
64. Sengor A.M.C., Yilmaz Y., Sungurlu O. Tectonics of the Mediterranean Cimmerides: nature and evolution of the western termination of Palaeo-Tethys. *Geological Society of America, Special Paper.* 1984. V. 17. No. 1. P. 77–112.
65. Venturi F., Ferri R. Ammoniti Liassici dell'Appennino Centrale, 3rd edit. *Tibergraph, Citta di Castello. Perugia.* 2001. 268 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Зайцев Б.А. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Комаров В.Н. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Овчинников А.В. — внес основной вклад в разработку концепции статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Поезжаев Ю.С. — является автором находки, внес вклад в анализ палеонтологического материала и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Bogdan A. Zaitsev — made the main contribution to the development of the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Vladimir N. Komarov — made the main contribution to the development of the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Alexander V. Ovchinnikov — made the main contribution to the development of the concept of the article, prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Yuri S. Poezhayev — is the author of the discovery, contributed to the analysis of paleontological material and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Зайцев Богдан Анатольевич — кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник НСПК «Пещера Таврида» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского». 4, проспект Академика Вернадского, Симферополь 295007, Республика Крым, Россия
e-mail: bogdan.a.zaitsev@gmail.com
тел.: +7 (978) 800-28-58
SPIN-код: 1886-1710
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3446-691X>

Bogdan A. Zaitsev — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Research fellow, Scientific Speleological and Paleontological Complex «Tavrida Cave», Vernadsky Crimean Federal University. 4, Vernadsky Ave., Simferopol 295026, Russia
e-mail: bogdan.a.zaitsev@gmail.com
tel.: +7 (978) 800-28-58
SPIN-code: 1886-1710
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3446-691X>

Комаров Владимир Николаевич* — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры палеонтологии и региональной геологии ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия
e-mail: komarovvn@mgri.ru
тел.: +7 (916) 481-96-84
SPIN-код: 2739-5934
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4719-1484>

Vladimir N. Komarov* — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Associate Professor of the Department of paleontology and regional geology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: komarovvn@mgri.ru
tel.: +7 (916) 481-96-84
SPIN-code: 2739-5934
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4719-1484>

Овчинников Александр Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной геологии и горного дела ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет». 85, ул. Победа, Белгород 308015, Россия
e-mail: ovchinnikov@bsuedu.ru
тел.: +7 (960) 627-42-38
SPIN-код: 6032-8942
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7336-9755>

Alexander V. Ovchinnikov — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Applied Geology and Mining of Belgorod State National Research University. 85, Pobedy str., Belgorod 308015, Russia
e-mail: ovchinnikov@bsuedu.ru
tel.: +7 (960) 627-42-38
SPIN -code: 6032-8942
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7336-9755>

Поезжаев Юрий Сергеевич — студент 2-го курса ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет». 85, ул. Победа, Белгород 308015, Россия
e-mail: yuriipoezzgaev@mail.ru
тел.: +7 (951) 147-16-92
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0392-2604>

Yuri C. Poezhaev — 2th year student, Belgorod State National Research University. 85, Pobedy str., Belgorod 308015, Russia
e-mail: yuriipoezzgaev@mail.ru
tel.: +7 (951) 147-16-92
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0392-2604>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЗРАЧНЫХ СКАПОЛИТОВ МУЗКОЛЬСКОЙ МЕТАМОРФИЧЕСКОЙ СЕРИИ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ПАМИР

А.К. ЛИТВИНЕНКО¹, Ш.А. ОДИНАЕВ^{2,3,*}, Г.К. ХАЧАТРЯН⁴

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² Институт геохимии Гуанчжоу Китайской академии наук
511, ул. Кехуа, г. Гуанчжоу 510640, Китай

³ Институт геологии, сейсмостойкого строительства
и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана
267, ул. Айни, г. Душанбе 734063, Таджикистан

⁴ ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт
цветных и благородных металлов»
129, стр. 1, Варшавское шоссе, г. Москва 1117545, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Изучены генетические особенности прозрачного скаполита музкольской метаморфической серии (PR₁), Центральный Памир. Показано геологическое положение месторождений и проявлений прозрачного скаполита, которые приурочены к альбититам и гранитным пегматитам, залегающим в сарыджилгинской свите. Альбититы с полостями, содержащими прозрачный скаполит, представлены промышленным месторождением Черногорское и небольшим объектом Силеневое. Гранитные пегматиты с миаролами, содержащими прозрачный скаполит, представлены тремя проявлениями: Леденцы, Перевальное и Верхнее с неопределенным промышленным потенциалом. Рассмотрены генетические особенности альбититов и гранитных пегматитов с прозрачным скаполитом. Определены химические особенности прозрачного скаполита в альбититах (от 5 до 18% мейонитового минала) и в гранитных пегматитах (от 21 до 29% мейонитового минала). Эти отличия также прослеживаются по инфракрасным спектрам скаполитов в диапазоне 700–800 см⁻¹. В альбититах и гранитных пегматитах выделено две генерации скаполита: гидротермально-метасоматическая и гидротермальная. Наиболее высокими прозрачными качествами обладает скаполит второй генерации. Источником вещества флюидов (Na, Cl и др.), обусловивших кристаллизацию скаполита, явились мраморы сарыджилгинской свиты — протозвопоритовые образования. Образование прозрачного скаполита связывается с регрессивной стадией зонального метаморфизма.

Цель: 1) установить особенности геологического строения участков минерализации с прозрачным скаполитом; 2) определить химический состав прозрачного скаполита методами рентгеноспектрального локального микроанализа и ИК-спектроскопии; 3) проанализировать литературные и авторские данные по флюидным включениям; 4) выявить генетические особенности прозрачного скаполита из пород музкольской метаморфической серии.

Материалы и методы. Образцы для исследования были отобраны в ходе полевых работ 2018, 2021 и 2022 гг. Было изучено 10 кристаллов прозрачного скаполита. Химический состав исследован рентгеноспектральным локальным микроанализом на приборе JCSA-733 фирмы JEOL с помощью Si(Li)-энергодисперсионного спектрометра и системы анализа INCA Energy 350 фирмы Oxford при ускоряющем напряжении $U = 20$ кВ и токе зонда $I = 1$ нА (аналитик Л. А. Павлов, Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана РАН).

Все охарактеризованные с помощью микрорентгеноспектрального анализа образцы скаполита исследованы методом инфракрасной спектроскопии на приборе Nicolet 380 компании THERMO Scientific с применением ИК-Фурье микроскопа Centaurus и приставки Smart Diffuse Reflectance (аналитик Г.К. Хачатрян, ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов»). Под микроскопом (в области 650–4000 см⁻¹) анализировались мелкие осколки минерала размером не менее 50 мкм. Помимо этого, в диапазоне 400–4000 см⁻¹ были получены спектры порошкообразных образцов скаполита с размером частиц ≤2 мкм, смешанного с KBr в пропорции ~1/100.

Результаты. Составлены карта размещения месторождений и проявлений прозрачного скаполита и геологический план месторождения прозрачного скаполита Черногорское. Получены химические составы скаполита из альбититов и гранитных пегматитов. Выполнен анализ флюидных включений в скаполитах. Проведена ИК-спектроскопия ювелирных скаполитов. Установлены генетические особенности прозрачного скаполита Музкол-Рангульского антиклинория.

Заключение. В альбититах и гранитных пегматитах музкольской метаморфической серии выделено две генерации скаполита. Первая образовалась при температуре 580–450 °С и давлении от 370 до 130 МПа, вторая — при температуре от 400 до 200 °С и давлении 75 МПа. Скаполиты из альбититов и гранитных пегматитов отличаются химическим составом и ИК-спектрами. Прозрачный скаполит в альбититах характеризуется содержанием мейонитового минала от 5 до 18%, а в гранитных пегматитах — от 21 до 29%. Характеристики ИК-спектров скаполитов в диапазоне 700–800 см⁻¹: волновые числа полос поглощения и соотношение их интенсивностей можно рассматривать в качестве типоморфных свойств прозрачных скаполитов. Формирование прозрачного скаполита в значительной мере обусловлено составом минералообразующих растворов и газов, отображенном во флюидных включениях, представленных хлоридными рассолами, а также жидкой и газообразной CO₂. Их источником послужили карбонатные породы сарыджилгинской свиты, для которых установлена протозвапоритовая седиментация.

Ключевые слова: Центральный Памир, музкольская серия, месторождения прозрачного скаполита, альбититы, полости, гранитные пегматиты, миаролы, генерации скаполита, ИК-спектроскопия, флюидные включения, генезис

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности: авторы благодарят Л.А. Паутова (Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН) за помощь в аналитических работах и интерпретации полученных результатов. Выражаем признательность профессору А.В. Корсакову (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН), а также рецензентам за конструктивные замечания и полезные рекомендации по представлению результатов исследования, которые позволили улучшить содержание и качество данной статьи.

Для цитирования: Литвиненко А.К., Одинаев Ш.А., Хачатрян Г.К. Генетические особенности прозрачных скаполитов музкольской метаморфической серии, Центральный Памир. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):32—49. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-32-49> EDN: WEIXCC

Статья поступила в редакцию 11.03.2025

Принята к публикации 20.06.2025

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

GENETIC FEATURES OF TRANSPARENT SCAPOLITES OF THE MUZKOL METAMORPHIC SERIES, CENTRAL PAMIR

ANDREY K. LITVINENKO¹, SHARIFJON A. ODINAEV^{2,3,*}, GALINA K. KHACHATRYAN⁴

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklay str., Moscow 117997, Russia*

² *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences
511, Kehua str., Guangzhou 510640, China*

³ *Institute of geology, earthquake engineering and seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan
267, Ayni str., Dushanbe 734063, Tajikistan*

⁴ *Central Research Institute of Non-Ferrous and Precious Metals
129/1, Varshavskoe highway, Moscow 117545, Russia*

ABSTRACT

Background. The genetic features of transparent scapolite of the Muzkol metamorphic series (PR₁), Central Pamir, are studied. The geological position of its deposits and occurrences is confined to albitites and granite pegmatites of the Sarydzhilga formation. Albitites with cavities containing transparent scapolite are represented by the Chernogorskoe industrial deposit and the Sirenevoe small deposit. Granite pegmatites with miarolitic cavities containing transparent scapolite are represented by Ledensi, Perevalnoe, and Verkhnee (with an uncertain industrial potential) occurrences. The genetic features of albitites and granite pegmatites with transparent scapolite are considered. The chemical features of transparent scapolite in both albitites (from 5 to 18% of meionite minal) and granite pegmatites (from 21 to 29% of meionite minal) were determined. These differences are also reflected in the IR spectra of scapolite samples in the range of 700–800 cm⁻¹. Two generations of scapolite — hydrothermal-metasomatic and hydrothermal — were established in albitites and granitic pegmatites. The scapolite of the latter generation was shown to exhibit the highest potential for jewelry application. The source of the fluid substance (Na, Cl, etc.) that caused the crystallization of scapolite was the marbles of the Sarydzhilga formation, i.e., proto-euporite formations. The formation of transparent scapolite is associated with the regressive stage of zonal metamorphism.

Objectives. (1) To establish the geological structure of mineralization areas with transparent scapolite. (2) To determine the chemical composition of transparent scapolite by X-ray spectral local microanalysis and IR spectroscopy. (3) To review the authors' and literature data on fluid inclusions. (4) To identify the genetic features of transparent scapolite from the rocks of the Muzkol metamorphic series.

Materials and methods. Samples for the study were collected during fieldwork in 2018, 2021, and 2022. In total, 10 scapolite crystals were studied. The chemical composition was examined by X-ray spectral microanalysis using a JCSA-733 device by JEOL using a Si(Li)-energy dispersive spectrometer and an INCA Energy 350 system (Oxford Instruments) at an accelerating voltage of $U = 20$ kV and a probe current of $I = 1$ nA (analyst L. A. Pautov, Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences).

Results. A location map of scapolite deposits and occurrences and a geological plan of the Chernogorskoye deposit were compiled. The chemical compositions of scapolite contained in albitites and granite pegmatites were determined. Fluid inclusions in scapolite samples were analyzed. The IR spectroscopy of jewelry-level scapolite was carried out. The genetic features of transparent scapolite from the Muzkol-Rangkul anticlinorium were established.

Conclusion. Two generations of scapolite were identified in albitites and granite pegmatites of the Muzkol metamorphic series. The first was formed at a temperature of 580–450 °C and a pressure of 370–130 MPa; the second — at a temperature of 400–200 °C and a pressure of about 75 MPa. Scapolite samples from albitites and granitic pegmatites differ in chemical composition and IR spectra. Jewelry-level scapolite in albitites and granite pegmatites is characterized by the meionite minal content of 5–18% and 21–29%, respectively. The analysis of the IR spectra of scapolite samples at a wavelength of 700–800 cm⁻¹ showed that the wave numbers of the absorption bands and the ratio of their intensities can be considered as typomorphic properties of transparent scapolite. The formation of transparent scapolite is largely associated with the composition of mineral-forming solutions and gases, manifested in fluid inclusions represented by chloride brines, as well as liquid

and gaseous CO₂. Their source was the carbonate rocks of the Sarydzhilga formation, for which proto-evaporite sedimentation was typical.

Keywords: Central Pamir, Muzkol series, transparent scapolite deposits, albitites, cavity, granite pegmatites, miarols, scapolite generation, IR spectroscopy, fluid inclusions, genesis

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

Acknowledgments: The authors thank L.A. Pautov (A.E. Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences) for his help in analytical work and interpretation of the results obtained. We express our gratitude to Professor A.V. Korsakov (V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS), as well as to the reviewers for constructive comments and useful recommendations on the presentation of the results of the study, which made it possible to improve the content and quality of this article.

For citation: Litvinenko A.K., Odinaev Sh.A., Khachatryan G.K. Genetic features of transparent scapolites of the muzkol metamorphic series, Central Pamir. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):32—49. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-32-49> EDN: WEIXCC

Manuscript received 11 March 2025

Accepted 20 June 2025

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Как ювелирный камень скаполит становится известным на Центральном Памире с конца 70-х годов XX в. в связи с открытием Э. А. Дмитриевым и А. М. Скригителем [8] месторождений этого самоцвета. К истории открытия отметим, что М. А. Бубнова [4] при археологических раскопках поселения древних рудокопов Базар-Дара (X–XI вв.), разрабатывавших группу одноименных месторождений серебра, обнаружила бледно-розовый длиннопризматический скаполит со следами ювелирной обработки. Поселение расположено на высоте 4500 м над уровнем моря, более чем в 100 км к юго-западу от рассматриваемых месторождений.

Скаполитовая минерализация распространена в раннепротерозойских метаморфических породах музкольской серии. Потенциал месторождения прозрачного скаполита Черногорское был оценен геологами экспедиции «Памиркварцсамоцветы» на стадии предварительной разведки в 1980-х годах. Остальные объекты не разведаны. В настоящее время месторождения скаполита не обрабатываются. Прозрачный скаполит двух генетических типов: в гидротермально-метасоматических жилах и гранит-пегматитах, претерпевших десиликацию и щелочной метасоматоз, изучен А. М. Скригителем [29].

В работе поставлены следующие задачи: установить особенности геологического строения участков минерализации с прозрачным скаполитом; определить химический состав прозрачного скаполита методами рентгеноспектрального локального микроанализа и ИК-спектроскопии; проанализировать литературные и авторские данные по флюидным включениям; выявить генетические особенности прозрачного скаполита из пород музкольской метаморфической серии.

Геологическое положение объекта исследования

Скаполит является типоморфным минералом музкольской метаморфической серии (PR₁). Она выделяется в составе Музкол-Рангкульского горст-антиклинория в виде двух блоков (антиклиналей): Сарымулинского и Шатпутского, разделенных перемычкой палеозой-мезозойских пород (рис. 1). Сарымулинский блок имеет вид широтно вытянутой полосы длиной 90 км и шириной до 10–12 км. Шатпутский блок на территории Таджикистана имеет форму субширотно ориентированного овала 55×(15–20) км. Его восточное продолжение находится на территории Китая. Взаимоотношения горст-антиклинория с перекрывающими породами палеозоя и мезозоя тектонические [5, 25].

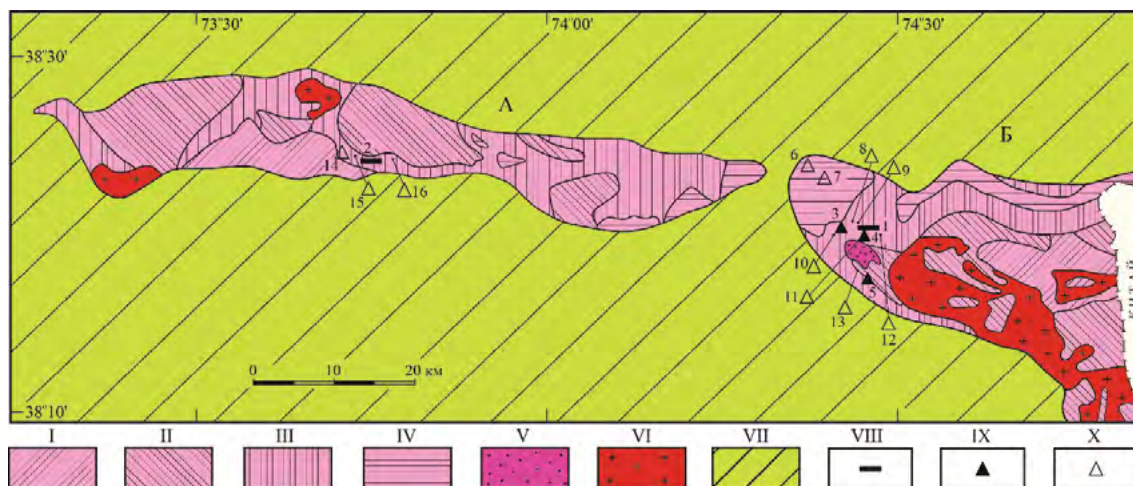


Рис. 1. Карта Музкол-Рангульского горст-антиклинария и размещения месторождений и проявлений прозрачного скаполита и гранитных пегматитов без скаполита. Составлена авторами на основе [5] и материалов Э.А. Дмитриева, А.В. Гилева, А.К. Литвиненко, С.М. Скригителя. А-Б — антиклинали: А — Сарымулинская, Б — Шатпутская. I-IV — музкольская серия (PR₁); свиты: I — сассыкская, II — белеутинская, III — сарыджилгинская, IV — бурулюкская. V-VI — интрузивные комплексы: V — зорбурулюкский гнейсо-гранитный (PR₂), VI — шатпутский лейкогранитный (P). VII — палеозой-мезозойское обрамление, Цифрами обозначены месторождение и проявление: VIII — альбититы со скаполитом: 1 — Черногорское, 2 — Сиреневое, IX — пегматиты со скаполитом: 3 — Леденцы (Полихромное), 4 — Перевальное, 5 — Верхнее. X — пегматиты без скаполита: 6 — Мика, 7 — Малыш, 8 — Пегматит-3, 9 — Амазонитовое, 10 — Полихромное, 11 — Приятное, 12 — Дорожное, 13 — Пегматит-4, 14 — Амиго, 15 — Тотоша, 16 — Цветное

Fig. 1. Map of the Muzkol-Rangkul horst-anticlinorium and the location of deposits and occurrences of transparent scapolite and granite pegmatites without scapolite. Compiled by the authors on the basis of [1], and materials by E.A. Dmitriev, A.V. Gilev, A.K. Litvinenko, S.M. Skrigitel. A-B — anticlines: A — Sarymulinskaya, B — Shatputskaya. 1-4 — music series (PR₁); formations: I — Sassyk, II — Beleutinskaya, III — Sarydzhilginskaya, IV — Burulukskaya. V-VI — intrusive complexes: V — Zorburulyuk gneiss-granite (PR₂), VI — Shatput leucogranite (P). VII — Paleozoic-Mesozoic framing, Numbers indicate the deposit and occurrence: VIII — albitites with scapolite: 1 — Chernogorskoye, 2 — Sirenevoe, IX — pegmatites with scapolite: 3 — Ledencs (Polychrome), 4 — Perevalnoye, 5 — Verkhnee. X — pegmatites without scapolite: 6 — Mika, 7 — Malysh, 8 — Pegmatite-3, 9 — Amazonite, 10 — Polychrome, 11 — Priyatnoe, 12 — Darozhnoe, 13 — Pegmatite-4, 14 — Amigo, 15 — Totosha, 16 — Tsvetnoe

Породы музкольской серии претерпели полициклический метаморфизм. Первый цикл проявился 1,9–1,6 млрд лет назад [3] с наиболее высокими температурами в пределах 750–780 °С и давлениями 7–9 кбар [6]. Второй цикл метаморфизма — мезозойский [2], мезо-кайнозойский [1] — относится к зональному динамотермальному, наложенному на докембрийские комплексы [6, 9]. Он протекал в условиях эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций метаморфизма [1].

В границах музкольской серии выделено три магматических комплекса: два докембрийских и один кайнозойский [2, 5, 7, 30, 32]. В докембрии сформировались ультрабазит-базитовый, кукуртский (на рисунке 1 не показан ввиду малых размеров) и гнейсо-гранитный, зорбурулюкский, а в кайнозое — гранитоидный, шатпутский комплексы. Для гранитов последнего комплекса характерна латеральная геохимическая

зональность и генетическая связь с ними миароловых пегматитов с драгоценными камнями [10].

Музкольская серия расчленена на 4 свиты, снизу вверх: сасыкскую, белеутинскую, сарыджилгинскую и бурулюкскую, общей мощностью около 6 км [25]. Объекты исследования (минеральные комплексы с ювелирным скаполитом) локализованы внутри сарыджилгинской свиты мощностью 1100–1200 м (рис. 1). Она сложена в основном мраморами кальцит-доломитового состава, кристаллическими сланцами, гнейсами и амфиболитами [1].

Особенности размещения скаполитовой минерализации

В рассматриваемом регионе скаполит образует устойчивые минеральные ассоциации многих пород. Он встречается в мраморах, кристаллических сланцах, амфиболитах, магнезиальных и известковых скарнах, скарноидах и габброидах в виде

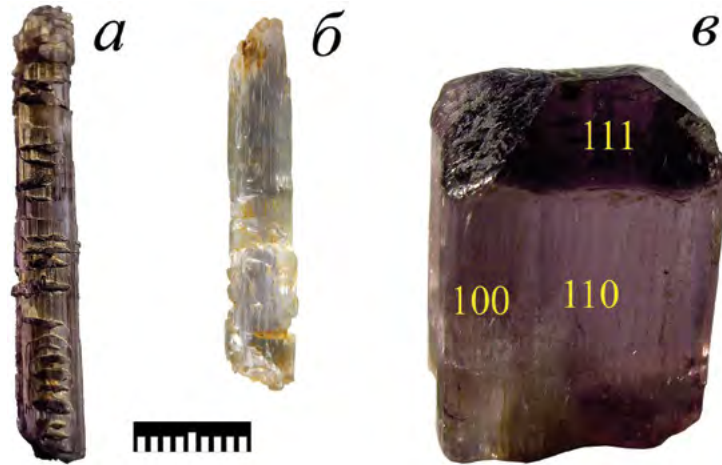


Рис. 2. Кристаллы скаполита из гранитных пегматитов (а, б) и альбититов (в). Длина масштабной линейки 1 см
Fig. 2. Scapolite crystals made of granite pegmatites (a, b) and albitites (c). The length of the scale bar is 1 cm

непрозрачных крупных порфиробластов и агрегатов, часто имеющих породообразующее значение [14].

Прозрачные кристаллы скаполита образуются в полостях альбититов и в миаролах гранитных пегматитов, залегающих в сарыджилгинской свите (рис. 1). В них прозрачный скаполит представлен цветными (розовыми, сиреневыми и желтыми) кристаллами. Кристаллы скаполита из этих пород различаются формой и размером, а также цветовыми оттенками (рис. 2).

Альбититы с полостями, содержащими прозрачный скаполит, установлены в контурах месторождения Черногорское (Шатпутская антиклиналь) и в отстоящем на 60 км к западу мелком объекте Сиреневое в Сарымулинской антиклинали (рис. 1). Гранитные пегматиты с прозрачным скаполитом расположены вблизи месторождения Черногорское, к западу и югу (рис. 1).

Скаполит в полостях альбититов

Типовым месторождением прозрачного скаполита в альбититах является месторождение Черногорское (рис. 3А, Б). Оно локализовано внутри кольцевой тектоно-магматической структуры, сложенной щелочными ультрабазит-базитовыми интрузивными породами кукуртского комплекса PR_3 [18]. На относительно небольшой площади месторождения выделено четыре группы магматических и измененных апомагматических пород [15, 23]. Для данного исследования интерес представляют метасоматические альбититы двух разновидностей (рис. 3Б).

Первая разновидность представлена серыми до темно-серых биотит-роговообманковыми альбититами, образующими относительно крупные тела размером (20–200)×(12–55) м. На месторождении Черногорское закартировано 7 тел этих пород. Контакты альбититов с вмещающими горнбленидами постепенные, неотчетливые. На северо-восточном фланге месторождения расположено вытянутое магматическое тело роговообманковых перидотитов (рис. 3Б). Все породы средне-крупнозернистые, участками порфиробластовые.

Вторая разновидность представлена белыми крупнозернистыми мономинеральными альбититами линзовидной формы размером (5–8)×(0,1–2) м с полостями, минерализованными скаполитом. Линзы данных альбититов с резкими секущими контактами размещаются в биотит-роговообманковых альбититах с нефелином, содалитом, щелочной роговой обманкой, титанитом, рутилом, ильменитом и др. [16, 17, 22]. Геолого-разведочными работами выявлено 26 тел альбититов с ювелирным скаполитом (рис. 3Б).

Минерализованные полости со скаполитом приурочены к центральной части альбититовых тел. Наблюдается два морфологических типа полостей: щелевидный до 1×0,05 м и овальный до 0,5 м в поперечнике (рис. 4А, Б). Кристаллы желтого, светло-сиреневого и сиреневого скаполита нарастают на стенки полостей, замещая кристаллы альбита. В щелевидных полостях стенки сложены длиннопризматическими кристаллами до 30 см в длину, ориентированными параллельно стенкам, между которыми расположены агрегаты клевеландита

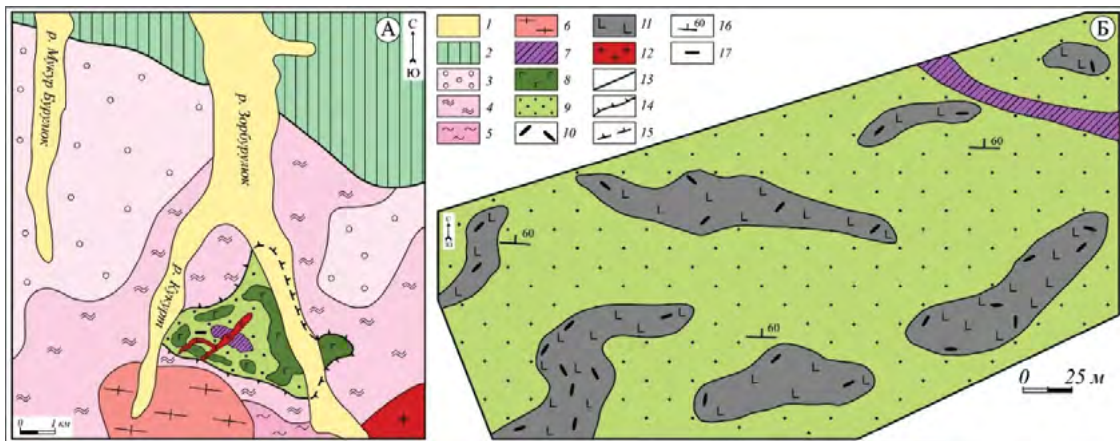


Рис. 3. Геологическое положение месторождения Черногорское (А) [18] и его детальный план (Б). 1–2 — породы: 1 — четвертичные, 2 — палеозойские осадочно-вулканогенные; 3–5 — свиты музкольской серии: 3 — бурулюкская, 4 — сарыджилгинская, 5 — сассыкская; 6 — гнейсо-граниты зорбурулюкского комплекса (PR₃); 7–9 — кукуртский базит-ультрабазитовый комплекс (PR₃): 7 — роговообманковые перидотиты; 8 — габброиды; 9 — горнблендиты; 10 — жилы альбититов с ювелирным скаполитом; 11 — биотит-роговообманковые альбититы; 12 — гранитоиды шатпутского комплекса (P); 13–15 — разломы: 13 — Ванч-Акбайтальский; 14 — Кукурт-Зорбурулюкский; 15 — предполагаемый; 16 — элементы залегания сланцеватости; 17 — месторождение Черногорское

Fig. 3. Geological position of the Chernogorskoye deposit (A) [18] and its detailed plan (B). 1–2 — rocks: 1 — Quaternary, 2 — Paleozoic sedimentary-volcanogenic; 3–5 — formations of the Muzkol series: 3 — Burulyuk, 4 — Sarydzhilga, 5 — Sassyk; 6 — gneiss-granite of the Zorburulyuk complex (PR₃); 7–9 — Kukurt basite-ultrabasite complex (PR₃): 7 — hornblende peridotites; 8 — gabbroids; 9 — hornblendites; 10 — veins of albitites with jewelry scapolite; 11 — biotite-hornblende albitites; 12 — granitoids of the Shatput complex (P); 13–15 — faults: 13 — Vanch-Akbaytalsky; 14 — Kukurt-Zarburulyuksky; 15 — assumed; 16 — elements of shale occurrence; 17 — Chernogorskoye deposit

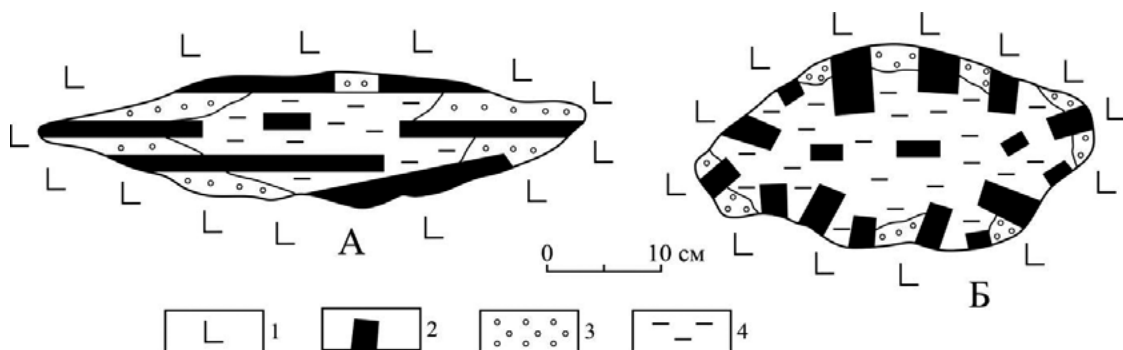


Рис. 4. Морфология минерализованных полостей со скаполитом в альбититах: А — щелевидные, Б — овальные. 1 — альбититы, 2 — кристаллы скаполита, 3 — клевеландит, 4 — глина выполнения

Fig. 4. Morphology of mineralized cavities with scapolite in albitites: A — slit-like, B — oval. 1 — albitites, 2 — scapolite crystals, 3 — cleveandite, 4 — clay of filling

(рис. 4А). В овальных полостях кристаллы длиной до 20 см размещаются перпендикулярно или слабо наклонно к стенкам (рис. 4Б). В центральной части кристаллов скаполита наблюдаются реликты альбита, апатита с F (4,2 мас.%), Cl (0,5 мас.%) и флогопита с F (1,4 мас.%) [23].

Кристаллы скаполита хорошо сформированы, с большим разнообразием простых форм:

тетрагональные призмы {100} и {110}, пирамиды {101} и редко пинакоид {001} (рис. 2в, 5). В них встречаются бездефектные, прозрачные монообласти до 2 см в поперечнике. На гранях призмы скаполита нередко наблюдаются каверны растворения глубиной до 0,5 см, заполненные белыми агрегатами клевеландита (рис. 5а). Крупные кристаллы скаполита часто обладают блочным строением

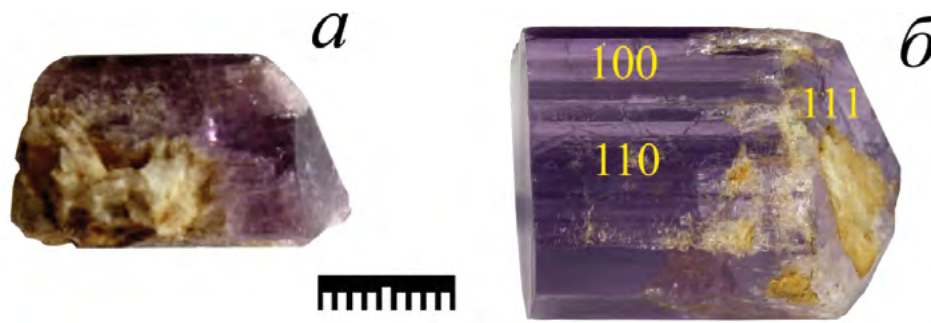


Рис. 5. Нарастание клевеландита на частично растворенную грань призмы (а) и пирамиды скаполита (б).

Длина масштабной линейки 1 см

Fig. 5. Growth of cleveandite on the partially dissolved face of the prism (a) and the pyramid of scapolite (b).

The length of the scale bar is 1 cm

с расщепленной вершиной [28]. Из-за трещиноватости их нельзя отнести к прозрачным кристаллам. Этот скаполит мы относим к более ранней первой генерации по следующим признакам: большие размеры кристаллов, инкрустирующие стенки полостей, заметные тектонические деформации и следы растворения на кристаллах.

Прозрачные кристаллы, рассматриваемые в качестве ювелирных камней, локализуются внутри полостей, в серицит-каолиновой глинке выполнения. Они отличаются от кристаллов со стенок полостей меньшими размерами, прозрачностью, более сильным блеском и ярким цветом. Скаполит полостей является более поздним минералом, он не был затронут тектоническими деформациями, и мы относим его ко 2-й генерации.

В альбититах, на северном фланге месторождения Черногорское, наблюдались полости, стенки которых инкрустированы только кристаллами альбита.

Промышленное значение в качестве прозрачного камня в этой группе объектов имеет скаполит второй генерации, а скаполит первой генерации рассматривается как кристаллосырье для обогащения с возможностью выделения ювелирных монообластей, для галтовки и как коллекционный минерал.

Скаполит в миаролах гранитных пегматитов

В гранитных пегматитах прозрачный скаполит обнаружен только в жилах Леденцы, Перевальное и Верхнее (рис. 1). Данные пегматиты отнесены [7] к субсогласным, слабодифференцированным жилам, залегающим в мраморах сарыджилгинской свиты. Скаполитоносные пегматиты имеют относительно небольшие размеры (мощность — первые метры, длина — первые десятки метров). Кроме пегматитов, содержащих скаполит, в регионе известна более представительная группа миароловых

пегматитов без него (рис. 1). Все они включены в состав Ранкульского поля миароловых пегматитов [11]. Возраст гранитных пегматитов со скаполитом определен как докембрийский [7] в отличие от пегматитов, залегающих среди силикатных пород, которые отнесены к палеогеновому шатпутскому комплексу гранитоидов [2, 10]. Пегматиты с прозрачным скаполитом дифференцированные, от контакта к центру жил выделяются следующие зоны: 1) аплитовая, мощностью до 1–2 м; 2) графическая, мощностью до 3 м и более; 3) блоковая, полевошпатовая, развитая фрагментарно. Кристаллы калишпата этой зоны могут достигать 18–20 см в поперечнике. К этой зоне приурочены полости со скаполитом, шерлом и редким зеленым бериллом (рис. 6А).

Полости в пегматитах, так же как и в альбититах, имеют щелевидную и изометричную форму, заполненную серицит-каолиновой глинистой массой (рис. 6А, Б). Дымчатый кварц, инкрустирующий с полевыми шпатами верхние стенки миарол, часто содержит включения кристаллов скаполита, которые бывают замещены серицит-альбитит-каолиновым агрегатом. Нижние участки миарол содержат многочисленные прозрачные кристаллы сиреневого скаполита [7] высокого ювелирного качества.

Кристаллы скаполита характеризуются длиннопризматическим габитусом с заметным растворением граней призмы и пирамиды. Длина кристаллов до 10 см, толщина до 1,5 см. Цвет скаполита варьирует от бесцветного, светло-фиолетового до фиолетового различных оттенков. Кристаллы скаполита из гранитных пегматитов отличаются от скаполита из альбититов длиннопризматическим габитусом и сильнорастворенной поверхностью (рис. 2а, б) с характерной леденцовой скульптурой граней. Именно с этим связано название

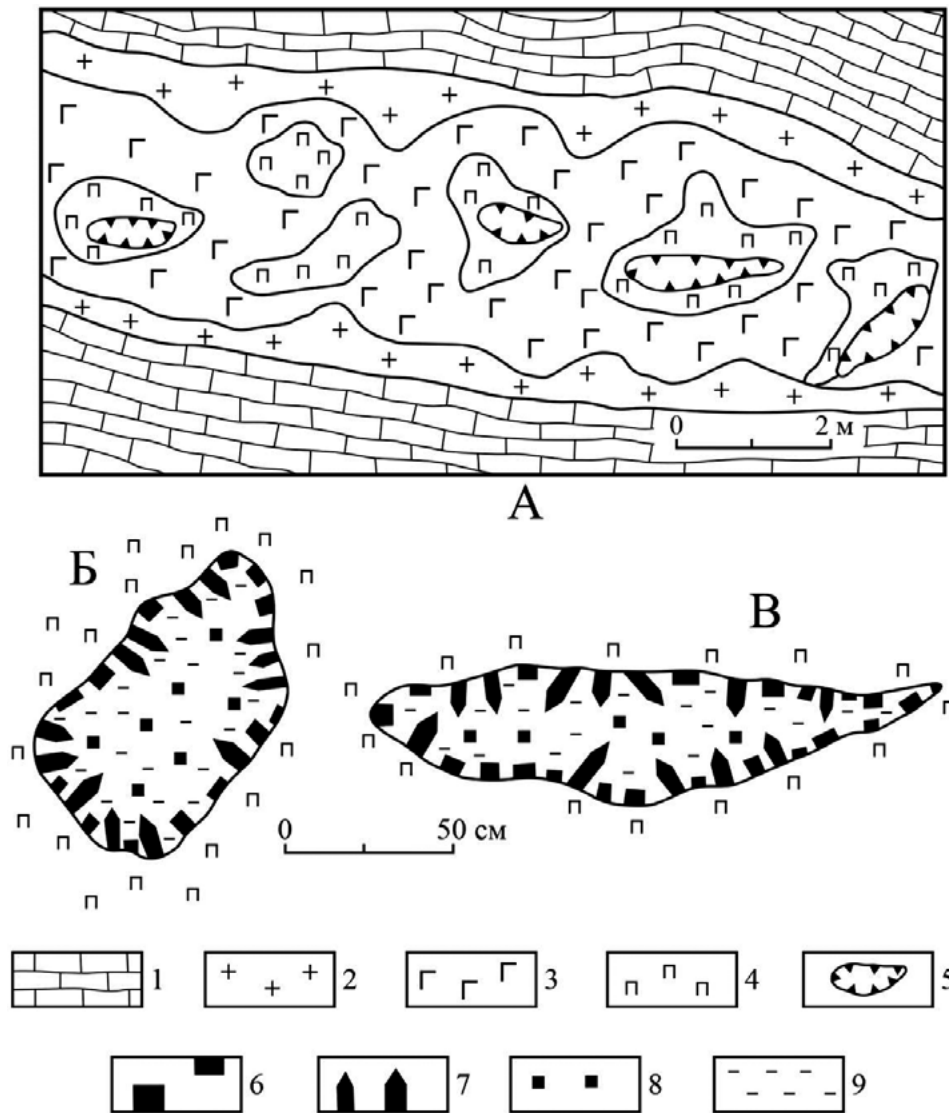


Рис. 6. Фрагмент зональной пегматитовой жилы Леденцы (А) и миаролы двух форм: овальной (Б) и щелевидной (В). 1 — мраморы. 2–5 — зоны пегматита: 2 — аплитовая, 3 — графическая, 4 — блоковая, 5 — полостная. 6 — калиевый полевой шпат. 7 — дымчатый кварц. 8 — скаполит. 9 — серицит-каолиновая масса. Заимствовано у [7] с изменениями авторов

Fig. 6. Fragment of the zonal pegmatite vein of Lollipop (A) and miarola of two shapes: oval (B) and slit-like (C). 1 — marbles. 2–5 — pegmatite zones: 2 — aplite, 3 — graphic, 4 — block, 5 — cavity. 6 — potassium feldspar. 7 — smoky quartz. 8 — scapolite. 9 — sericite-kaolin mass. Borrowed from [7] with changes by the authors

одной из продуктивных жил месторождения — Леденцы, предложенное его первооткрывателем Э. А. Дмитриевым [7]. Следы растворения на кристаллах скаполита свидетельствуют о воздействии гидротермальных растворов, которые избирательно растворяли скаполит.

В миароловых пегматитах выделено две генерации скаполита: первая инкрустирует стенки пустот, вторая расположена внутри (рис. 6 Б, В) [7].

Химический состав прозрачных скаполитов

По данным А. А. Золотарева [12], скаполит из месторождения Черногорское преимущественно представлен мариалитом с содержаниями Na_2O до 12,2 мас.%, Cl до 4,2 мас.% и, соответственно, мейонитового минала — 5,4% ($\text{Me}_{5,4}$).

Позднее в работе Е. Sokolova, F.S. Hawthorne [31] на этом же месторождении отмечен более натровый скаполит — $\text{Me}_{4,9}$. Нами обнаружен скаполит с еще более высоким содержанием

Таблица 1. Химический состав прозрачных скаполитов, в мас. %
Table 1. Chemical composition of transparent scapolites, in wt. %

Компо- ненты	Из пегматитов					Из альбититов				
	Номера образцов									
	1.1	4.1	6.1	7.1	A-3	2.1	5.2	8.2	A-1	62
SiO ₂	58,07	55,73	58,23	57,57	58,56	58,55	59,48	61,12	62,45	60,10
Al ₂ O ₃	21,69	22,93	21,85	21,56	21,21	21,48	21,81	20,99	18,71	19,42
FeO	-	-	0,07	-	-	0,09	0,08	0,07	0,06	—
CaO	6,73	7,64	6,69	7,21	5,17	4,34	3,97	2,85	1,40	1,80
Na ₂ O	9,77	9,49	9,94	9,59	10,53	10,41	11,92	12,12	12,50	12,29
K ₂ O	1,19	0,95	1,19	1,06	1,15	0,57	0,59	0,63	1,53	0,88
Cl	3,40	3,08	3,31	3,29	3,70	3,48	3,59	3,85	4,00	3,94
SO ₃	-	0,12	-	-	-	0,56	0,23	0,44	0,18	0,18
Сумма	100,99	99,94	101,28	100,28	100,32	99,48	101,67	102,14	100,83	98,74
-O=Cl ₂	0,78	0,71	0,76	0,76	0,85	0,80	0,83	0,89	0,92	0,91
Сумма	100,21	99,23	100,52	99,52	99,47	98,68	100,84	101,25	99,91	97,83
Формульные единицы рассчитаны на 12 катионов (Si + Al)										
Si	8,33	8,08	8,32	8,32	8,41	8,38	8,42	8,54	8,87	8,69
Al	3,67	3,92	3,68	3,68	3,59	3,62	3,58	3,46	3,13	3,31
Fe ⁺²	-	-	0,01	-	-	0,01	0,01	0,01	0,007	—
Ca	1,03	1,19	1,02	1,12	0,79	0,67	0,60	0,43	0,21	0,28
Na	2,72	2,67	2,75	2,69	2,93	2,89	3,27	3,28	3,44	3,45
K	0,22	0,18	0,22	0,20	0,21	0,10	0,11	0,11	0,28	0,16
Cl	0,83	0,76	0,80	0,81	0,90	0,84	0,86	0,91	0,96	0,97
SO ₃	-	0,01	-	-	-	0,06	0,02	0,05	0,02	0,02
Me	26	29	26	28	21	18	15	11	5	7

Примечание. В образцах 1.1 и 8.2 дополнительно установлен MnO 0,17 (0,02 ф.е.) и 0,07% (0,01) соответственно, в 6,2 MgO 0,13% (0,03 ф.е.). Me = Ca / (Ca + Na + K) × 100%. Цвет образцов: 1.1 — светло-сиреневый, 4.1 — сиреневый, 6.1 — светло-сиреневый, 7.1 — светло-сиреневый, A-3 — сиреневый, 2.1 — светло-желтый, 5.2 — желтый, 8.2 — серый, A-1 — сиреневый, 62 — светло-сиреневый.

Note. In samples 1.1 and 8.2, MnO 0.17 (0.02 f.u.) and 0.07% (0.01) were additionally established, respectively, in 6.2 MgO 0.13% (0.03 f.u.). Me = Ca / (Ca + Na + K) × 100%. The color of the specimens: 1.1 — light lilac, 4.1 — lilac, 6.1 — light lilac, 7.1 — light lilac, A-3 — lilac, 2.1 — light yellow, 5.2 — yellow, 8.2 — gray, A-1 — lilac, 62 — light lilac.

Na₂O — 13,8 мас.%, Cl — 4,2 мас.% и низким содержанием мейонитового минала — 4,3% [15]. Химические составы и формульные коэффициенты различных по цвету прозрачных скаполитов из гранитных пегматитов и альбититов приведены в таблице 1.

Скаполиты из гранитных пегматитов (в мраморах) и альбититов отличаются между собой химическим составом (табл. 1). Особенно заметны отличия в содержаниях CaO и Na₂O. Для скаполита из пегматитов отмечаются незначительные колебания в содержаниях: CaO от 5,2 до 7,6, Na₂O от 9,5 до 10,5 и K₂O от 0,9 до 1,2 мас.%. Скаполит

из альбититов обладает более низкими концентрациями: CaO от 1,4 до 4,3 мас.% и более высокими содержаниями Na₂O — от 10,4 до 12,5, K₂O от 0,57 до 1,5 мас.%. Содержание мейонитового минала в кристаллах скаполита из альбититов изменяется от 5 до 18%, а в пегматитах оно выше — 21–29% (табл. 1).

ИК-спектроскопия скаполита

Отличительные особенности химического состава скаполитов из альбититов и гранитных пегматитов проявляются также в ИК-спектрах. Согласно данным J.P. Wehrenberg [35], положение и интенсивность

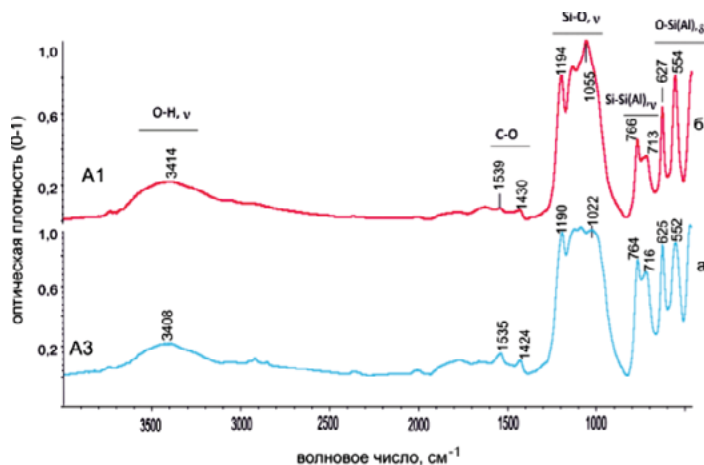


Рис. 7. «Порошковые» ИК-спектры скаполитов из полостей в пегматитах (а) и альбититах (б). А1 и А3 — номера образцов. Интерпретация спектров проводилась с учетом данных [19, 33–35]; ν и δ — соответственно валентные и деформационные колебания
Fig. 7. «Powdered» IR spectra of scapolites from cavities in pegmatites (a) and albitites (b). A1 and A3 sample numbers. The interpretation of the spectra was carried out taking into account the data [19, 33–35]; ν and δ are valence and deformation oscillations, respectively

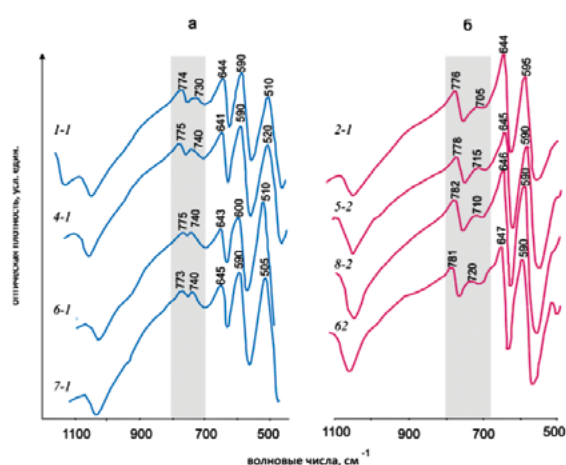


Рис. 8. ИК-спектры индивидуальных зерен скаполитов из полостей в пегматитах (а) и альбититах (б). Номера линий спектров соответствуют номерам образцов в таблице 1
Fig. 8. IR spectra of individual scapolite grains from cavities in pegmatites (a) and albitites (b). The line numbers of the spectra correspond to the sample numbers in table 1

пиков поглощения в интервале $610\text{--}630\text{ см}^{-1}$ коррелирует с содержанием мейонитового минала. Как показано в работе Н.Р. Schwarcz, Е.Л. Speelman [34], относительная интенсивность линий около 1425 и 1535 см^{-1} зависит от содержания CO_3 - и SO_3 -групп в скаполите и может быть использована для их количественного определения.

В ИК-спектрах присутствуют многочисленные линии поглощения в диапазоне $450\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, обусловленные разнообразными валентными и деформационными колебаниями в алюмо-кремний-кислородных тетраэдрах (рис. 7). В области $1400\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ проявлены колебания карбонат-иона. Широкая полоса с максимумом около 3400 см^{-1} преимущественно связана с примесями адсорбированной воды в скаполите (рис. 7).

ИК-спектры поглощения прозрачных зерен скаполита отличаются от порошковых. При этом они демонстрируют различия химического состава и структурные особенности скаполитов из альбититов и гранитных пегматитов. Наиболее наглядно эти отличия проявляются в интервале волновых чисел $700\text{--}800\text{ см}^{-1}$ (рис. 8).

В спектрах скаполитов из полостей в пегматитах (рис. 8а) отмечаются две близко расположенные линии малой интенсивности: около 740 и 775 см^{-1} , а расстояние между ними (Δ) составляет $33\text{--}44\text{ см}^{-1}$. Для скаполитов из полостей альбититов конфигурация

спектра иная (рис. 8б): четкий пик средней интенсивности около 780 см^{-1} сопровождается слабой полосой поглощения около 715 см^{-1} . При этом соответствующие значения Δ значительно выше: $61\text{--}72\text{ см}^{-1}$.

Таким образом, ИК-характеристики скаполитов из гранитных пегматитов и альбититов в диапазоне $700\text{--}800\text{ см}^{-1}$: волновые числа, соотношение интенсивностей пиков и расстояние между ними можно рассматривать в качестве типоморфных свойств ювелирных скаполитов.

Особенности флюидных включений в скаполитах

Методом декрепитации флюидных включений Э.А. Дмитриев, А.М. Скригитель [8] определили температуру образования ювелирных скаполитов из альбититов в $250\text{--}180\text{ °C}$, а из гранитных пегматитов — в $350\text{--}200\text{ °C}$.

Г.И. Ишан-Шо [13] исследовала скаполиты из жил скаполита в основных кристаллических сланцах с проявления Кукурт (в настоящее время месторождение Черногорское), гомогенизацию и декрепитацию флюидных включений. Они гомогенизировались в двух температурных интервалах: $470\text{--}450\text{ °C}$ при давлении 100 МПа и $360\text{--}350\text{ °C}$ при 70 МПа . Декрепитация протекала в интервале $350\text{--}250\text{ °C}$. Для скаполита из миароловых гранитных пегматитов были получены значения гомогенизации в четырех интервалах температур: $640\text{--}635\text{ °C}$

Таблица 2. Температуры и расчетные давления кристаллизации скаполита из альбититов и гранитных пегматитов по данным гомогенизации и декрепитации флюидных включений**Table 2.** Temperatures and design pressures of crystallization of scapolite from albitites and granitic pegmatites according to the data of homogenization and decrepitation of fluid inclusions

Вмещающая порода	Метод гомогенизации		Метод декрепитации Температура	Авторы
	Температура	Давление, МПа		
Альбититы	470–450	100	350–250	[13]
	360–350	70		
	600–500	–	500–400	[26]
	400–200	40–70	250–100	
	550–505	370–130	–	[24]
	–	–	250–180	[8]
Гранитные пегматиты	640–635	80	610–560 380–230	[13]
	540–480	70		
	380–365	70		
	440–400	72–75	450–400	[27]
	350–300			
	230–220	–	200–150	
	580–450	330–140	–	[24]
	–	–	350–200	[8]

Примечание – исследование не проводилось.

Note – the study was not conducted.

при давлении 80 МПа, 540–480 °С при 70 МПа, 380–365 °С при 70 МПа, 220–170 °С без определения давления. Самые прозрачные камни характеризуются минимальным, до единичных, содержанием газовой-жидких включений [13].

В скаполитах из щелевидных полостей гранитных пегматитов было выявлено три группы флюидных включений: первичные, мнимовторичные и вторичные [27]. Первичные включения содержат многочисленные твердые фазы и жидкую CO_2 . Газовая фаза занимает до 40% вакуоли. Их декрепитация происходила в двух интервалах: 200–150 и 450–400 °С, а гомогенизация — при 350–300 °С, но некоторые гомогенизировались при 400 и 440 °С. Для температуры 350 °С методом В.Б. Наумова и С.Д. Малинина [20] было рассчитано давление в 72–75 МПа. Гомогенизацию второй группы включений исследователи не провели. Для третьей группы включений гомогенизация проходила при 230–220 °С [27].

Ф.З. Рафикова [26] методом гомогенизации первичных газовой-жидких включений в прозрачном скаполите из альбититов получила два интервала температурных значений: 600–500 и 400–200 °С при 70–40 МПа (расчетное давление газа по методу Калюжного), а методом декрепитации — более

низкие значения: 500–400 и 250–100 °С. В трехфазовых включениях преобладает жидкость. Методом тройных водных вытяжек в ее составе установлены Cl (55%), HCO_3 (35%), SO_3 (10%). Концентрация солей в растворах варьирует в пределах 30–40%. В составе газовой фазы преобладает H_2O с небольшим количеством CO_2 , C_2H_2 и CH_4 [26].

В.Ю. Прокофьевым с соавторами [24] в скаполитах из альбититов и пегматитов установлены первичные включения хлоридных рассолов с галитом и сильвинном, недиагностированные фазы с примесью газообразной CH_4 , а также сингенетичные им газовые включения CO_2 и водный раствор с высокой концентрацией солей. Во флюидах из скаполитов альбититовых жил температура гомогенизации оценена в 550–505 °С, давление по включениям гетерогенного флюида — 370–130 МПа, по включениям насыщенных растворов — 230–180 МПа. Включения в скаполитах из гранитных пегматитов гомогенизировались при температуре 580–450 °С, давление по гетерогенному флюиду — 330–140 МПа, а по насыщенному раствору — 280–170 МПа [24].

Приведенные выше данные по флюидным включениям в скаполитах обобщены в таблице 2.

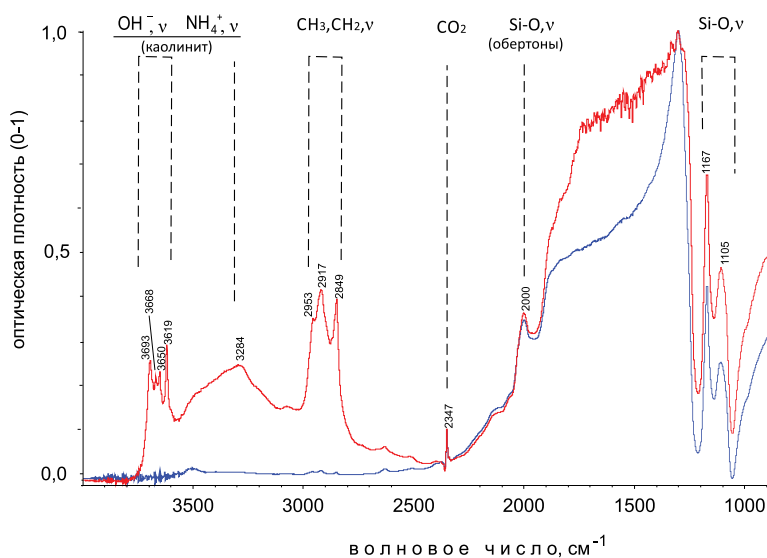


Рис. 9. ИК-спектры скаполита (синий) и флюидного включения в нем (красный) под ИК-микроскопом и их интерпретация. ν — валентные колебания химических связей
Fig. 9. IR spectra of scapolite (blue) and fluid inclusion in it (red) under an IR microscope and their interpretation. ν — valence oscillations of chemical bonds

Нами в скаполитах из пегматитов (образец А-3) обнаружены гомогенные флюидные включения призматической формы (вероятно, первичные) размером 1–5 мкм. В их составе, по данным ИК-микроскопии, установлены метан и углекислота (рис. 9). Это подтверждается присутствием интенсивных полос поглощения около 2849, 2917, 2953 см^{-1} , обусловленных валентными колебаниями CH_3 - и CH_2 -групп в составе предельных углеводородов (CH_4), а также пика около 2347 см^{-1} , связанного с примесью CO_2 . Полученные данные о наличии в составе включений в скаполите метана и углекислоты согласуются с результатами предшествующих исследований [24]. Помимо этого, в ИК-спектре включений (рис. 9) присутствуют характеристические линии гидроксильных групп (~ 3619 , ~ 3650 , ~ 3668 , ~ 3693 см^{-1}) в структуре каолинита, который, вероятно, образовался на стенках включений после их консервации.

Суммируя приведенные выше данные, можно отметить, что основными компонентами флюидных включений в скаполитах, представленными в разной пропорции, являются CO_2 и CH_4 , а также растворы солей (преимущественно хлоридов).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Присутствие в скаполите трех групп флюидных включений: первичных, мнимо-вторичных и вторичных, данные по температурам их гомогенизации и декрепитации (табл. 2, рис. 10) указывают

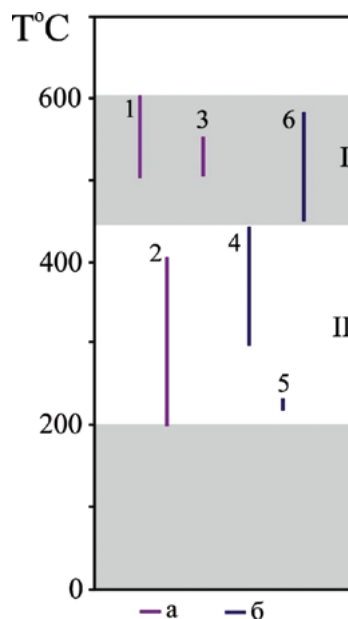


Рис. 10. Температуры гомогенизации первичных включений в скаполитах разных генераций (I и II) из альбититов (а) и гранитных пегматитов (б), по данным: 1–2 — [26], 3–5 — [24], 6 — [27]. Цветом выделены диапазоны температур минералогенеза
Fig. 10. The homogenization temperatures of primary inclusions in scapolites of different generations (I and II) of albitites (a) and granitic pegmatites (b), according to the data: 1–2 — [26], 3–5 — [24], 6 — [27]. Temperature ranges of mineralogenesis are highlighted in color

на наличие двух генераций этого минерала, что согласуется с полевыми наблюдениями [7, 14].

На месторождении Черногорское на 1-й стадии при температурах около 600 °С флюиды способствовали замещению нефелиновых сиенитов альбититами. С этим замещением связано образование полостей в альбититах [15, 23] и образование щелевидных — вторичных полостей в гранитных пегматитах. Мы разделяем точку зрения [27] о том, что прозрачный скаполит генетически не связан с пегматитовым процессом, а обусловлен последующим, наложенным на него гидротермальным.

Необходимо отметить, что в рассматриваемом регионе было выделено четыре группы разновозрастных гранитных пегматитов [7], среди них пегматиты со скаполитом отнесены к группе образований докембрийского возраста, генетически не связанных с гранитоидными комплексами. Пегматиты с аквамавром, топазом, турмалином и другими самоцветами отнесены к четвертой группе — к самым молодым (Р), пространственно и генетически связанным с шатпутским гранитоидным комплексом [2, 7, 10].

Далее, на второй стадии, на стенках полостей альбититов и пегматитов произошла кристаллизация крупных сиреневых кристаллов скаполита с температурами гомогенизации газовой-жидкой включений 580–450 °С и давлением 370–130 МПа [24]. Скаполит, инкрустирующий стенки полостей альбититов, частично заместил альбит, реликты которого наблюдаются визуально в центре кристаллов скаполита, а в пегматитах он обрастает дымчатым кварцем. Образование скаполита из альбититов осуществлялось путем метасоматического замещения кристаллов альбита, а вершины дорастали в свободном пространстве из вещества гидротермальных растворов. Скаполит со стенок пустот является самым ранним и высокотемпературным по сравнению со скаполитом полостей. Флюиды этой стадии «законсервированы» в первичных включениях.

Дальнейшее понижение температуры привело к формированию внутри полостей альбититов и пегматитов прозрачного (ювелирного) скаполита с температурой гомогенизации включений в интервале 400–200 °С и давлении 75 МПа [26]. Завершение этой стадии характеризуется «скачком» активности растворов, которые частично растворили скаполит, особенно сильно в гранитных пегматитах (рис. 2а, б). В альбититах после относительно слабо проявленного растворения граней скаполита в кавернах растворения образовались

агрегаты клевеландита (рис. 5а). Флюиды этой стадии представлены вторичными газовой-жидкими включениями, развитыми по трещинам в скаполите. Ее можно рассматривать как третью стадию.

На заключительной, четвертой стадии минералообразование обусловлено низкотемпературными растворами (температура ниже 200 °С), под действием которых в полостях отлагался серицит-каолиновый агрегат глинистой фракции.

Избирательное положение кристаллов прозрачного скаполита в гранитных пегматитах, локализованных в мраморах сарыджилгинской свиты, можно объяснить влиянием последних на состав минералообразующих растворов, участвующих в его формировании. Например, в мраморах месторождения Леденцы наблюдается вкрапленность белого скаполита, содержащего 36–48% мейонитового минала. Порфиробласты скаполита в мраморах отнесены к метаморфическому типу [14]. В пегматитах, которые вмещают силикатные горные породы других свит, скаполит отсутствует. Факты отсутствия скаполита в отдельных альбититовых телах на северном фланге месторождения Черногорское указывают на избирательность процесса скаполитообразования.

Источником вещества для минералообразующих растворов (Na, Cl и др.), сформировавших прозрачный скаполит, вероятно, послужили карбонатные породы (мраморы и кальцифиры, содержащие метаморфический скаполит) сарыджилгинской свиты, возникшие при эвапоритовой седиментации [1, 14].

На основании вышеизложенного образование прозрачного скаполита мы связываем с регрессивной стадией зонального метаморфизма.

Выводы

Проведенные нами исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В альбититах и гранитных пегматитах музкольской метаморфической серии выделено две генерации скаполита. Скаполит первой генерации, инкрустирующий стенки полостей, образовался при температуре 580–450 °С и давлении от 370 до 130 МПа. Скаполит второй генерации — прозрачный — образовался при понижении температуры от 400 до 200 °С и давлении 75 МПа.

2. Скаполиты из альбититов и гранитных пегматитов отличаются химическим составом и ИК-спектрами. Прозрачный скаполит в альбититах характеризуется содержанием мейонитового минала от 5 до 18%, а в гранитных пегматитах — соответственно от 21 до 29%. Характеристики ИК-спектров

скаполитов из гранитных пегматитов и альбититов в диапазоне 700–800 см⁻¹: волновые числа полос поглощения и соотношение их интенсивностей — можно рассматривать в качестве типоморфных свойств ювелирных скаполитов.

3. Формирование прозрачного скаполита в значительной мере обусловлено составом минералообразующих растворов и газов, отображенным во флюидных включениях, которые преимущественно представлены хлоридными рассолами, а также жидкой и газообразной CO₂. Источником

их вещества послужили карбонатные породы сарыджилгинской свиты, для которых установлена протоэвапоритовая седиментация.

4. В образовании месторождений прозрачного скаполита выделено четыре стадии минералогенеза: 1-я — формирование альбититов с полостями по нефелиновым сиенитам и вторичных полостей по гранитным пегматитам, 2-я — инкрустация скаполитом стенок полостей, 3-я — кристаллизация прозрачного скаполита в полостях, 4-я — заполнение полостей серицит-каолиновой глинистой массой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буданова К.Т. Метаморфические формации Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1991. 336 с.
2. Буданов В.И. Эндогенные формации Памира. Душанбе: Дониш, 1993. 299 с.
3. Буданов В.И., Буданова К.Т. Геолого-петрологическая характеристика обнаженного кристаллического фундамента. Земная кора и верхняя мантия Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1981. С. 56–101.
4. Бубнова М.А. Древние рудознатцы Памира. Душанбе, 1993. 174 с.
5. Геологическая карта Таджикской ССР и прилегающих территорий. Масштаб 1:500 000. Под редакцией Н.Г. Власова, Ю.А. Дьяков, Э.С. Чернер. М.: ВСЕГЕИ, 1989.
6. Глебовицкий В.А., Седова И.С., Дюфур М.С. Эволюция метаморфических поясов альпийского типа. Л.: Наука, 1981. 304 с.
7. Дмитриев Э.А. Гранитные пегматиты Восточного Памира и их перспективы на камнесамоцветное сырье. Известия АН Тадж. ССР. Отд.-е физ.-мат., хим. и геол. наук. 1983. № 3 (89). С. 48–57.
8. Дмитриев Э.А., Скризитель А.М. Минералогия ювелирных скаполитов Восточного Памира. Докл. АН Тадж.ССР. 1982. Т. XXV. № 10. С. 612–615.
9. Дюфур М.С., Попова В.А., Кривец Т.Н. Альпийский метаморфический комплекс восточной части Центрального Памира. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. 128 с.
10. Загорский В.Е., Перетяжко И.С. Граниты шатпутского комплекса и жильные образования Кукуртского самоцветного узла. Геология и Геофизика. 1996. Т. 37. № 7. С. 76–87.
11. Загорский В.Е., Перетяжко И.С., Шмакин Б.М. Гранитные пегматиты. Миароловые пегматиты. Т. 3. Новосибирск: Наука, 1999. 488 с.
12. Золотарёв А.А. Ювелирный скаполит с Восточного Памира некоторые общие особенности конституции скаполитов. Записки Всероссийского Минералогического Общества. 1993. № 2. С. 90–102.
13. Ишан-Шо Г.А. Особенности флюидного режима образования скаполита Восточного Памира. Докл. АН Тадж. ССР. 1990. Т. 33. № 11. С. 754–758.
14. Литвиненко А.К., Барнов Н.Г. Генетические типы скаполита сарыджилгинской свиты музкольской метаморфической серии (Центральный Памир). Известия вузов. Геология и разведка. 2011. № 1. С. 23–29.
15. Литвиненко А.К., Моисеева С.Б., Одинаев Ш.А., Утенков В.А. Геология Черногорского месторождения ювелирного скаполита на Центральном Памире. Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 5. С. 96–108. DOI: 10.31857/S0016-777061596-108
16. Литвиненко А.К., Одинаев Ш.А. Минералы титана на месторождении ювелирного скаполита Черногорское, Центральный Памир. XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле». М., 2019. Т. II. С. 305–306.
17. Литвиненко А.К., Одинаев Ш.А., Малахов Ф.А. Первая находка содалита и нефелина на месторождении ювелирного скаполита Черногорское (Центральный Памир). Разведка и охрана недр. 2019. № 7. С. 17–22.
18. Литвиненко А.К., Одинаев Ш.А. Новая рудно-магматическая кольцевая структура в Музкол-Рангульском антиклинории, Центральный Памир. Известия вузов. Геология и разведка. 2022. Т. 64. № 6. С. 48–58. DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-6-48-58
19. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений. М.: Мир, 1965. 216 с.
20. Наумов В.Б., Малинин С.Д. Новый метод определения давления по газовой-жидким включениям. Геохимия. 1968. № 4. С. 432–441.
21. Одинаев Ш.А., Литвиненко А.К., Федоров А.В., Авезов М.Н., Ятимов У.А. Метасоматические карбонатиты на месторождении ювелирного скаполита Черногорское, Центральный Памир. Разведка и охрана недр. 2020. № 4. С. 37–42.
22. Одинаев Ш.А., Литвиненко А.К. Геохимические особенности и парагенезисы минералов титанита из месторождения ювелирного скаполита Черногорское, Центральный Памир (Таджикистан). XII Международная конференция молодых ученых и студентов «Современные техника и технологии в научных исследованиях». Бишкек, 2020. С. 132–138.
23. Одинаев Ш.А. Закономерности локализации ювелирного скаполита и рудной минерализации на Черногорском месторождении, Центральный Памир

- (Таджикистан): автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.11. М.: МГРИ, 2020. 30 с.
24. Прокофьев В.Ю., Перетяжко И.С., Загорский В.Е. Включения высокотемпературных хлоридных рассолов в скаполитах Кукуртского самоцветного узла (Центральный Памир). Доклады Академии Наук. 2000. Т. 370. № 5. С. 665–667.
 25. Расчленение стратифицированных и интрузивных образований Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1976. 207 с.
 26. Рафиқова Ф.З. Термобарогеохимические условия образования скаполитового месторождения кукуртского камнесамоцветного узла (Восточный Памир): дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ, 1994. 151 с.
 27. Россовский Л.Н., Морозов С.А., Скригитель А.М. Особенности формирования миароловых пегматитов Восточного Памира. Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 5. С. 92–103.
 28. Сергуненков Б.Б. Ювелирный скаполит с хребта Туракулома (Памир). Записки Всесоюзного Минералогического Общества. 1989. Ч. 118. Вып. 4. С. 84–90.
 29. Скригитель А.М. Драгоценные камни в пегматитах Восточного Памира. Мир камня. 1996. № 11. С. 16–25.
 30. Odinaev Sh., Aminov J., Kallistov G., Ma X., Tang G-R., Murodov A., Aleksandr S., Oimhammadzoda I., Gadoev M., Ashuraliev S., Dan W., Tang G.J. Cambrian intermediate-felsic rocks in Central Pamir: Insights into source heterogeneity and subduction initiation in the Proto-Tethys Ocean // *Lithos*. 2025. 516–517, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108251>.
 31. Sokolova E., Hawthorne F.C. The crystal chemistry of the scapolite-group minerals. I. Crystal structure and long-range order. *The Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46. P. 1527–1554.
 32. Tang G.J., Wyman D.A., Dan W., Wang Q., Liu X.J., Yang Y.N., Gadoev M., Oimahmadov I. Protracted and Progressive Crustal Melting during Continental Collision in the Pamir and Plateau Growth. *Journal of Petrology*. 2024. Vol. 65. No 4. P. 1–28. DOI: 10.1093/petrology/aga024
 33. Iishi K., et al. Isomorphous substitution and infrared and far infrared spectra of the feldspar group // *Neues J. Miner. Abh.* 1971. B. 115. H1. P. 98–119.
 34. Schwarcz H.P., Speelman E.L. Determination of sulfur and carbon coordination in scapolite by infra-red absorption spectrophotometry. *The American Mineralogist*. 1965. Vol. 50. May-june. P. 656–666.
 35. Wehrenberg J.P. The Infrared Absorption Spectra of Scapolite, *The American Mineralogist*. 1971. Vol. 56. Sept.-oct. P. 1639–1654.

REFERENCES

1. Budanova K.T. Metamorphic Formations of Tadjikistan. Dushanbe: Donish, 1991. 336 p. (In Russ.).
2. Budanov V.I. Endogenous Formations of Pamirs. Dushanbe: Donish, 1993. 299 p. (In Russ.).
3. Budanov V.I., Budanova K.T. Geologo-petrological characteristics of the exposed crystalline foundation. Dushanbe: Donish, 1981. P. 56–101 (In Russ.).
4. Bubnova M.A. Drevnye rudoznatsy Pamira [Ancient Rudoznatsy of the Pamirs]. Dushanbe: 1993. 174 p. (In Russ.).
5. Geological map of the Tajik SSR and adjacent territories. Scale 1:500 000. Ed. by N.G. Vlasov. Moscow: VSEGEI, 1989 (In Russ.).
6. Glebovitsky V.A., Sedova I.S., Dufour M.S. Evolution of metamorphic belts of the alpine type. Leningrad: Nauka, 1981. 304 p. (In Russ.).
7. Dmitriev E.A. Granitnye pegmatites of the Eastern Pamirs and their prospects for stone gem raw materials. *Izvestiya AN Tadjikistan SSR*. 1983. No. 3 (89). P. 48–57 (In Russ.).
8. Dmitriev E.A., Skrigitel A.M. Mineralogy of jewelry scapolites of the Eastern Pamirs. *Dokl. AN Tadjikistan SSR*. 1982. T. XXV. No. 10. P. 612–615 (In Russ.).
9. Dufour M.S., Popova V.A., Krivets T.N. Alpine metamorphic complex of the eastern part of the Central Pamirs. Leningrad: LGU, 1970. 128 p. (In Russ.).
10. Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S. Granites of the Shatput complex and vein formations of the Kukurt gem node. 1996. T. 37. No. 7. P. 76–87. (In Russ.).
11. Zagorsky V.E., Peretyazhko I.S., Shmakin B.M. Granitic pegmatites. Mirolitic pegmatites. T. 3. Novosibirsk: Nauka, 1999. 488 p. (In Russ.).
12. Zolotarev A.A. Jewelry scapolite from Eastern Pamirs and some common features of scapolite constitution. *Zapiski RMO (Proc. Russ. Mineral. Soc.)*. 1993. No. 2. P. 90–102 (In Russ.).
13. Ishan-Sho G.A. Features of the fluid regime of the formation of scapolite of the Eastern Pamirs. *Dokl. AN Tadjikistan SSR*. 1990. T. 33. No. 11. P. 754–758 (In Russ.).
14. Litvinenko A.K. and Barnov N.G. Genetic types of scapolite of the Sarydzhilga Formation of the Muzkol metamorphic series, Central Pamirs. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2011. No. 1. P. 23–29 (In Russ.).
15. Litvinenko A.K., Moiseeva S.B., Odinaev Sh.A., Utenkov V.A. Geology of the Gem-Quality Scapolite Deposit (Central Pamirs, Tajikistan). *Geology of Ore Deposits*. 2019₁. Vol. 61. No. 5. P. 96–108 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0016-777061596-108
16. Litvinenko A.K., Odinaev Sh. A. Titanium minerals at the deposit of jewelry scapolite Chernogorskoye, Central Pamir. XIV International Scientific and Practical Conference «New Ideas in Earth Sciences». Moscow, 2019. Vol. II. P. 305–306 (In Russ.).
17. Litvinenko A.K., Odinaev Sh.A., Malakhov F.A. The first find of sodalite and nefelin at the deposit of jewelry scapolite Montenegrin (Central Pamir). *Prospect and protection of mineral resources*. 2019₂. No. 7. P. 17–22 (In Russ.).
18. Litvinenko A.K., Odinaev Sh. A. New ore-magmatic ring-type structure in the Muzkol-Rangkul anticlinorium,

- Central Pamir. Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 2022. Vol. 64. No. 6. P. 48–58 (In Russ.). DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-6-48-58
19. Nakanishi K. *Infrared Spectra and Structure of Organic Compounds*. Moscow: Mir, 1965. 216 p. (In Russ.).
20. Naumov V.B., Malinin S.D. New method of determining pressure by gas-liquid inclusions. 1968. No. 4. P. 432–441 (In Russ.).
21. Odinaev Sh.A., Litvinenko A.K., Fedorov A.V., Avezov M.N., Yatimov U.A. Metasomatic carbonatites at the Chernogorskoye jewelry scapolite deposit, Central Pamir. *Prospect and protection of mineral resources*. 2020. No. 4. P. 37–42 (In Russ.).
22. Odinaev Sh.A., Litvinenko A.K. Geochemical features and paragenesis of titanite minerals from the Chernogorskoye scapolite deposit, Central Pamir (Tajikistan). XII International Conference of Young Scientists and Students «Modern Technics and Technologies in Scientific Research». Bishkek, 2020. P. 132–138 (In Russ.).
23. Odinaev Sh. A. Regularities of localization of jewelry scapolite and ore mineralization at the Chernogorskoye deposit, Central Pamir (Tajikistan). *Author. ... Cand. Geol.-min. nauk: 25.00.11 / Moscow: MGRI, 2020. 30 p.* (In Russ.).
24. Prokofiev V. Yu., Peretyazhko I.S., Zagorsky V.E. Inclusions of high-temperature chloride brines in the scapolites of the Kukurt gem node (Central Pamir). *Dokl. AN*. 2000. T. 370. No 5. P. 665–667 (In Russ.).
25. Dismemberment of stratified and intrusive formations in Tajikistan. Dushanbe: Donish, 1976. 267 p. (In Russ.).
26. Rafikova F.Z. Thermobarogeochemical conditions for the formation of the scapolite deposit of the Kukurt gemstone cluster (Eastern Pamir): Diss. ... Candidate's (Geol.-Min.). Moscow: MGU, 1994. 151 p. (In Russ.).
27. Rossovsky L.N., Morozov S.A., Skrigitel A.M. Features of the formation of miarol pegmatites of the Eastern Pamirs. *Izvestiya AN SSSR, ser. Geol.* 1991. No 5. P. 92–103 (In Russ.).
28. Sergunenkov B.B. Jewelry Scapolite from the Turakulom Ridge (Pamir). *Zapiski RMO (Proc. Russ. Mineral. Soc.)*. 1989. Ch. 118. Vol. 4. P. 84–90. (In Russ.).
29. Skrigitel A.M. Precious Stones in Pegmatites of the Eastern Pamirs. *The world of stone*. 1996. No 11. P. 16–25 (In Russ.).
30. Odinaev Sh., Aminov J., Kallistov G., Ma X., Tang G.-R., Murodov A., Aleksandr S., Oimhammadzoda I., Gadoev M., Ashuraliev S., Dan W., Tang G.J. Cambrian intermediate-felsic rocks in Central Pamir: Insights into source heterogeneity and subduction initiation in the Proto-Tethys Ocean // *Lithos*. 2025. 516–517, pp. 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2025.108251>.
31. Sokolova E., Hawthorne F.C. The crystal chemistry of the scapolite-group minerals. I. Crystal structure and long-range order. *The Canadian Mineralogist*. 2008. Vol. 46. P. 1527–1554.
32. Tang G.J., Wyman D.A., Dan W., Wang Q., Liu X.J., Yang Y.N., Gadoev M., Oimahmadov I. Protracted and Progressive Crustal Melting during Continental Collision in the Pamir and Plateau Growth. *Journal of Petrology*. 2024. Vol. 65. No 4. P. 1–28. DOI: 10.1093/petrology/agate024
33. Iiishi K., et al. Isomorphous substitution and infrared and far infrared spectra of the feldspar group. *Neues J. Miner. Abh.*, 1971. B. 115. H1. P. 98–119.
34. Schwarcz H.P., Speelman E.L. Determination of sulfur and carbon coordination in scapolite by infra-red absorption spectrophotometry. *The American Mineralogist*. Vol. 50. May-june. 1965. P. 656–666.
35. Wehrenberg J.P. The Infrared Absorption Spectra of Scapolite. *The American Mineralogist*. Vol. 56. Sept.-oct. 1971. P. 1639–1654.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Литвиненко А.К. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Одинаев Ш.А. — внес вклад в подготовку текста статьи, обработку и анализ геолого-петрохимических данных, создании графической информации, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Хачатрян Г.К. — выполнила ИК-спектроскопические исследования скаполитов, внесла вклад в обработку и анализ генетической картины их месторождений, утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Andrey K. Litvinenko — developed the concept and prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Sharifjon A. Odinaev — contributed to the processing and analysis of geological and petrochemical data, the creation of graphical information and the preparation of the text of the article, approved the published version of the article and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Galina K. Khachatryan — performed IR spectroscopic studies of scapolites, contributed to the processing and analysis of the genetic picture of their deposits, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Литвиненко Андрей Кимович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и геммологии ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: akl1954@yandex.ru
тел.: +7(916)655-08-08
SPIN-код: 6127-2320
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1779-5391>

Одинаев Шарифджон Ахтамжонович* — кандидат геолого-минералогических наук, докторант Института геохимии Гуанчжоу Китайской академии наук; старший научный сотрудник Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана.

511, ул. Кехуа, г. Гуанчжоу 510640, Китай
267, ул. Айна, г. Душанбе 734063, Таджикистан
e-mail: Sharif.Geolog@mail.ru
тел.: +86 13054495854
SPIN-код: 1174-3786
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8849-206X>

Хачатрян Галина Карленовна — доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов».

129, стр. 1, Варшавское шоссе, г. Москва 117545, Россия
e-mail: khachatryan_g_k@mail.ru
тел.: +7 (926) 551-32-13
SPIN-код: 4711-5207
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3858-7639>

Andrey K. Litvinenko — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor of the Department of Minerology and Gemmology Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: akl1954@yandex.ru
tel.: +7(916)655-08-08
SPIN-code: 6127-2320
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1779-5391>

Sharifjon S. Odinaev * — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), PhD student of State Key Laboratory of Deep Earth Processes and Resources, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, senior Research, Institute of geology, earthquake engineering and seismology, National Academy of Sciences of Tajikistan.

511, Kehua str., Guangzhou 510640, China
267, Ayni str., Dushanbe 734063, Tajikistan
e-mail: Sharif.Geolog@mail.ru
tel.: +86 13054495854
SPIN-code: 1174-3786
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8849-206X>

Galina K. Khachatryan — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), leading researcher of the Central Research Institute of Non-Ferrous and Precious Metals.

129/1, Varshavskoe highway, Moscow 117545, Russia
e-mail: khachatryan_g_k@mail.ru
tel.: +7 (926) 551-32-13
SPIN-code: 4711-5207
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3858-7639>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОД, МЕТАСОМАТИТОВ И РУД НА МЕСТОРОЖДЕНИИ ЗОЛОТА ТУНАНЦА, ЭКВАДОР

Х.П. МЕДИНА^{1,*}, П.А. ИГНАТОВ¹, А.А. ИВАНОВ¹, И.В. ВИКЕНТЬЕВ²

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)
35, Старомонетный пер., Москва 119017 Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Кордильера-дель-Кондор на юго-востоке Эквадора вмещает несколько золоторудных месторождений, включая эпитермальное золотоносное месторождение Тунанца и неразведанные перспективные участки. Кроме того, связь между физическими свойствами, гидротермальными изменениями и золоторудной минерализацией остается слабоизученной, что может ограничивать интерпретацию данных геофизических исследований в этом регионе. Впервые в данном исследовании представлены результаты анализа избранных физических свойств образцов с месторождения Тунанца.

Цель: определить физические свойства неизмененных горных пород, метасоматитов и руд месторождения золота Тунанца для выявления их соотношений и локализации оруденения.

Материалы и методы. Использованы геологические материалы, результаты документации поверхностных выходов и подземных выработок; петрографические и минераграфические исследования 86 прозрачных шлифов и 10 аншлифов. Выполнен анализ 315 образцов: плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления; осуществлена картографическая интерполяция изменений физических свойств с использованием метода кригинга в геоинформационной среде QGIS.

Результаты. Метасоматиты и руды проявляются в увеличении плотности и резком снижении магнитной восприимчивости при переходе от пропилитов к рудному телу. Интерполяция изменений физических свойств отражает рудную зону в виде совмещенной аномалии высокой плотности и низкой магнитной восприимчивости, окруженной проводящим и внешним магнитным ореолом.

Заключение. Установлена связь между физическими параметрами фреатомагматических брекчий с метасоматитами и локализованной в них золоторудной минерализацией, что следует использовать в качестве инструмента при поисках эпитермальных и порфириновых месторождений при интерпретации геофизических данных.

Ключевые слова: брекчиевая трубка, золото, эпитермальные месторождения, Кордильера-дель-Кондор, физические свойства, кригинг, магнитная восприимчивость

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Медина Х.П., Игнатов П.А., Иванов А.А., Викентьев И.В. Физические свойства пород, метасоматитов и руд на месторождении золота Тунанца, Эквадор. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):50—62. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-50-62> EDN: [XPGNMN](https://edn.ru/XPGNMN)

Статья поступила в редакцию 25.01.2026

Принята к публикации 20.03.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

PHYSICAL PROPERTIES OF ROCKS, METASOMATITES, AND ORES AT THE TUNANTZA GOLD DEPOSIT, ECUADOR

JUAN P. MEDINA^{1*}, PETR A. IGNATOV¹, ANDREY A. IVANOV¹, ILYA V. VIKENTYEV²

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Mikluho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences
35, Staromonetny lane, Moscow, 119017 Russia*

ABSTRACT

Background. The Cordillera del Condor in southeastern Ecuador hosts several gold deposits, including the Tunantza epithermal gold deposit and unexplored prospects. Furthermore, the relationship between physical properties and hydrothermal alteration assemblages as well as gold mineralization remains poorly studied, which can limit the interpretation of geophysical exploration data in this region. For the first time, this study presents the results of the analysis of selected physical properties of samples from the Tunantza deposit.

Aim. To evaluate the physical properties of rocks from the Tunantza gold deposit, establish their relationships with metasomatic facies, and identify mineralization zones.

Materials and methods. Geological materials and data obtained from the documentation of surface outcrops and underground workings were used. Petrographic analysis was carried out on 96 thin sections (86 standard and 10 polished sections). In total, 315 samples were analyzed to determine density, magnetic susceptibility, and specific electrical resistivity. Spatial interpolation was performed using the kriging method in QGIS.

Results. The influence of metasomatism and the presence of the ore body on physical properties is manifested by an increase in density and a marked decrease in magnetic susceptibility from the propylitic zone toward the ore body. Interpolation models indicate that the ore zone forms as a composite anomaly characterized by high density and low magnetic susceptibility, surrounded by a conductive halo and an external magnetic halo.

Conclusion. The results obtained demonstrate a relationship between breccia properties, metasomatic facies, and the distribution of mineralized zones. These findings can be applied in the prospecting of epithermal and porphyry deposits, as well as in the interpretation of geophysical data.

Keywords: breccia-pipe, gold, epithermal, Cordillera del Condor, physical properties, kriging, magnetic susceptibility

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Medina J.P., Ignatov P.A., Ivanov A.A., Vikentyev I.V. Physical properties of rocks, metasomatites, and ores at the Tunantza gold deposit, Ecuador. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):50—62. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-50-62> EDN: [XPGNMM](https://www.edn.ru/)

Manuscript received 25 January 2026

Accepted 20 March 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Эпитермальные месторождения представляют собой значительные источники золота, включая крупные месторождения мирового класса, связанные с фреатомагматическими и гидротермальными брекчиевыми трубками, такие как месторождение Акупан (Филиппины) с добычей более 200 тонн золота [12] и Крипл-Крик

(США) с извлечением более 810 тонн золота [16], Ладолам (Папуа — Новая Гвинея) с более чем 1400 тоннами золота [7]. Все они связаны с Тихоокеанским рудным поясом, включая мелко-среднее по запасам месторождение Тунанца. Оно также локализовано во фреатомагматической брекчиевой трубке [2, 3].

В основе интерпретации геофизических данных при поисках рудных месторождений как эффективного инструмента лежит определение физических свойств пород, метасоматитов и руд по образцам. Для эпитермальных и порфировых месторождений золота важное значение также имеет характерная метасоматическая зональность [1, 10, 20]. Кроме того, ферромагнитные минералы, такие как магнетит и пирротин, могут быть широко распространены в золоторудных месторождениях, даже входя в состав руд [5, 19] или являясь частью вмещающих пород глубинных зон, связанных с порфирами [1, 19, 20], что влияет на изменения магнитной восприимчивости пород. К этому надо добавить существенную корреляцию между данными магнитометрии и гидротермальной метасоматической зональностью [6, 9, 14], а также увеличение плотности в перспективных зонах. Однако каталог данных по геофизическим свойствам пород, аномалиям и изменениям в анализе пространственного распределения весьма ограничен, что подчеркивает важность разработки исследований, позволяющих установить эти свойства для пород, связанных с золоторудными месторождениями, такими как Тунанца. Результаты таких исследований следует учитывать при интерпретации полевых геолого-геофизических данных на этапе поисково-оценочных работ.

Материалы и методы

Исследование основано на данных геолого-структурного анализа и изучения более чем 500 образцов пород, руд и метасоматитов, отобранных из поверхностных обнажений и более чем 3000 м задокументированных эксплуатационных, разведочных и поверхностных выработок месторождения золота Тунанца.

Петрографические и минералогические исследования включали макроскопическое изучение 315 образцов с месторождения Тунанца.

Оптическая микроскопия. Изучено 96 образцов, из которых 47 прозрачных шлифов и 10 аншлифов соответствовали фрагментам руды и пробам из обогащенной зоны; остальные 39 прозрачных шлифов относились к породам и метасоматитам. Исследования проводились на микроскопе Axioscore-5, оборудованном цифровой камерой и компьютером с программным обеспечением SIAMS на кафедре геологии месторождений полезных ископаемых геологоразведочного факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ — МГРИ).

Физические параметры. Проанализировано 335 образцов, получены данные по плотности, магнитной восприимчивости и удельному электрическому сопротивлению. Анализы выполнены с использованием гидростатических весов, каппаметра Model KT-5 серия 7088 и Terrmometer E6-3. Исследование проводилось на кафедре геофизики геофизического факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (РГГРУ — МГРИ).

Анализ пространственного распределения физических параметров (плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления) на исследуемой площади выполнен с использованием плагина Smartmap 1.5 для QGIS и метода интерполяции кригинга. Согласно [8, 21], данный метод соответствует условиям настоящего исследования, поскольку данные характеризуются пространственной автокорреляцией, а сеть опробования является неоднородной: расстояние между пробами варьирует от 1 до 200 м. Анализируемая площадь соответствует полигону 1000 x 600 м, который плане включает крутопадающее тело брекчий, включает минерализованную зону месторождения и простирается до зон контакта брекчий с вмещающими породами, основана на данных 80 отобранных, проверенных и очищенных проб, со схожим размером, высокой целостностью и без признаков гипергенных изменений.

Результаты исследований

Золоторудное месторождение Тунанца, ранее известное как Пиунца, разрабатываемое по лицензии горного общества «Питука II», расположено на юге Эквадора, в провинции Самора-Чинчипе, в 9 км к юго-востоку от города Самора (78°53' в.д., 4°07' ю.ш.), в Кордильере-дель-Кондор. Район месторождения входит регион рифтогенеза пермотриасового возраста [17]. В этом же регионе находятся эпитермальное месторождение Фрутадель-Норте, с запасами 9,91 млн унций золота и 15,0 млн унций серебра [17], медно-порфировый объект Мирадор с ресурсами 609 млн метрических тонн при содержании 0,58% Cu, 3,2 млн унций золота и 22 млн унций серебра [11], скарновое месторождение Намбиха и другие практически не изученные золотоносные зоны, к ним относятся и месторождение Тунанца.

Месторождение Тунанца представляет собой мелко-среднезернистое эпитермальное месторождение, расположенное внутри полимиктовой брекчиевой трубки фреатомагматического

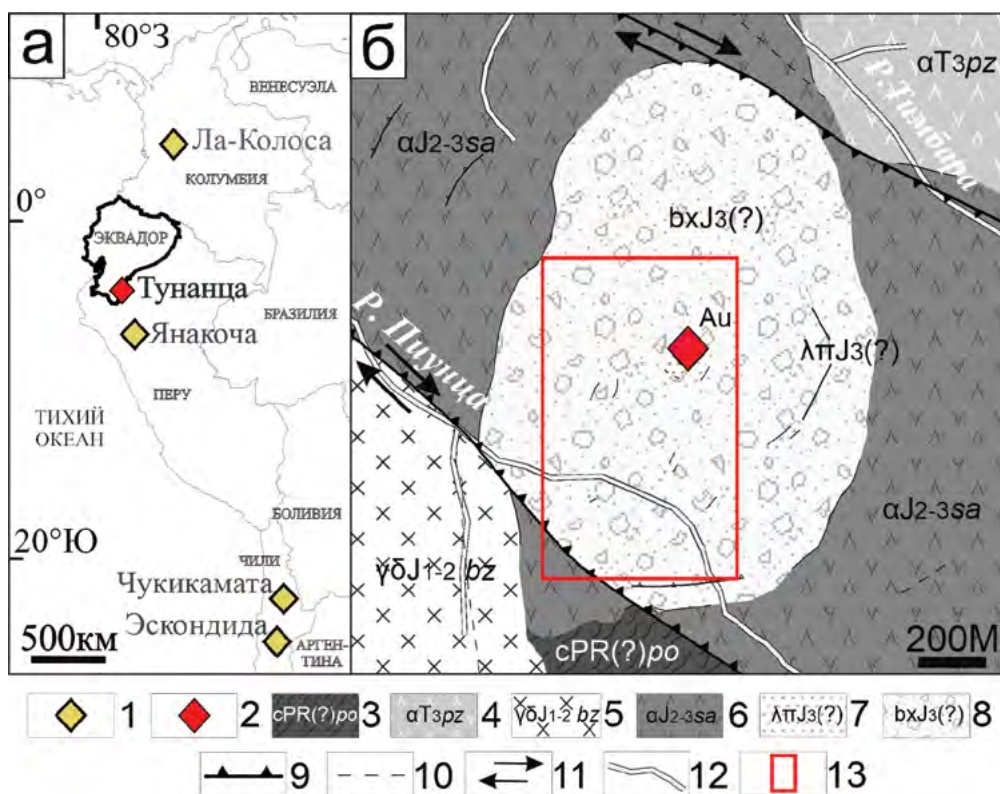


Рис. 1. Региональное расположение некоторых из основных золото-медных месторождений Южной Америки и месторождения золота Туананца (а); геологическая схема золоторудного месторождения Туананца [4] (б). 1 — рудные месторождения; 2 — месторождение Туананца; 3 — сланцы и гнейсы, формация «План-дель-Осо»; 4 — порфировые андезиты, формация Пиунца; 5 — гранодиориты батолита Самора; 6 — афанитовые андезиты, формация Ла Сакеа; 7 — риолитовый кварц-полевошпатовый порфир; 8 — фреатоматматические брекчи; 9 — сдвиг; 10 — предполагаемый разлом; 11 — направление сдвига; 12 — речная сеть; 13 — исследованный участок

Fig. 1. Regional location of some of the main gold and copper deposits of South America and the Tunantza gold deposit (a); geological scheme of the Tunantza gold deposit [4] (b). 1 — ore deposits; 2 — Tunantza deposit; 3 — shales and gneisses, «Plan del Oso» formation; 4 — porphyritic andesites, Piuntza formation; 5 — granodiorites of the Zamora batholith; 6 — aphanite andesites, La Saquea formation; 7 — rhyolitic quartz-feldspar porphyry; 8 — phreatomagmatic breccias; 9 — strike-slip fault; 10 — inferred fault; 11 — slip direction; 12 — river network; 13 — study area

происхождения [2, 4], которая прорывает гранитные породы батолита Самора (рис. 1). К югу от рудного поля расположены гнейсы и сланцы формации План-дель-Осо предположительно неопротерозойско-палеозойского возраста [15], слагающие останцы кровли над батолитом. На севере обнажаются порфировые андезиты, входящие в состав основания триасовой формации Пиунца [15]; они находятся в контакте с батолитом и также образуют останцы кровли над ним. На северо-западе и юго-востоке наблюдаются афировые андезиты, залегающие несогласно на формации Пиунца, обрамляющие брекчиевый массив и входящие в состав формации Ла-Сакеа.

Самора батолит простирается на 200 км в северо-северо-восточном направлении при ширине 50 км и является частью юрского известково-щелочного вулканического пояса. Батолит состоит из двух различных интрузивных комплексов: 1 — ранний плутон преимущественно однородного состава, сложенный главным образом среднезернистыми гранодиоритами, которые обнажаются к юго-западу от рудного поля в контакте с брекчиями [4]; 2 — поздний комплекс в виде субвулканических интрузий, даек и штоками, образующими купольные структуры среднего или кислого состава, которые пересекают батолит в различных местах [11, 17]. Именно они выделяются своей связью

с зонами медно-золотой минерализации [11]. Породы последнего типа относятся к риолитовым кварц-полевошпатовым порфирам, присутствующим в составе брекчии в виде обломков и неправильных блоков размером более 5 м; они представляют собой реликты гипабиссального тела, внедрившегося в plutonic породы Самора ба-толита до образования брекчии [2, 4].

Брекчии образуют неправильной формы массив с диаметром на поверхности примерно 1,4 км. Контактные поверхности круто падают к центру, что указывает на трубчатую, сужающуюся с глубиной форму. Они представлены преимущественно матриксными брекчиями, содержащими хаотично распределенные обломки разного размера. Их пересекают гидротермальные брекчии в виде субвертикальных прожилков и жил, беспорядочно распределенных в брекчиевом теле. На основании комплекса диагностических признаков эти брекчии относятся к фреатомагматическим [2, 4].

Золоторудные зоны представлены двумя формами: первая — минерализованные брекчии с сульфидным цементом, образующие неправильные субвертикальные удлиненные блоки поперечником около 20 м; вторая — тонкие зигзагообразные кварц-сульфидные жилы мощностью около 2 см, с почти вертикальным падением, протяженностью до 30 м, расположенные радиально относительно первой формы. В целом минерализация локализована в центральной части брекчиевого тела. Рудные минералы включают пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, арсенопирит и, в меньших количествах, другие сульфиды, которые в совокупности составляют более 60%. Нерудные минералы представлены кварцем и поздними карбонатами [2].

Брекчии, вмещающие месторождение Тунанца, являются полимиктовыми и содержат хаотично распределенные обломки разного размера, включающие: риолитовый порфир, базальт, андезит, гранодиорит, черный сланец, гнейс, роговик, андезитовые туфы и, в меньшей степени, другие породы, размер которых слишком мал для точной идентификации. Изучение брекчий месторождения Тунанца позволило определить количественное содержание обломков разного состава (табл. 1). Заметно преобладает кварц-полевошпатовый риолитовый порфир, за которым следуют базальт и андезит.

Метасоматиты. В рудном поле месторождения Тунанца установлена последовательность метасоматических изменений: пропилиты, кварц-серцитовые и каолинит-алунитовые образования, что отражает эволюцию гидротермальных растворов

Таблица 1. Процентный состав обломков брекчий месторождения Тунанца

Table 1. Percentage composition of clasts forming the breccias from the Tunantza deposit

Порода	%
Кварц-полевошпатовый риолитовый порфир	20–60
Базальт	5–20
Андезит	5–20
Гранодиорит	<5–10
Черный сланец	<5
Гнейс	<5
Роговик	<5
Андезитовый туф	<5
Другие (не диагностированы)	<15

от условий, близких к нейтральным, к более кислым. Оптическая микроскопия позволила исключить присутствие ферромагнитных минералов в руде, а также идентифицировать магнетит, широко распространенный в базальте и в микрообломках брекчий, принадлежащих к пропилитам. В кварц-серцитовых и каолинит-алунитовых метасоматах в обломках брекчий наблюдается присутствие пирита и сидерита.

Физические свойства пород месторождения Тунанца, представленных обломками брекчий, имеют различные значения для каждого типа породы (табл. 2).

Плотность изменяется от 2,44 до 2,75 г/см³ для пород и резко возрастает до 3,63 г/см³ для руд, что подчеркивает явный контраст между вмещающими породами и минерализованным телом. Магнитная восприимчивость сильно варьирует от 0,08×10⁻³ СИ для руды и роговиков до 5,05×10⁻³ СИ для базальта. Кварц-полевошпатовый риолитовый порфир имеет умеренные значения около 2,4×10⁻³ СИ, как и гранодиорит. Средние значения удельного электрического сопротивления в большинстве пород, как правило, превышают 1×10⁶ Ом·м. Рудные образцы и сланцы имеют значения на порядок ниже 0,14×10⁶ Ом·м.

Значения физических свойств брекчий варьируют в зависимости от степени их метасоматического изменения и присутствия рудных минералов (табл. 3).

Средняя плотность пропилитизированных брекчий составила 2,46 г/см³, а охваченных кварц-серцитовым метасоматозом — 2,52 г/см³ и каолинит-алунитовым — 2,51 г/см³, что заметно выше. Надо отметить значительное увеличение плотности для брекчий с присутствием сульфидов со средними значениями, достигающими 2,64 г/см³,

Таблица 2. Средние значения свойств типичных пород месторождения Туанца
Table 2. Average values of properties of typical rocks of the Tunantza deposit

Порода	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество образцов
Кварц-полевошпатовый риолитовый порфир	2,44	2,44	1,16	38
Базальт	2,47	5,05	0,45	10
Андезит	2,64	1,08	1,01	13
Гранодиорит	2,62	2,42	1,20	3
Гнейс	2,75	0,20	1,24	4
Андезитовый туф	2,52	0,60	1,21	5
Черный сланец	2,75	0,17	0,14	1
Роговик	2,63	0,08	1,09	1
Руда	3,63	0,08	0,00	3
Брекчия	2,54	1,03	0,88	116
Другие (брекчии в которых один обломок занимает >50% объема образца, контактовые зоны)	2,52	2,26	0,95	141

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
 Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

Таблица 3. Средние значения плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления брекчий в зависимости от типа метасоматизма и наличия рудных минералов
Table 3. Average values of density, magnetic susceptibility, and electrical resistivity of breccias according to the type of metasomatism and presence of ore minerals

Код	Тип	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество образцов	
1	Не измененные*	2,53	2,15	1,00	194	
2	Метасоматизм	Пропилит	2,46	1,62	0,63	18
3		Кварц-серицит	2,52	0,89	0,57	17
4		каолинит-алунитовые	2,51	0,25	1,16	36
5.1		С рассеянными сульфидами в матрице	2,52	0,23	0,96	18
5.2	С прожилками из массивных сульфидов	2,64	0,18	0,57	27	

Примечание: * средние значения, оцененные на основе процентного содержания обломков из таблицы 1 и значений физических свойств каждой породы, приведенных в таблице 2.
 ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
 Note: * Average values estimated from the percentage of clasts in Table 1 and the physical property values of each rock type given in Table 2.
 ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

что обусловлено присутствием тяжелых рудных минералов пирита, галенита и сфалерита.

Магнитная восприимчивость отражает четкую нисходящую тенденцию: от значений, соответствующих неизменным брекчиям, $2,15 \times 10^{-3}$ СИ, которые прогрессивно снижаются при пропилитовом метасоматозе до $1,62 \times 10^{-3}$ СИ, далее до $0,89 \times 10^{-3}$ СИ при кварц-серицитовом изменении, достигая минимальных значений при као-

линит-алунитовом метасоматозе $0,25 \times 10^{-3}$ СИ и в брекчиях с сульфидами, $(0,18-0,25) \times 10^{-3}$ СИ.

Удельное электрическое сопротивление брекчий имеет различные значения. У неизменного типа наблюдаются высокие средние значения $1,00 \times 10^6$ Ом·м, которые снижаются для пропилитов и кварц-серицитовых метасоматитов до $0,57 \times 10^6$ и $0,63 \times 10^6$ Ом·м соответственно. Брекчии, подверженные каолинит-алунитовым

Таблица 4. Коэффициент корреляции Пирсона физических свойств брекчий
Table 4. Pearson correlation coefficient of physical properties of breccias

	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество проб
ρ , г/см ³	1,00	-0,63	-0,33	61
χ , СИ, $\times 10^{-3}$	-0,63	1,00	-0,48	79
ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	-0,33	-0,48	1,00	54

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

Таблица 5. Средние значения плотности, магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления кварц-полевошпатового риолитового порфира в зависимости от типа метасоматизма и наличия рудных минералов
Table 5. Average values of density, magnetic susceptibility, and electrical resistivity of quartz-feldspar riolitic porphyry according to the type of metasomatism and presence of ore minerals

Код	Тип	ρ , г/см ³	χ , СИ $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м $\times 10^6$	Количество образцов	
1	Не измененная	2,47	4,94	1,08	5	
2	Метасоматизм	Пропилит	2,45	0,68	0,25	7
3		Кварц-серицитовые	2,42	0,11	2,00	11
4		Каолинит-алунитовые	2,52	0,05	0,35	8
5.3		С сульфидами в прожилках (рассеянные)	2,49	0,12	0,01	7

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

изменениям, демонстрируют увеличение сопротивления до $1,16 \times 10^6$ Ом·м. Брекчии с сульфидами обладают самым низким сопротивлением, $0,57 \times 10^6$ Ом·м, что обеспечивает уникальные характеристики, связанные с обогащенной золотом зоной. Рассчитаны коэффициенты корреляции Пирсона разных физических свойств брекчий (табл. 4).

Корреляция между плотностью и магнитной восприимчивостью брекчий является средней или отрицательной, $r = -0,63$, что интерпретируется как общая тенденция к уменьшению магнитной восприимчивости при увеличении плотности. Корреляция между магнитной восприимчивостью и удельным сопротивлением является отрицательной, $r = -0,48$, вероятно, вследствие варибельности значений удельного электрического сопротивления, как и корреляция между плотностью и удельным сопротивлением, которая является отрицательной, $r = -0,33$, демонстрируя слабую корреляционную зависимость.

Поскольку, как правило, в брекчиях преобладают кварц-полевошпатовые риолитовые порфиры, целесообразно рассмотреть вариации изменений их физических свойств. Они варьируют в зависимости

от степени их метасоматического изменения и присутствия рудных минералов (табл. 5).

Плотность варьирует в диапазоне от 2,42 до 2,52 г/см³. При пропилитовом метасоматозе среднее значение составляет 2,45 г/см³, которое незначительно снижается до 2,42 г/см³ при кварц-серицитовом изменении, а затем возрастает до 2,52 г/см³ для каолинит-алунитового метасоматоза.

Магнитная восприимчивость отражает нисходящую тенденцию: от очень высоких значений, соответствующих неизменным образцам $4,94 \times 10^{-3}$ СИ, которые резко снижаются в пропилитах до $0,68 \times 10^{-3}$ СИ, далее до $0,11 \times 10^{-3}$ СИ в кварц-серицитовых метасоматитах, достигая минимальных значений в породах, охваченных каолинит-алуниновым изменением $0,05 \times 10^{-3}$ СИ. В образцах с сульфидами наблюдается незначительное увеличение до $0,12 \times 10^{-3}$ СИ.

Удельное электрическое сопротивление демонстрирует сложную и контрастную картину в диапазоне от $0,01 \times 10^6$ до $2,00 \times 10^6$ Ом·м. В неизменных образцах средние значения высокие, $1,08 \times 10^6$ Ом·м, которые снижаются при пропилитах до $0,25 \times 10^6$ Ом·м.

Таблица 6. Коэффициент корреляции Пирсона физических свойств кварц-полевошпатового риолитового порфира

Table 6. Pearson correlation coefficient of the physical properties of quartz-feldspar riolitic porphyry

	ρ , г/см ³	χ , СИ, $\times 10^{-3}$	ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	Количество проб
ρ , г/см ³	1,00	-0,09	-0,71	19
χ , СИ, $\times 10^{-3}$	-0,09	1,00	0,20	32
ρ_e , Ом·м, $\times 10^6$	-0,71	0,20	1,00	28

Примечание: ρ — плотность; χ — магнитная восприимчивость; ρ_e — электрическое сопротивление.
 Note: ρ — density; χ — magnetic susceptibility; ρ_e — electrical resistivity.

В кварц-серицитовых метасоматитах сопротивление возрастает до $2,00 \times 10^6$ Ом·м, а в образцах с каолинит-алунитовыми изменениями вновь снижается до $0,35 \times 10^6$ Ом·м. Образцы с сульфидами обладают самым низким сопротивлением, $0,01 \times 10^6$ Ом·м, создавая электрический контраст.

Коэффициенты корреляции Пирсона для значений физических свойств, различно измененных кварц-полевошпатовых риолитовых порфиров представлены в таблице 6.

Корреляции между плотностью и магнитной восприимчивостью практически нет, $r = -0,09$. Практически то же надо отметить для корреляции между магнитной восприимчивостью и удельным электрическим сопротивлением, $r = 0,20$. Однако коэффициент корреляции между плотностью и удельным электрическим сопротивлением является сильной отрицательной, $r = -0,71$, что интерпретируется как связь между увеличением плотности и уменьшением сопротивления.

Распределение метасоматитов и руд с различными физическими свойствами проанализировано в плане и по рельефу участка месторождения Тунанца (рис. 2).

Пространственный анализ выполнен с использованием метода кригинга в геоинформационной среде QGIS. Анализ пространственного распределения плотности показывает прогрессивное увеличение значений в рудной зоне, где величина достигает диапазона между 2,60 и 2,70 г/см³. На разрезе наблюдается пик значений, связанный с массовым присутствием сульфидов. В отличие от этого, в зонах, наиболее удалённых от рудного тела, соответствующих периферийным участкам и пропилитам, плотность значительно ниже в диапазоне 2,40–2,45 г/см³. Отсутствие прямой связи между вариациями значений плотности и границей между пропилитовой и кварц-серицитовой зонами позволяет предположить, что этот переход может быть размытым и постепенным. Данная особенность указывает на то, что изменения значений плотности в меньшей

степени связаны с конкретным типом метасоматоза и в большей — с присутствием рудных минералов, которое не ограничивается разными метасоматитами.

Анализ пространственного распределения значений магнитной восприимчивости показывает значительное снижение в рудных зонах с величинами от 0,00 до $0,25 \times 10^{-3}$ СИ, что проявляется как отрицательная аномалия на разрезе, эквивалентная магнитной аномалии, связанной с рудной зоной, лишённой ферромагнитных минералов. Значения прогрессивно увеличиваются в направлении к внешним частям кварц-серицитовой метасоматической зоны, достигая $2,00 \times 10^{-3}$ СИ. Этот рост продолжается и сохраняется в диапазоне $(2-4) \times 10^{-3}$ СИ в зоне пропилитов. Аномальные зоны со значениями выше 4×10^{-3} СИ связаны с присутствием базальтовых даек и блоков кварц-полевошпатового риолитового порфира. Выявленная закономерность демонстрирует связь между типом метасоматоза и магнитной восприимчивостью, указывая, что магнитная восприимчивость является хорошим маркером для поиска минерализованных зон и околорудных метасоматических ореолов.

Анализ пространственного распределения удельного электрического сопротивления показывает сложное пространственное зонирование. В области рудного тела значения находятся в диапазоне $(0,50-0,75) \times 10^6$ Ом·м. Они формируют поверхность, простирающуюся до определённых участков за пределами границы кварц-серицитовой зоны. Далее значения снижаются ниже $<0,50 \times 10^6$ Ом·м в пропилитовой зоне и западной части кварц-серицитовой зоны, после чего на внешних участках постепенно возрастают, достигая диапазона $(2,00-3,00) \times 10^6$ Ом·м в областях, наиболее удалённых от рудного тела. Такое сочетание значений проявляется на разрезе, построенном по результатам анализа, в виде пологого поднятия, соответствующего рудной зоне, что предполагает наличие неконтрастной аномалии в ореоле пониженного сопротивления.

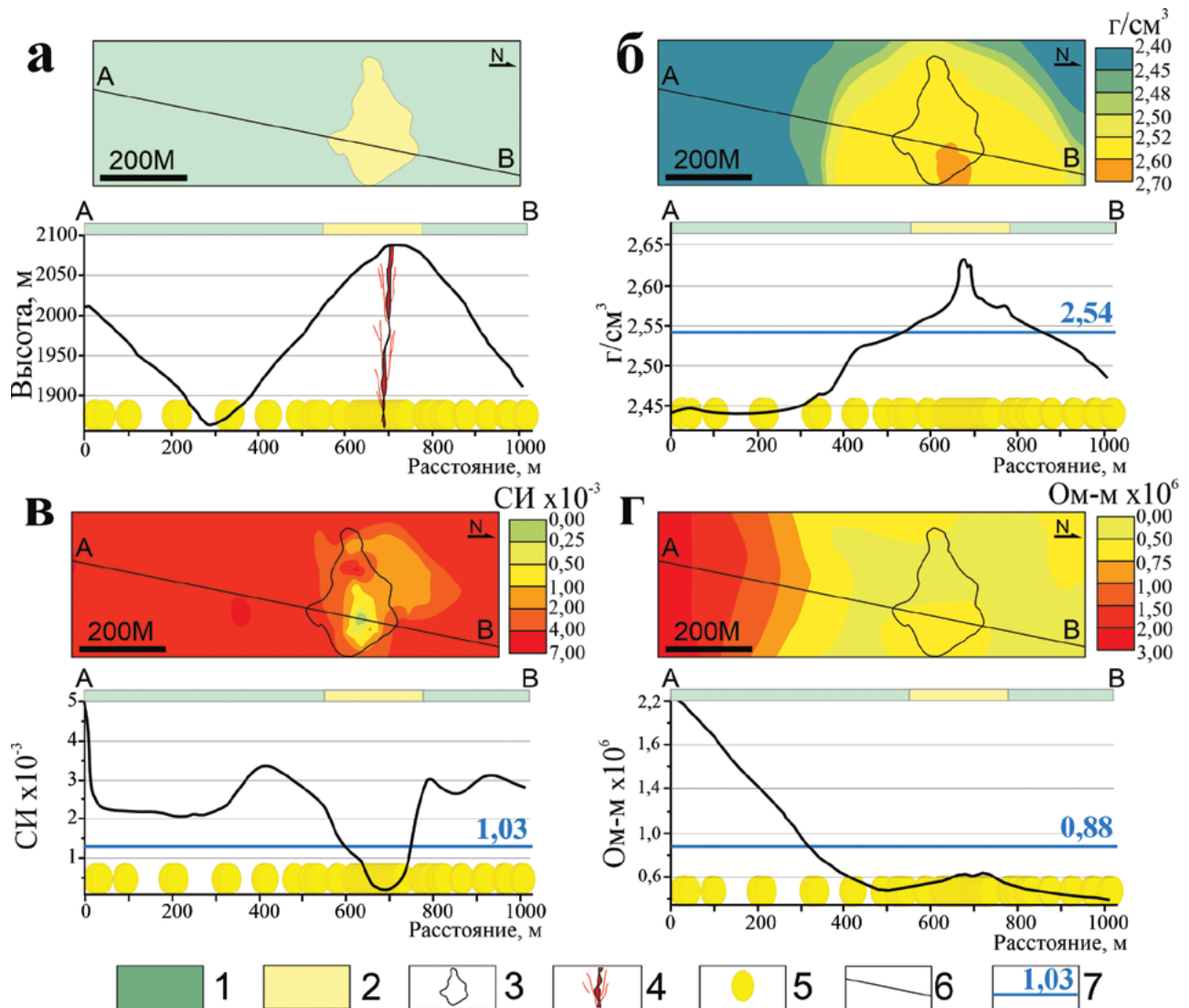


Рис. 2. Распределение в плане метасоматитов и руд с разными физическими свойствами и в элементах рельефа участка месторождения Тунанца: а — распространение метасоматитов, рельеф и положение рудного тела; б — плотность; в — магнитная восприимчивость; г — удельное электрическое сопротивление. 1–2 — метасоматиты: 1 — пропилиты; 2 — кварц-серцитовые; 3 — граница кварц-серцитовых метасоматитов; 4 — круто падающее рудное тело; 5 — точки отбора проб, спроектированные на горизонтальную плоскость; 6 — линия разреза; 7 — среднее значение

Fig. 2. Interpolation models of the physical properties of rocks from the Tunantza deposit: а — metasomatites distribution, topography, and ore body location; б — density; в — magnetic susceptibility; г — electrical resistivity. 1–2 — Metasomatites: 1 — propylitic; 2 — quartz-sericitic; 3 — quartz-sericite metasomatite boundary; 4 — ore; 5 — sampling point projected onto the horizontal plane; 6 — cross-section line; 7 — mean value

Обсуждение результатов

Определение физических свойств неизмененных пород, метасоматитов и руд, их пространственное распределение относительно рудного тела позволило установить определенные закономерности на месторождении золота Тунанца.

Для каждого типа породы определены базовые значения физических свойств, отражающие неоднородность плотности, ключевые особенности магнитной восприимчивости: высокие значения у базальта, средние — у кварц-полевошпатового риолитового порфира и гранодиорита, а также низкое удельное сопротивление руд.

Установлено значительное влияние на изменения физических свойств метасоматических изменений и количества рудных минералов в рудовмещающих фреатомагматических брекчиях (см. табл. 3) и рiolитового порфира (см. табл. 5). Плотность увеличивается, в то время как магнитная восприимчивость имеет тенденцию к снижению от пропицитов через кварц-серцитовые метасоматиты к рудному телу. Удельное электрическое сопротивление демонстрирует сложные вариации. Коэффициенты корреляции Пирсона (табл. 4, 6) показывают взаимосвязи: для брекчий плотность и магнитная восприимчивость имеют умеренную отрицательную корреляцию ($r = -0,63$), тогда как для порфира между плотностью и удельным электрическим сопротивлением наблюдается сильная отрицательная корреляция ($r = -0,71$). Это предполагает различные рудоконтролирующие признаки. В брекчиях присутствие рудных сульфидов ассоциировано с увеличением плотности, что совпадает со снижением магнитной восприимчивости, и, вероятно, является результатом метасоматического замещения ферромагнитных минералов, таких как магнетит, присутствующий в обломках брекчий, возможно, на пирит или сидерит [13, 18]. Напротив, в порфире увеличение плотности, связанное с присутствием рудных сульфидов, коррелирует со снижением удельного сопротивления, а не с магнитной восприимчивостью, возможно, из-за того, что в этом типе породы не наблюдалось присутствия магнетита в метасоматитах.

Анализ площадного распределения метасоматитов и руд с разными физическими свойствами позволил установить, что рудное тело идентифицируется как аномалия высокой плотности, низкой магнитной восприимчивости и низкого-умеренного удельного электрического сопротивления, окружённая зоной меньшей плотности, большей магнитной восприимчивости и меньшего удельного сопротивления, образующей проводящее

кольцо. Периферийная пропилитовая зона характеризуется низкой плотностью, высокой магнитной восприимчивостью и удельным электрическим сопротивлением, которое возрастает в направлении более удалённых от руды участков. Эти особенности позволяют определить ключевые поисковые признаки для золоторудных минеральных систем, аналогичных месторождению Тунанца.

Выводы

Определены физические свойства различных типов пород, метасоматитов и руд месторождения золота Тунанца. Установлено влияние метасоматических процессов и характера рудной минерализации на изменения этих параметров. Отчетливо проявлена зональность с ростом интенсивности процессов гидротермального изменения от периферийных участков с пропилитами к центральной части рудного тела. Соответственно установлен систематический рост плотности и резкое снижение магнитной восприимчивости. Это изменение связано с метасоматическим замещением первичных ферромагнитных минералов (магнетита в базальтах и обломках брекчий) сульфидами и карбонатами (пирит, сидерит) в сильно минерализованных и обогащенных золотом зонах.

Результаты пространственного анализа распределения физических параметров подтверждают пространственно-зональную корреляцию физических свойств с зонами интенсивного развития метасоматоза и оруденения. Рудная зона выражена аномалией высокой плотности, низкой магнитной восприимчивости и низкого удельного сопротивления, окружённая проводящим ореолом пониженного сопротивления, который, в свою очередь, обрамлён внешним ореолом низкой плотности, высокой магнитной восприимчивости и высокого удельного электрического сопротивления, соответствующим пропилитовой зоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Кривцов А.И.* Прикладная металлогения. М.: Недра, 1989. 288 с.
2. *Медина Х.П., Игнатов П.А.* Золоторудное месторождение Тунанца в трубке взрыва (Кордильера-Дель-Кондор, юго-восток Эквадора) и вопросы классификации подобных объектов. Вестник геонаук. 2025. № 11. С. 20–25. DOI: 10.19110/geov.2025.11.2
3. *Медина Х.П., Игнатов П.А.* Фреатомагматические брекчие месторождения Au-Ag Тунанца-Эквадор, изменения физических свойств. Актуальные проблемы недропользования. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 2025. С. 317–319.
4. *Медина Х.П., Игнатов П.А., Викентьев И.В.* Рудносные брекчие эпитеpmального золоторудного месторождения Тунанца, Кордильера-Дель-Кондор, Эквадор. Геология рудных месторождений. 2026. Т. 67. № 43. С. 1–15.
5. *Нарсеев В.А.* Промышленная геология золота. М.: Научный мир, 1996. 243 с.
6. *Abubakar F., Ahmed B., Rabi u I., Alao J., Abir I., Umaru A., Sadiq F., Isiaka A., Olayinka L., Usman J., Ochu G., Abdulmalik D.* Integrated geophysical

- evaluation of potential gold mineralisation within Nigerian Yashi Sheet 56 (1:100, 000). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2025. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.pce.2025.103986
7. *Blackwell J.L., Cooke D.R., McPhie J., Simpson K.A.* Lithofacies Associations and Evolution of the Volcanic Host Succession to the Minifie Ore Zone: Ladolam Gold Deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. *Economic Geology*. 2014. Vol. 109. P. 1137–1160. DOI: 10.2113/econgeo.109.4.1137
 8. *Cardenas A.* Fundamentos teoricos y su aplicacion en los metodos de potencial geomagnetico y gravimetrico. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia, 2014. 190 p.
 9. *Clark D.A.* Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics*. 2014. Vol. 624–625. P. 46–65. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.011
 10. *Corbett G.* Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration — short course manual. Greg Corbett Geological Services Pty Ltd. 2017. URL: www.corbett-geology.com (дата обращения: 10.05.2025).
 11. *Drobe J., Lindsay D., Stein H., Gabites J.* Geology, Mineralization, and Geochronological Constraints of the Mirador Cu-Au Porphyry District, Southeast Ecuador. *Economic Geology*. 2013. Vol. 108. P. 11–35. DOI: 10.2113/econgeo.108.1.11
 12. *Figueroa A.J., Gabo-Ratio J.A., Manalo P.C., Takahashi R., Sato H., Ramos A.B.* Breccia and vein mineralization of the Balatoc Diatreme, Acupan gold deposit, Baguio Mineral District: An example of a diatreme-hosted epithermal deposit in the Philippines. *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 144. P. 15. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104826
 13. *Geymond U., Truche L., Sissmann O., Kubaniova D., Recham N., Martinez I.* Mineralogical changes and H₂ generation yield during hydrothermal alteration of a magnetite-siderite assemblage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2025. Vol. 130. P. 17. DOI: 10.1029/2024JB030724
 14. *Gobashy M., Mekkawi M., Araffa S., Ezz Eldin M., Khalil M.* Magnetic Signature of Gold Deposits: Example from Um Garayat Region, South Eastern Desert, Egypt. *Pure Appl. Geophys.* 2023. Vol. 180. P. 1053–1080. DOI: 10.1007/s00024-023-03228-8
 15. *INIGEMM.* Hoja geologica Zamora — Republica del Ecuador. Hoja 77, escala 1:100 000. Quito: Instituto Nacional de Investigacion Geologica Minero Metalurgico del Ecuador, 2017. 1 p.
 16. *Kadel-Harder I.M., Spry P.G., Dan Layton-Matthews, Voinot A., Von der Handt A., McCombs A.L.* Paragenetic relationships between low- and high-grade gold mineralization in the Cripple Creek Au-Te deposit, Colorado: Trace element studies of pyrite. *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 127. 103847. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103847
 17. *Leary S., Sillitoe R., Stewart P., Roa K., Nicolson B.* Discovery, Geology, and Origin of the Fruta del Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Southeastern Ecuador. *Economic Geology*. 2016. Vol. 111. P. 1043–1072. DOI: 10.2113/econgeo.111.5.1043
 18. *Qian G., Pring A., Brugger J., Skinner W., Chen G.* Replacement of magnetite by pyrite under hydrothermal conditions. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009. Vol. 101. P. 83. DOI: 10.1016/j.jexplo.2008.12.012
 19. *Sillitoe R.* Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*. 1985. Vol. 80. P. 1467–1514. DOI: 10.2113/gsecongeo.80.6.1467
 20. *Sillitoe R., Hedenquist J.W.* Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. Special Publication: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth, Stuart F. Simmons, Ian Graham. 2003. Vol. 10. P. 1–50. DOI: 10.5382/SP.10.16
 21. *Villatoro M., Henriquez C., Sancho F.* Comparacion de los interpoladores IDW y Kriging en la variacion espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agronomia Costarricense*. 2008. Vol. 32. P. 95–105. DOI: 10.15517/rac.v32i1.6773

REFERENCES

1. *Krivtsov A.I.* Applied Metallogeny. Moscow: Subsoil, 1989. 288 p. (In Russ.).
2. *Medina J.P., Ignatov P.A.* Tunantza breccia-pipe hosted gold deposit (Cordillera Del Condor, southeastern Ecuador) and issues of classification of similar deposits. *Bulletin of Geosciences*. 2025. No. 11. P. 20–25 (In Russ.). DOI: 10.19110/geov.2025.11.2
3. *Medina J.P., Ignatov P.A.* Phreatomagmatic breccias of the Au-Ag Tunantsa deposit, Ecuador, changes in physical properties. *Current problems of subsoil use*. Saint Petersburg: Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, 2025. P. 317–319 (In Russ.).
4. *Medina J.P., Ignatov P.A., Vikentyev I.V.* Ore-bearing breccias of the epithermal Tunantza gold deposit, Cordillera del Condor, southeastern Ecuador. *Geology of Ore Deposits*. 2026. Vol. 67. No. 43. P. 1–15 (In Russ.).
5. *Narseev V.A.* Industrial geology of gold. Moscow: Scientific world, 1996. 243 p. (In Russ.).
6. *Abubakar F., Ahmed B., Rabiu I., Alao J., Abir I., Umaru A., Sadiq F., Isiaka A., Olayinka L., Usman J., Ochu G., Abdulmalik D.* Integrated geophysical evaluation of potential gold mineralisation within Nigerian Yashi Sheet 56 (1:100, 000). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2025. Vol. 140. DOI: 10.1016/j.pce.2025.103986
7. *Blackwell J.L., Cooke D.R., McPhie J., Simpson K.A.* Lithofacies Associations and Evolution of the Volcanic Host Succession to the Minifie Ore Zone: Ladolam Gold Deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. *Economic Geology*. 2014. Vol. 109. P. 1137–1160. DOI: 10.2113/econgeo.109.4.1137

8. *Cardenas A.* Fundamentos teoricos y su aplicacion en los metodos de potencial geomagnetico y gravimetrico. Bogota: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Colombia, 2014. 190 p.
9. *Clark D.A.* Magnetic effects of hydrothermal alteration in porphyry copper and iron-oxide copper-gold systems: A review. *Tectonophysics*. 2014. Vol. 624–625. P. 46–65. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.12.011
10. *Corbett G.* Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration — short course manual. Greg Corbett Geological Services Pty Ltd. 2017. URL: www.corbett-geology.com (дата обращения: 10.05.2025).
11. *Drobe J., Lindsay D., Stein H., Gabites J.* Geology, Mineralization, and Geochronological Constraints of the Mirador Cu-Au Porphyry District, Southeast Ecuador. *Economic Geology*. 2013. Vol. 108. P. 11–35. DOI: 10.2113/econgeo.108.1.11
12. *Figuerola A.J., Gabo-Ratio J.A., Manalo P.C., Takahashi R., Sato H., Ramos A.B.* Breccia and vein mineralization of the Balatoc Diatreme, Acupan gold deposit, Baguio Mineral District: An example of a diatreme-hosted epithermal deposit in the Philippines. *Ore Geology Reviews*. 2022. Vol. 144. P. 15. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104826
13. *Geymond U., Truche L., Sissmann O., Kubaniova D., Recham N., Martinez I.* Mineralogical changes and H₂ generation yield during hydrothermal alteration of a magnetite-siderite assemblage. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2025. Vol. 130. P. 17. DOI: 10.1029/2024JB030724
14. *Gobashy M., Mekkawi M., Araffa S., Ezz Eldin M., Khalil M.* Magnetic Signature of Gold Deposits: Example from Um Garayat Region, South Eastern Desert, Egypt. *Pure Appl. Geophys.* 2023. Vol. 180. P. 1053–1080. DOI: 10.1007/s00024-023-03228-8
15. *INIGEMM.* Hoja geologica Zamora — Republica del Ecuador. Hoja 77, escala 1:100 000. Quito: Instituto Nacional de Investigacion Geologica Minero Metalurgico del Ecuador, 2017. 1 p.
16. *Kadel-Harder I.M., Spry P.G., Dan Layton-Matthews, Voinot A., Von der Handt A., McCombs A.L.* Paragenetic relationships between low- and high-grade gold mineralization in the Cripple Creek Au-Te deposit, Colorado: Trace element studies of pyrite. *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 127. 103847. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103847
17. *Leary S., Sillitoe R., Stewart P., Roa K., Nicolson B.* Discovery, Geology, and Origin of the Fruta del Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Southeastern Ecuador. *Economic Geology*. 2016. Vol. 111. P. 1043–1072. DOI: 10.2113/econgeo.111.5.1043
18. *Qian G., Pring A., Brugger J., Skinner W., Chen G.* Replacement of magnetite by pyrite under hydrothermal conditions. *Journal of Geochemical Exploration*. 2009. Vol. 101. P. 83. DOI: 10.1016/j.gexplo.2008.12.012
19. *Sillitoe R.* Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*. 1985. Vol. 80. P. 1467–1514. DOI: 10.2113/gsecongeo.80.6.1467
20. *Sillitoe R., Hedenquist J.W.* Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. Special Publication: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth, Stuart F. Simmons, Ian Graham. 2003. Vol. 10. P. 1–50. DOI: 10.5382/SP.10.16
21. *Villatoro M., Henriquez C., Sancho F.* Comparacion de los interpoladores IDW y Kriging en la variacion espacial de pH, CA, CICE y P del suelo. *Agro-nomia Costarricense*. 2008. Vol. 32. P. 95–105. DOI: 10.15517/rac.v32i1.6773

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Медина Х.П. — внес вклад в разработку концепции статьи, проводил полевые работы, подготовил текст статьи, проводил анализ результатов, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Игнатов П.А. — разработал концепцию, методологию, проведение исследования, провел редактирование рукописи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Иванов А.А. — внес вклад в разработку концепции статьи, методологию, подготовил текст статьи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Викентьев И.В. — внес вклад в разработку концепции статьи, методологию, подготовил текст статьи, утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Juan P. Medina — contributed to the development of the article concept, carried out fieldwork, prepared the text of the article, analyzed the results, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Petr A. Ignatov — development of the concept, methodology, research, edited the manuscript, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Andrey A. Ivanov — contributed to the development of the article concept, methodology, prepared the text of the article, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Ilya V. Vikentyev — contributed to the development of the article concept, methodology, prepared the text of the article, approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Медина Хименес Хуан Пабло — магистр геологии, аспирант кафедры геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: juanmedinageologia@gmail.com

тел.: +7 (977) 194-02-24

SPIN-код: 8281-6107

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6231-0888>

Juan Pablo Medina Jimenez* — Master's degree in Geology, postgraduate student at the Department of Geology of Mineral Deposits Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: juanmedinageologia@gmail.com

tel.: +7 (977) 194-02-24

SPIN-code: 8281-6107

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6231-0888>

Игнатов Петр Алексеевич — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой геологии месторождений полезных ископаемых ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: ignatovpa@mgri.ru

SPIN-код: 7893-1477

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

Petr A. Ignatov — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Department of Geology of Mineral Deposits at the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: ignatovpa@mgri.ru

SPIN-code: 7893-1477

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7956-580X>

Иванов Андрей Александрович — кандидат геолого-минералогических наук, декан геофизического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: ivanov_off@mail.ru

SPIN-код: 9977-2363

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5294-8878>

Andrey A. Ivanov — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Dean of the Faculty of Geophysics at the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: ivanov_off@mail.ru

SPIN-code: 9977-2363

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5294-8878>

Викентьев Илья Владимирович — доктор геолого-минералогических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук — ИГЕМ РАН.

35, Старомонетный пер., г. Москва 119017, Россия

e-mail: viken@igem.ru

SPIN-код: 2456-3030

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9133-7562>

Ilya V. Vikentyev — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher at Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences — IГЕМ RAS.

35, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia

e-mail: viken@igem.ru

SPIN-code: 2456-3030

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9133-7562>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ОРИГИНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 553.8+549.755.131(575.3)

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-63-78>EDN: [GXXUZU](https://www.edn.ru/GXXUZU)

МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ ЮРСКИХ ПОРОД ФАН-ЯГНОБСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ТАДЖИКИСТАН

М. САЙМУДАСИРИ*, А.К. ЛИТВИНЕНКО*ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия***АННОТАЦИЯ**

Введение. Фан-Ягнобская синеклиза является наложенной структурой в составе герцинской Зеравшано-Гиссарской зоны. Она сформировалась на палеозойском складчатом основании в виде толщи осадочных пород от T_3 по N_1 , включая юрские, меловые и палеогеновые терригенные комплексы общей мощностью ~ 2,7 км. Из полезных ископаемых в ее составе известно крупное месторождение каменного угля, одноименное с названием синеклизы. В палеозойском обрамлении вблизи нее находятся два месторождения: на севере — вольфрамовое Такфон с повышенными содержаниями Sn, As, Bi, Cu, Ag, Au и на юге — сурьмяное Джижикрут с Au, Ag, Hg, Tl, Se, Pb, Bi, Sn.

Геологи, проводившие поисковые работы в границах Зеравшано-Гиссарской зоны Центрального Таджикистана, считали Фан-Ягнобскую синеклизу безрудной, бесперспективной на обнаружение в ней рудной минерализации. Это мнение аргументировалось отсутствием в ее контурах проявления магматизма и гидротермальных процессов. Проведенное нами в 2024 году опробование юрской терригенной толщи и исследование ее геохимических и минералогических особенностей ставит под сомнение утвердившееся представление об отсутствии рудной минерализации в границах синеклизы.

Наши поисковые работы проводились на водоразделе рек Ягноб — Фандарья, на горе Кухи-Малик, выше выходов газов от горения каменного угля. Здесь была опробована пачка юрских песчаников мощностью 800 м. Пробы отбирались по всем литологическим разновидностям терригенных пород.

Цель: определение перспектив металлоносности юрских терригенных пород Фан-Ягнобской синеклизы.

Объектом исследования служат осадочные, обломочные породы юрской системы Фан-Ягнобской синеклизы.

Материалы и методы исследования. По наиболее полному разрезу юрской системы, расположенному на водоразделе рек Ягноб — Фандарья, из всех разновидностей пород было отобрано 26 штучных проб массой по 1,5 кг. Из них были изготовлены прозрачно-полированные шлифы, протоочки и геохимические пробы. Анализы проводились портативным РФА-спектрометром Vanta-M (Olympus, США); анод трубки: Rh, мощность трубки 4 Вт, напряжение 50 кВ, детектор SSD. Изучение состава зерен минералов тяжелой фракции и их полуколичественные анализы проводились на электронном сканирующем микроскопе JSM-840 фирмы JEOL с Si(Li)-полупроводниковым детектором и системой анализа INCA-350 фирмы Oxford Instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе пучка 2 нА. Определение элементного состава горных пород проводилось методами эмиссионной спектроскопии и масс-спектропии на спектрометрах с индуктивно связанной плазмой. Для проведения исследований пробы были разделены на 2 типа: легко- и трудноразлагаемые. Первые были растворены в Hot Block, вторые — переведены в раствор той же смесью кислот в автоклавах в микроволновой печи MARS-5. Измерение концентраций элементов проводилось на спектрометре ICP-OES VARIAN-720 и масс-спектрометре HP 4500-й серии. В качестве стандартов использовались мультиэлементные стандарты фирм MERCK и SPECS. Все аналитические работы были проведены в Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана РАН (аналитики Л.А. Паутов и М. Саймудасири) и в лаборатории РГГРУ-МГРИ им. Серго Орджоникидзе (аналитик М. Саймудасири).

Результаты. В терригенных породах юрской системы по линии профиля длиной 800 м установлены anomalно высокие содержания следующих металлов: V, Zn, Se, As, Co, Eu, Se, Sb, Sm, Cd и Ag, в три и более раз выше кларка. По линии геохимического профиля были диагностированы

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

рудные минералы, содержащие вышеупомянутые элементы: антимонит, галенит, аргентит, самородное золото и серебро, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), флоренситом-(Ce), а также неопределенные фазы, состоящие из Se, Ta, Ni, Mo, Bi, Tl, Pb, Ge, F, Sn и W.

Закключение. Установление в юрской терригенной толще мощностью 800 м на значительных интервалах (многие десятки метров) рудных минералов Ag, Pb, Sb, Sn, W, Au в составе геохимической аномалии V, Co, Zn, Ge, As, Sc, Ag, Cd, Sb, Ce, Sm, Eu может быть квалифицировано как возможное рудопроявление. Это ставит задачу по постановке поисковых работ всей юрской толщи, где могут быть обнаружены древние россыпи многих металлов. Выявленные рудные минералы имеют незначительные размеры, меньше 40 микрон, и поэтому ранее не были обнаружены. Приведенные результаты позволяют поставить вопрос о потенциальной металлоносности Фан-Ягнобской и, возможно, других мезозойских синеклиз Центрального Таджикистана.

Ключевые слова: Центральный Таджикистан, Фан-Ягнобская синеклиза, юрские терригенные породы, геохимическая аномалия: V, Zn, Ce, As, Co, Eu, Se, Sb, Sm, Cd и Ag, антимонит, галенит, аргентит, самородное золото и серебро, монацит-(Ce), ксенотим-(Y), флоренсит-(Ce), неопределенные фазы Se, Ta, Ni, Mo, Bi, W, Sn, Sb, Tl, Pb, Ge, F

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности: авторы благодарят за помощь в проведении полевых работ, лабораторном изучении образцов и полезные советы Л.А. Паутова, В.Ю. Карпенко (Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН); П. Аминзода, М.Л. Лоикзода, М.А. Миракова, М.А. Шодибекова и А.А. Джобирова (Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАН Таджикистана); Д.А. Петроченкова, А.А. Скрипка и А.П. Алёшина (Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе).

Для цитирования: Саймудасири М., Литвиненко А.К. Металлоносность юрских пород Фан-Ягнобской синеклизы, Центральный Таджикистан. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2026;68(1):63—78. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-63-78> EDN: [GXXUZU](https://gxxuzu.com)

Статья поступила в редакцию 09.02.2026

Принята к публикации 22.04.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

METALLIFEROUS JURASSIC ROCKS OF THE FAN-YAGNOB SYNECLISE (CENTRAL TAJIKISTAN)

MAHMADSHARIF SAYMUDASIRI*, ANDREY K. LITVINENKO

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23 Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russian Federation*

ABSTRACT

Background. The Fan-Yagnob syncline is an imposed structure within the Hercynian Zeravshan-Gissar zone. It formed on a Paleozoic folded basement as series of sedimentary rocks from T3 to N1, including Jurassic, Cretaceous, and Paleogene terrigenous complexes with a total thickness of ~ 2.7 km. The syncline hosts the Fan-Yagnob coal-mining field. In the vicinity, there are two deposits within the Paleozoic frame: the Takfon tungsten deposit with high concentrations of Sn, As, Bi, Cu, Ag, Au in the north and the Dzhizhikrut antimony deposit with Au, Ag, Hg, Tl, Se, Pb, Bi, Sn in the south. Previous geological prospecting within the Zeravshan-Gissar zone of Central Tajikistan indicated that the Fan-Yagnob syncline had limited potential for ore mineralization. This conclusion was based on the absence of magmatism and hydrothermal processes in its contours. In 2024, we carried out a study of the Jurassic terrigenous stratum, including its mineralogy and geochemistry, which calls into question the presumed absence of ore mineralization within the syncline. Exploration works were conducted along the watershed between the Yagnob and Fandarya rivers, at Mount Kuhi-Malik, above zones of gas emissions associated with known coal fires. At this site, the Jurassic sandstone sequence, with a thickness of approximately 800 m, was investigated. Samples were collected from all lithological varieties of the terrigenous rocks.

Aim. To assess the metalliferous prospects of the Jurassic terrigenous rocks of the Fan-Yagnob syncline.

Research object. The Jurassic sedimentary clastic rocks of the Fan-Yagnob syncline.

Materials and methods. From the most complete section of the Jurassic system located on the watershed of the Yagnob and Fandarya rivers, 26 specimens, each weighing 1.5 kg, were collected from all rock varieties. These specimens were used to prepare polished thin sections, polished grain mounts, and geochemical samples. Analysis was carried out using a portable X-ray fluorescence (XRF) spectrometer Vanta-M (Olympus, USA); X-ray tube anode: Rh, tube power 4 W, voltage 50 kV, SSD detector. The composition of heavy mineral grains and their semi-quantitative analysis were conducted using a JSM-840 scanning electron microscope (JEOL) equipped with a Si(Li) semiconductor detector and an INCA-350 analytical system (Oxford Instruments) at an accelerating voltage of 20 kV and a beam current of 2 nA. The elemental composition of the rocks was determined by emission spectroscopy and mass spectrometry using inductively coupled plasma (ICP) spectrometers. For analysis, the samples were divided into two types: easily and hardly decomposable. The former were dissolved using a Hot Block system, while the latter were brought into solution using the same acid mixture in microwave autoclaves (MARS-5). Element concentrations were measured using an ICP-OES VARIAN-720 spectrometer and an HP 4500 series mass spectrometer. Multi-element standards from MERCK and SPEC were used as calibration standards. All analytical work was carried out at the A.E. Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences (analysts L.A. Pautov and M. Saymudasiri) and at a laboratory of the Russian State Geological Prospecting University (MGRI-RSGPU) named after Sergo Ordzhonikidze (analyst M. Saymudasiri).

Results. In the terrigenous rocks of the Jurassic system, along an 800 m profile, anomalously high concentrations of V, Zn, Ce, As, Co, Eu, Se, Sb, Sm, Cd, and Ag were identified, exceeding Clarke values by three or more times. Along the geochemical profile, ore minerals containing the above-mentioned elements were identified, including stibnite, galena, argentite, native gold, and silver, as well as monazite-(Ce), xenotime-(Y), and florencite-(Ce). In addition, unidentified phases enriched in Se, Ta, Ni, Mo, Bi, Tl, Pb, Ge, F, Sn, and W were found.

Conclusion. The identification of Ag-, Pb-, Sb-, Sn-, W-, and Au-bearing ore minerals within Jurassic terrigenous rocks along an 800 m profile, occurring over extended intervals (tens of meters) within the geochemical anomaly characterized by V, Co, Zn, Ge, As, Sc, Ag, Cd, Sb, Ce, Sm, and Eu, suggests a possible manifestation of ore mineralization. This finding highlights the need for further investigation of the entire Mesozoic sedimentary succession of the syncline, where ancient placer-type accumulations of certain metals may be present. Most of the detected ore minerals are extremely fine-grained, typically less than 40 microns, which likely explains why they were not

identified in previous explorations. These results raise the question of the metallogenic potential of the Fan-Yagnob syncline and possibly other Mesozoic synclines in Central Tajikistan, warranting more detailed studies across the Jurassic formations.

Keywords: Central Tajikistan, Fan-Yagnob syncline, Jurassic terrigenous rocks; V, Zn, Ce, As, Co, Eu, Se, Sb, Sm, Cd, and Ag geochemical anomaly; antimonite; galena; argentite; native gold; native silver; monazite-(Ce); xenotime-(Y); florencite-(Ce); indeterminate phases of Se, Ta, Ni, Mo, Bi, W, Sn, Sb, Tl, Pb, Ge, F

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

Acknowledgements: the authors would like to thank L.A. Pautov, V. Yu. Karpenko (A.E. Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences); P. Aminzoda, M.L. Loiqzoda, M.A. Mirakov, M.A. Shodibekov, and A.A. Jobirov for their help in conducting field work, laboratory study of samples, and useful advice (Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan); D.A. Petrochenkova, A.A. Skripka and A.P. Alyoshina (Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting).

For citation: Saymudasiri M., Litvinenko A.K. Metalliferous jurassic rocks of the Fan-Yagnob syncline (Central Tajikistan). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):63—78. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-63-78> EDN: [GXXUZU](https://gxxuzu.ru)

Manuscript received 09 February 2026

Accepted 22 April 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Постановка задачи

Фан-Ягнобская синеклиза является наложенной структурой в составе герцинской Зеравшано-Гиссарской зоны. Она сформировалась на палеозойском складчатом основании в виде толщи осадочных пород от T_3 по N_1 , включая юрские, меловые и палеогеновые терригенные комплексы общей мощностью ~ 2,7 км [9]. Из полезных ископаемых в ее составе известно крупное месторождение каменного угля, одноименное с названием синеклизы. В палеозойском обрамлении вблизи нее находятся два месторождения: на севере — вольфрамное Такфон с повышенными содержаниями Sn, As, Bi, Cu, Ag, Au и на юге — сурьмяное Джижикрут с Au, Ag, Hg, Tl, Se, Pb, Bi, Sn.

Геологи, проводившие поисковые работы в границах Зеравшано-Гиссарской зоны Центрального Таджикистана, считали Фан-Ягнобскую синеклизу безрудной, бесперспективной на обнаружение в ней рудной минерализации. Это мнение аргументировалось отсутствием в ее контурах проявления магматизма и гидротермальных процессов. Проведенное нами в 2024 году опробование юрской терригенной толщи и исследование ее геохимических и минералогических особенностей

ставит под сомнение утвердившееся представление об отсутствии рудной минерализации в границах синеклизы.

Наши поисковые работы проводились на водоразделе рек Ягноб — Фандарья, на горе Кухи-Малик, выше выходов газов от горения каменного угля. Здесь была опробована пачка юрских песчаников мощностью 800 м. Пробы отбирались по всем литологическим разновидностям терригенных пород.

Геологическое положение Фан-Ягнобской синеклизы

Фан-Ягнобская синеклиза, по [12] грабен-синклиналь, располагается приблизительно в 10 км к северу от Гиссарского хребта. Ее тектоническая позиция в региональной герцинской тектонической структуре Центрального Таджикистана показана ранее [3, 12]. Для данного исследования важно отметить, что синеклиза является вторым мезо-кайнозойским структурным этажом палеозойской Зеравшано-Гиссарской зоны и как бы «наследует» ее обломочный материал, возникший в ходе герцинского орогенеза, послепалеозойской пенепленизации и прибрежно-морского седиментогенеза в мезозое.

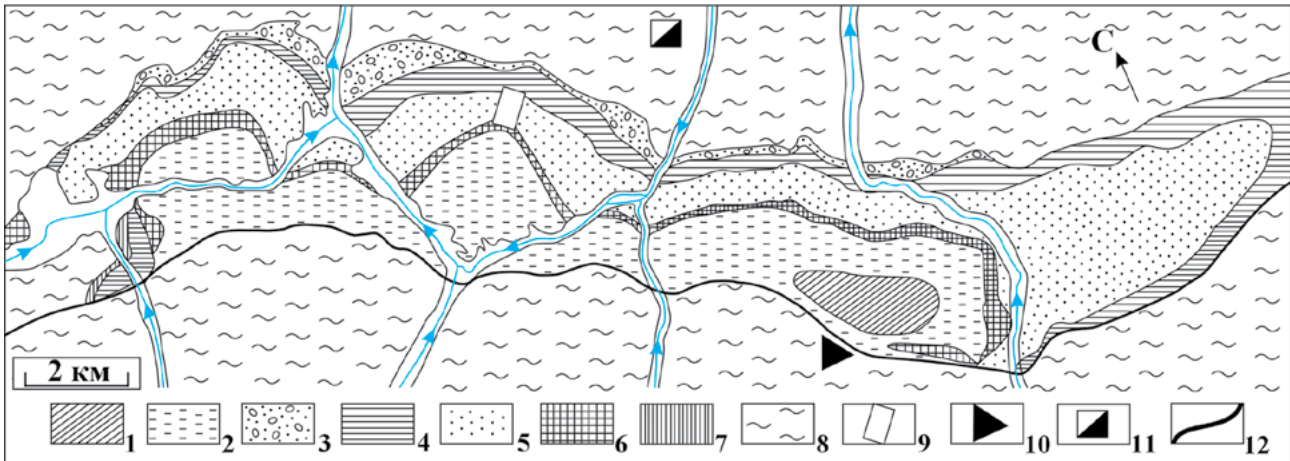


Рис. 1. Геологическая карта Фан-Ягнобской синеклизы составлена по [2] с изменениями и дополнениями авторов: 1–9 — отложения: 1 — палеоген-неогеновые, 2 — меловые, 3–6 — юрские свиты: 3 — базальная (J_1); 4 — нижняя, непродуктивная (J_1); 5 — угленосная (J_{1-2}); 6 — верхняя непродуктивная (J_2); 7 — нижнетриасовые; 8 — палеозойские, нерасчлененные; 9 — участок работ; 10–11 — месторождения: 10 — сурьмы Джижикрут, 11 — вольфрама Такфон; 12 — Пасруд-Ягнобский разлом

Fig. 1. The geological map of the Fan-Yagnob syncline was compiled according to [2] with changes and additions by the authors: 1–9 — deposits: 1 — Paleogene-Neogene, 2 — Cretaceous, 3–6 — Jurassic formations: 3 — Basal (J_1); 4 — lower, unproductive (J_1); 5 — carboniferous (J_{1-2}); 6 — Upper unproductive (J_2); 7 — Lower Triassic; 8 — Paleozoic, undifferentiated; 9 — work site; 10–11 — deposits: 10 — Jizhikrut antimony, 11 — Takfon tungsten; 12 — Pasrud-Yagnob fault

На юге синеклиза ограничена Пасруд-Ягнобским разломом от нижнесилурийских пород; на севере, северо-востоке и западе с угловым несогласием контактирует с осадочно-метаморфическими породами верхнего силура (рис. 1). Ее линейные размеры составляют 35×10 км. Она является межгорной впадиной, заложенной на палеозойском фундаменте, после палеозойского орогенеза и пенеplanation [2]. В соответствии с тектоническим районированием территории синеклизы она была расчленена на несколько блоков, разделенных разломами и, имеющих разный характер вертикальных движений [13]. Структурная ось синеклизы воздымается в западном направлении. В конце плиоцена она была смята в результате альпийской складчатости в относительно широкие субширотные складки [13]. Их протяженные крылья контрастно проявляются на фоне высоких хребтов, сложенных палеозойскими комплексами пород (рис. 2).

Для палеозойских пород Зеравшано-Гиссарской зоны Центрального Таджикистана характерно большое разнообразие видов рудных месторождений [3]. В непосредственной близости к синеклизе, вблизи ее южного контакта, расположено крупнейшее в Средней Азии месторождение сурьмы Джижикрут с высокими содержаниями Au, Ag, Hg, Tl, Se, Pb, Bi,



Рис. 2. Фрагмент мезозойской Фан-Ягнобской синеклизы. В центре можно видеть хвостохранилище месторождения сурьмы Джижикрут и грунтовую дорогу на угольную штольню; на дальнем плане, вблизи снеговой линии, проходит контакт с палеозоем

Fig. 2. Fragment of the Mesozoic Phan-Yagnob syncline. In the center, you can see the tailing dump of the Dzhizhikrut antimony deposit and the dirt road to the coal mine; in the background, near the snow line, there is contact with the Paleozoic

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

Sn (рис. 1). На северо-западе и севере, в нескольких километрах, находится группа золоторудных месторождений: Кум-Манор, Чоре и Восточная Дуоба, на северо-востоке — вольфрамовое Такфон, на юго-западе — ртутное Кончоч и золоторудное Чульбои [3].

Стратиграфия и литология пород Фан-Ягнобской синеклизы

Строение Фан-Ягнобской синеклизы определяют осадочные породы T_3 , J_{1-2} , K_{1-2} , P_{1-3} , N_1 . Они имеют лагунно-континентальное происхождение и относительно небольшую мощность ~ 2,7 км [2, 9]. Синеклиза содержит самое крупное в регионе месторождение высококачественного каменного угля [6].

Начинает разрез пород синеклизы [2, 9] поздне-триасовая толща, которая обнажается на ее западном фланге. Она с угловым и стратиграфическим несогласием залегает на известняках (S_1). Толща триаса представлена валунно-галечниковыми конгломератами, брекчиями, песчаниками и редкими углистыми сланцами, общей мощностью 270 м. На ее размытой поверхности залегают конгломераты и песчаники (J_1) до 95 м мощности, названные базальной свитой [2]. Она согласно перекрывается алевролитами, аргиллитами и песчаниками с ископаемой флорой, мощностью до 500 м (нижняя непродуктивная свита, J_1). Ее согласно перекрывает пачка аргиллитов, алевролитов, песчаников со слоями угля (Раватское месторождение) и глиежей (мелкое месторождение), мощностью до 700 м (угленосная

свита, J_{1-2}). В X веке арабский географ Ибн-Хаукаль описал «огнедышащие» горы в Согдийской области вблизи крепости Сарвода, а в 1841 г. русский горный инженер Богословский посетил долину р. Ягноб и первый отметил проявление каменного угля, его подземный пожар и кустарную добычу нашатыря, квасцов и угля [1]. Заканчивается юрская система косослоистыми песчаниками с прослоями сланцев и конгломератов, мощностью до 180 м (верхняя непродуктивная свита, J_2). С размывом и стратиграфическим несогласием на средней юре залегает меловая система, представленная двумя отделами, сложенная конгломератами, глинами, песчаниками, известняками с гипсами, общей мощностью до 1030 м. Меловая система согласно перекрывается глинами, известняками, песчаниками с крупными скоплениями фосфоритов, мощностью 420 м нерасчлененной палеогеновой системы. Завершают разрез синеклизы нерасчлененные палеоген-нижне-неогеновые отложения: конгломераты, песчаники, глины, мощностью 175 м [13].

В синеклизе отсутствуют магматические и гидротермальные породы. Геологами-поисковиками она считалась безрудным структурно-вещественным элементом Зеравшано-Гиссарской зоны.

Геохимические исследования

В породах юрской системы вкрест простираются терригенных пород нами был пройден геохимический профиль длиной около 800 м (рис. 3). Линия



Рис. 3. Угленосная юрская свита и линия профиля А–Б (длина 800 м). В контуре отмечен главный пункт выходов горячих газов Раватского пожара

Fig. 3. The coal-bearing Jurassic formation and the A–B profile line. The main outlet point of the hot gases of the Ravat fire is marked in the contour

Таблица. Содержание металлов (в г/т) в юрских терригенных породах по профилю

Номера проб	Элементы											
	V	Co	Zn	Ge	As	Se	Ag	Cd	Sb	Ce	Sm	Eu
	Кларки в песчаниках											
	30	9	40	1,4	1,2	1	0,1	0,1	0,2	35	4,2	0,8
Содержания в породах												
26	90	10	62	2,9	15,5	3,7	0,33	0,36	2,8	16	1,6	47
25	91	12	61	4	9,8	5,1	0,25	0,64	2,7	120	10	2
24	104	16	86	4,9	13,8	6,7	0,47	0,72	2,7	110	8,4	1,9
23	97	10	59	4,2	24,5	7,3	0,32	0,51	3,9	120	10	2,1
22	78	13	91	5	11,4	4,1	0,2	1,9	1,9	90	8,6	1,8
21	42	7	22	2,5	21,4	2,4	0,2	0,87	2,5	55	4	0,8
20	60	7	44	2,2	3,3	4,2		0,4	2,2	35	3	0,5
19	105	15	93	3,4	8,5	-	0,34	-	2,8	46	5,2	1
18	118	15	51	2,5	4,6	-	0,3	-	2,2	27	1	0,4
17	158	14	60	2	3,5	1,7	0,24	0,57	1	15	1,6	0,3
16	105	15	60	2,5	8,1	2,1	0,28	-	0,95	50	4,4	0,9
15	97	13	90	2,4	17,3	1,8	0,24	0,5	1,1	35	4,2	0,8
14	132	20	18	3,7	40,8	-	0,29	-	2,5	72	5,9	1,3
13	105	17	130	3,8	17	2,7	0,29	0,58	1,4	98	8,2	1,5
12	113	15	106	6	13,6	4,2	0,35	0,86	1,3	75	7,1	1,7
11	79	18	74	3	18,1	2	0,39	1,3	1,5	52	4,5	1
10	149	29	98	4,5	7,9	2,43	0,21	0,64	1,4	26	2	0,5
9	96	8	24	2,5	7,8	3,6	0,25	0,25	1,7	9	1	0,3
8	117	15	84	4,3	8,9	2,1	0,32	0,31	2,3	22	2,7	0,8
7	140	44	147	10	20,2	3	0,51	0,71	6,6	28	3	0,8
6	77	11	181	7	9,9	2	0,3	1,3	3,4	27	3	0,8
5	97	8	19	2,9	8	-	0,39	-	2,8	41	3	0,7
4	105	10	22	4,9	5	-	0,31	-	3,1	100	7,9	1,5
3	72	8	26	5,6	8,3	2,2	0,34	0,47	2,7	54	3,9	0,9
2	76	11	87	10	24	1,6	0,28	0,39	4,8	51	5,4	1,2
1	39	14	150	8,1	12,8	1,6	1,1	0,45	2	26	2,5	0,7

Примечание. «-» содержание ниже кларка.

Note. «-» the content is below Clark.

профиля проведена в 150 метрах гипсометрически выше Раватского пожара. Окраска пород меняется от светлых до коричневых, они слабо полосчатые, с трещинами кливажа и углефицированными отпечатками растений; структура — от крипто- до мелкозернистой. В шлифах идентифицируются алевролиты и мелкозернистые песчаники. В них доминируют обломки кварца и слабопелитизированного полевого шпата. Реже наблюдаются хорошо окатанные рудные обломки в 2–3 раза меньше размером породообразующих минералов. Рудные обломки могут составлять до 30% объема шлифа. Они встречаются в виде одиночных зерен, групп и линзовидных скоплений до 4×2 мм. Аксессуарные минералы представлены титанитом, ортитом, зональным гранатом, цирконом,

герцинитом и флюоритом. Цемент терригенных пород характеризуется минеральным разнообразием: серицитовый, хлорито-серицитовый, глинистый, рудный. Иногда он отсутствует, и обломки зерен тесно примыкают друг к другу.

Нами отбирались пробы по каждой структурной и цветовой разновидности обломочных пород по линии профиля А–Б (рис. 3); было отобрано 26 штучных проб массой по 1,5 кг. Во всех оказались повышенные содержания металлов. В таблицу результатов были помещены химические элементы с содержанием не менее двух кларков концентрации (табл.).

В таблицу не включены следующие элементы: Cr — содержание, повышенное во всех пробах, не выше двух кларков концентрации (КК); Cu — около кларка;

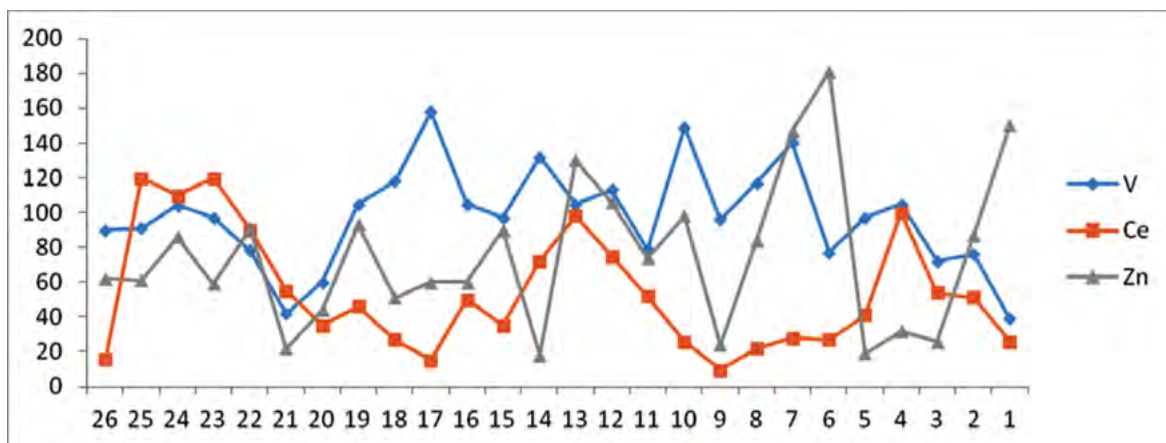


Рис. 4. График содержаний V, Ce, Zn в терригенных породах юры. По вертикальной оси — значения содержаний в г/т, по горизонтальной — номера проб

Fig. 4. Graph of V, Ce, and Zn contents in terrigenous rocks of the Jurassic. On the vertical axis — the values of the contents in g/t, on the horizontal — the sample numbers

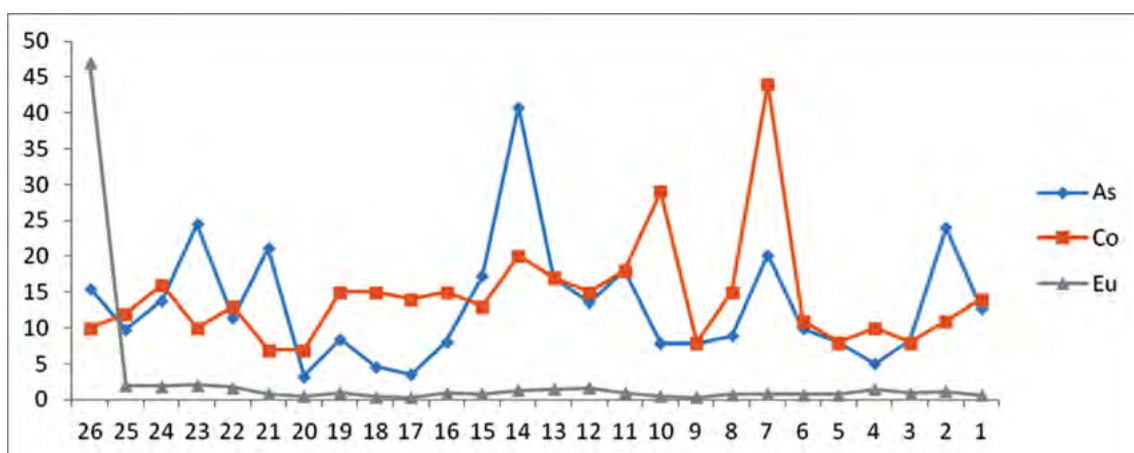


Рис. 5. График содержаний As, Co, Eu в терригенных породах юры. По вертикальной оси — значения содержаний в г/т, по горизонтальной — номера проб

Fig. 5. Graph of As, Co, and Eu contents in terrigenous rocks of the Jurassic. On the vertical axis — the values of the contents in g/t, on the horizontal — the sample numbers

Ga — около кларка или чуть выше; Sn — в пробе 26 — 5 КК; Tl содержится около одного кларка (1,5), а в пробах 24 и 6 — около 6 КК; La — в пробе 26 — 6 КК, в 14 — 2 КК; Pr — в пробах 22, 13, 12, 4 — ~2 КК; U установлен во всех пробах в количестве, близком к кларку, и только в пробе 4 он достигает 5 КК.

Ранее в высокозольных углях Фан-Ягнобского месторождения установлены в содержаниях более 3 КК следующие металлы, в г/т: Mo, Pb, Zn, Cr, Be, Cd и более 5 КК (по отношению к региональному геохимическому фону): Sn, V, W, Cu, Ag [6].

Распределение металлов по геохимическому профилю (рис. 3) показано на рис. 4–7. Значимые

содержания ванадия составляют приблизительно около 100 г/т. Они то значительно возрастают до 150 г/т, то снижаются до фона (30 г/т). Цинк имеет более заметные скачки в содержаниях: от 86 до 181 г/т при кларке в 40 г/т. Церий при фоне 35 г/т колеблется от слабповышенных значений 75–100 г/т до высоких — 120 г/т, с резкими уменьшениями до ниже фона (рис. 4).

На больших интервалах профиля содержание мышьяка многократно превышает кларк концентрации, в а двух — доходит до 40 г/т — 33 КК. В нескольких интервалах кобальт обладает двукратным КК. В начале профиля и в интервале

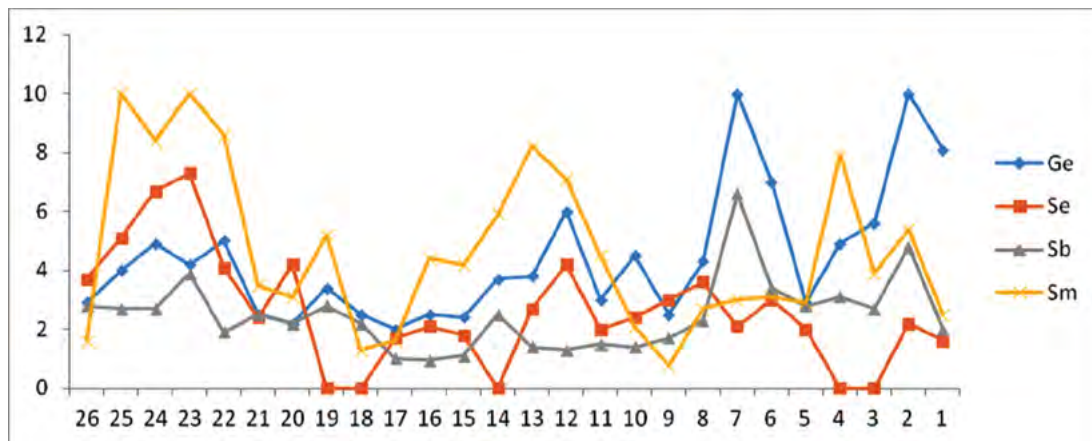


Рис. 6. График содержаний Ge, Se, Sb, Sm в терригенных породах юры. По вертикальной оси — значения содержаний в г/т, по горизонтальной — номера проб

Fig. 6. Graph of Ge, Se, Sb, and Sm contents in terrigenous rocks of the Jurassic. The vertical axis shows the content values in g/t, and the horizontal axis shows the sample numbers

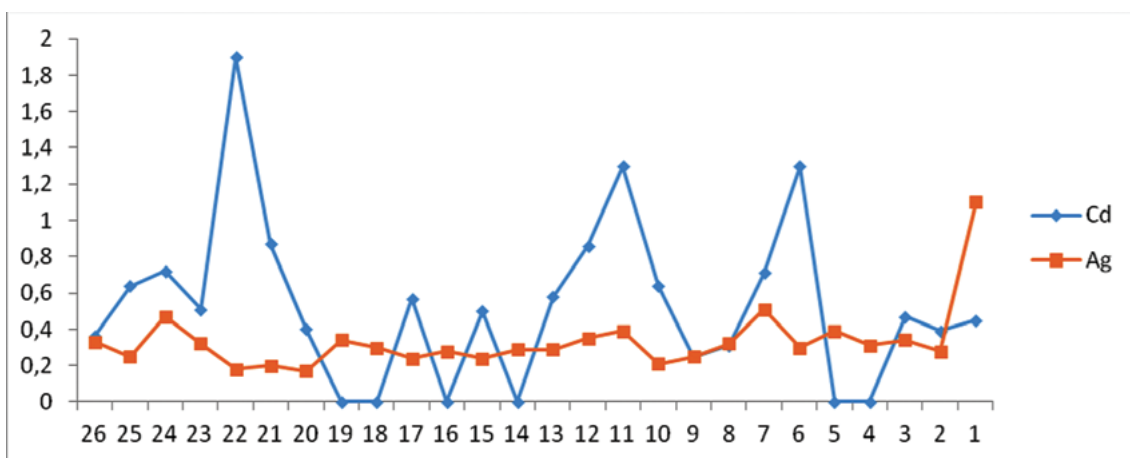


Рис. 7. График содержаний Cd, Ag в терригенных породах юры. По вертикальной оси — значения содержаний в г/т, по горизонтальной — номера проб

Fig. 7. Graph of Cd and Ag contents in terrigenous rocks of the Jurassic. The vertical axis shows the content values in g/t, and the horizontal axis shows the sample numbers

14-й пробы резко возрастает до 5 КК. Европий установлен на уровне фона, к интервалу 23–25 повышается до 2,5 КК, а к 26-му — до 6 КК (рис. 5).

Германий образует концентрации от 2 КК, но во многих интервалах до 3–4, достигающих во 2-м и 7-м интервалах до 7 КК. Селен во многих интервалах имеет содержания 2 КК, повышающиеся до 3–4, а самые высокие — 7 КК. Сурьма по всему профилю имеет очень высокие содержания — 5 КК, а в первом интервале резко возрастает до 33 КК. Самарий образует невысокие кларки концентрации от 1,9 до 2,4 (рис. 6).

Серебро равномерно распределено по всему профилю в содержаниях 2–4, а в первом интервале резко увеличивается до 11 КК. Кадмий имеет очень высокие содержания по всему профилю — от 2–3 до 5–8, максимумы в 6-м и 11-м интервалах — 13, а в 22-м — 19 КК (рис. 7).

Минералогические исследования

Геохимические данные были подтверждены находками минералов — источниками металлов, обнаруженных детальными минералогическими исследованиями на микрозондовом анализаторе. В шлифе с интервала 15 были установлены

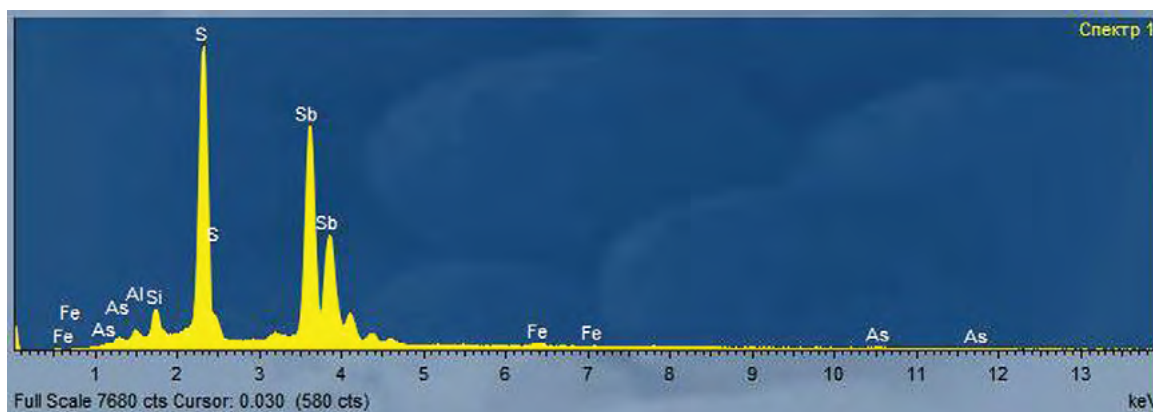


Рис. 8. Энергодисперсионный спектр As-содержащего антимонита
Fig. 8. Energy dispersion spectrum of As-containing antimonite

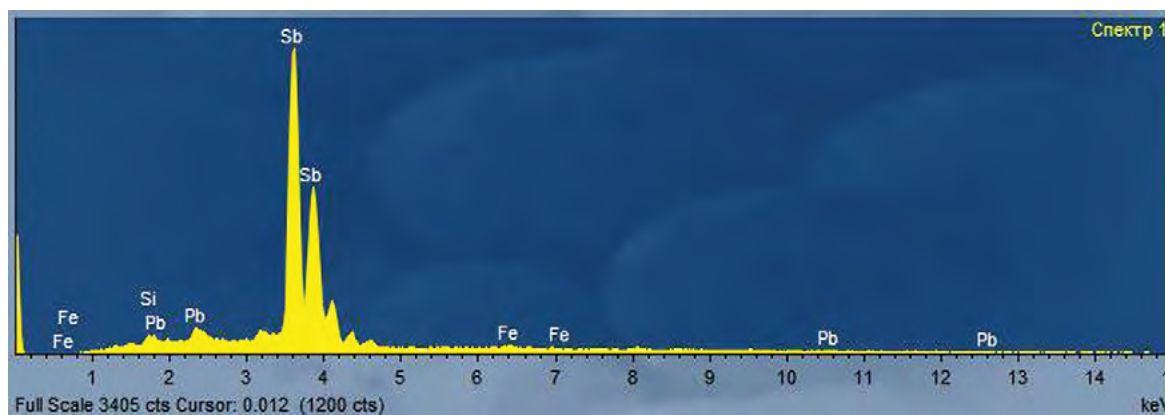


Рис. 9. Энергодисперсионный спектр минерала сурьмы с примесью свинца
Fig. 9. Energy dispersion spectrum of antimony mineral with lead admixture

хорошо окатанные зерна, до 5 мк, антимонита с примесью As (рис. 8).

При исследовании черных шлихов из протокочек под номерами 10–20 определена группа минералов: 1) сурьмы с примесью Pb в виде плохо окатанной призмы длиной 15 мк (рис. 9); 2) окатанный до 100 мк Zn- и Se-содержащий галенит (рис. 10); 3) минерал Sn с примесью Ge (рис. 11 и 15Е); 4) аргентит (рис. 12 и 15Г); 5) очень мелкие зерна золота, от 2 до 9 зерен в одном шлихе, размером 3–40 мк (рис. 13); 6) зерна барита до 200 мк; 7) хорошо окатанные до 60 мк монацит, ксенотим-У и флоренсит-Се (рис. 14); 8) сульфид W — тунгстенит (?), 30 мк. Кроме того, было установлено несколько недиагностируемых фаз, состоящих из высоких количеств Se, Ta, Mo, Bi, Ni, Sn, Tl, Pb, Ge и F. В интервалах 18, 20 обнаружено по 6 зерен

самородного серебра до 10 мк в наибольшем измерении.

Обсуждение

Геохимический профиль по юрской толще с высокими содержаниями рудных элементов, а также рудные минералы в ее составе (реальгар, самородный теллур, селен, тиманит, гринокит, англезит, киноварь, касситерит, молибдит и др.) вблизи Раватского пожара [4, 5, 7, 8, 10, 11], находящегося в 150 метрах ниже профиля, позволяют наметить площадь, которую можно рассматривать как аномалию (рис. 3). Источником металлов для выявленной геохимической аномалии, возможно, могли явиться продукты конденсации горячих газов из подземных угольных пожаров, а также, вероятнее всего,

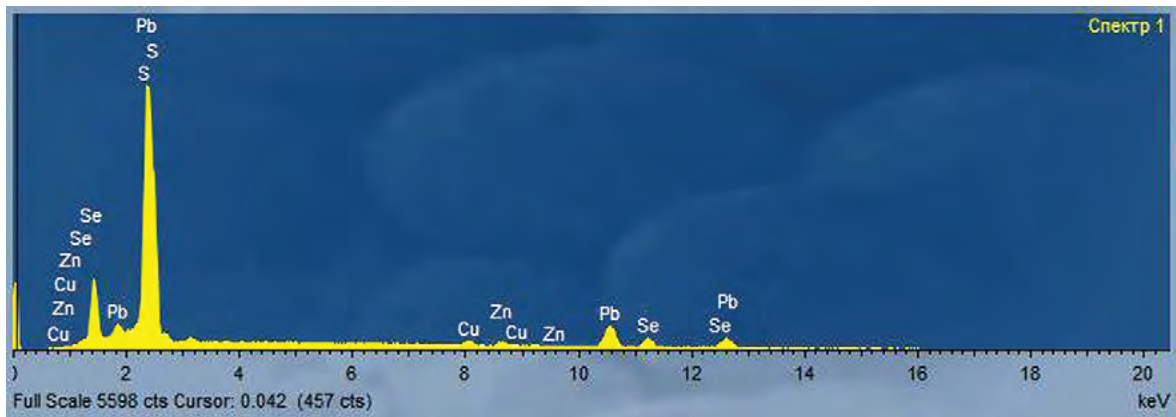


Рис. 10. Энергодисперсионный спектр Se-содержащего галенита
Fig. 10. Energy dispersion spectrum of Se-containing galena

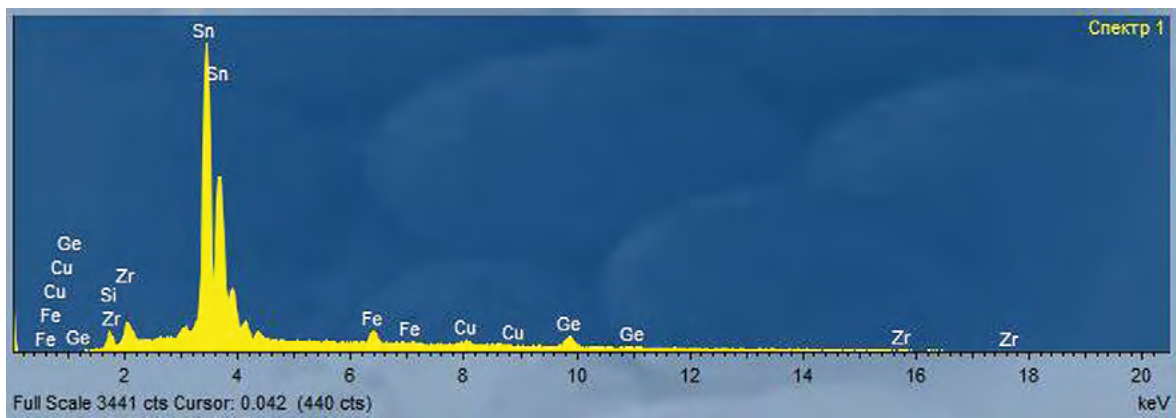


Рис. 11. Энергодисперсионный спектр минерала Sn с примесью Ge (касситерит?)
Fig. 11 Energy dispersion spectrum of Sn mineral with an admixture of Ge (cassiterite?)

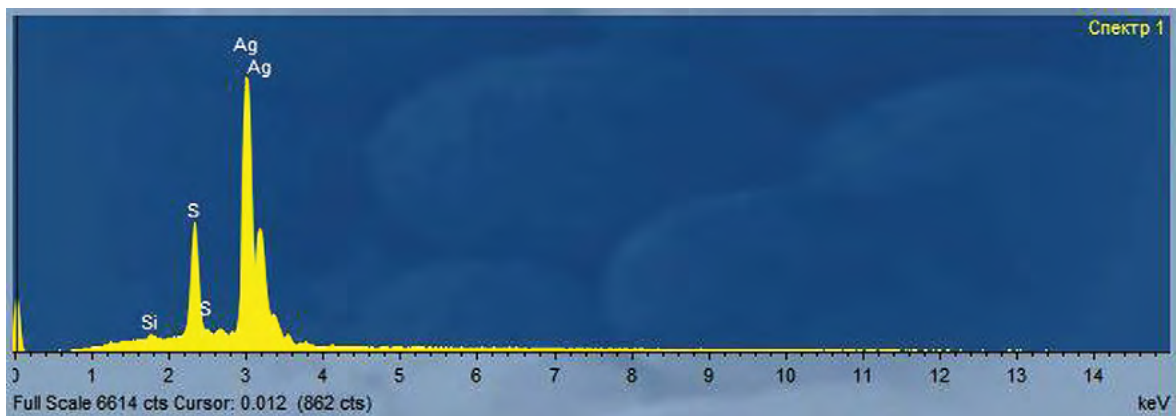


Рис. 12. Энергодисперсионный спектр аргентита (?)
Fig. 12. Energy dispersion spectrum of argentite (?)

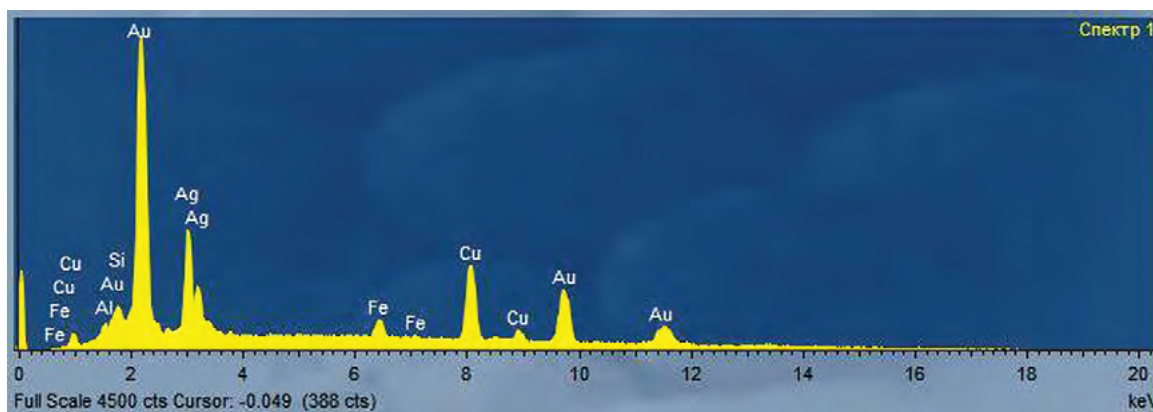


Рис. 13. Энергодисперсионный спектр золота с примесью серебра и меди
Fig. 13. Energy dispersion spectrum of gold with admixture of silver and copper

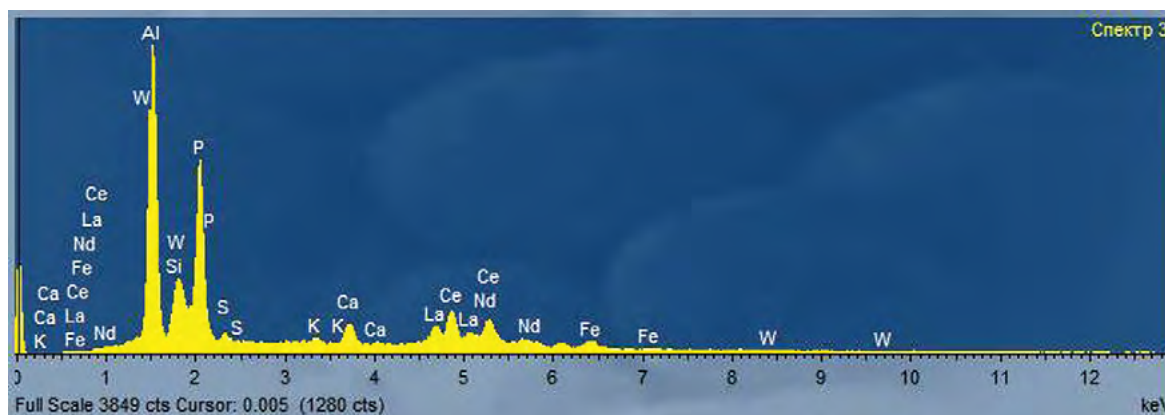


Рис. 14. Энергодисперсионный спектр флоренцита-Ce
Fig. 14. Energy dispersion spectrum of florencite-Ce

разрушенные руды сурьмяного месторождения Джижикрут, которое находится в непосредственной близости с синеклизой (на юге), расположенного севернее вольфрамового Такфон и на западе и северо-западе золорудных Чульбои, Чоре и Восточная Дуоба (за рамкой карты на рис. 1). Их можно рассматривать как зоны эрозии и денудации. Зоной аккумуляции разрушенного рудного вещества с образованием россыпей явилась площадь Фан-Ягнобской синеклизы. Обломки минералов сурьмы, свинца, вольфрама, серебра, золота и других минералов были выявлены в ней при минералогических исследованиях. Мелкие обломки (песчинки) рудных минералов накапливались среди значительно более крупных зерен кварца, полевых шпатов и других, а микрозернистая фракция — в цементе. Эта тонкая

фракция рудных минералов послужила источником для образования выделенной нами геохимической аномалии.

Источник редких земель в аномалии обусловлен монацитом-Ce, ксенотимом-Y и флоренцитом-Ce; германий связан с касситеритом; сурьма — с антимонитом; серебро — с аргентитом; кадмий и селен, вероятно, — с гринокитом, тиманитом, галенитом. Обнаруженные нами многочисленные зерна самородного золота и серебра, а также антимонита, галенита, аргентита и др. подтверждают объективность выделенной геохимической аномалии. С определенной долей объективности можно закартировать потоки домезозойской миграции металлов от месторождений Джижикрут, Такфон и Чоре в сторону Фан-Ягнобской синеклизы (рис. 1).

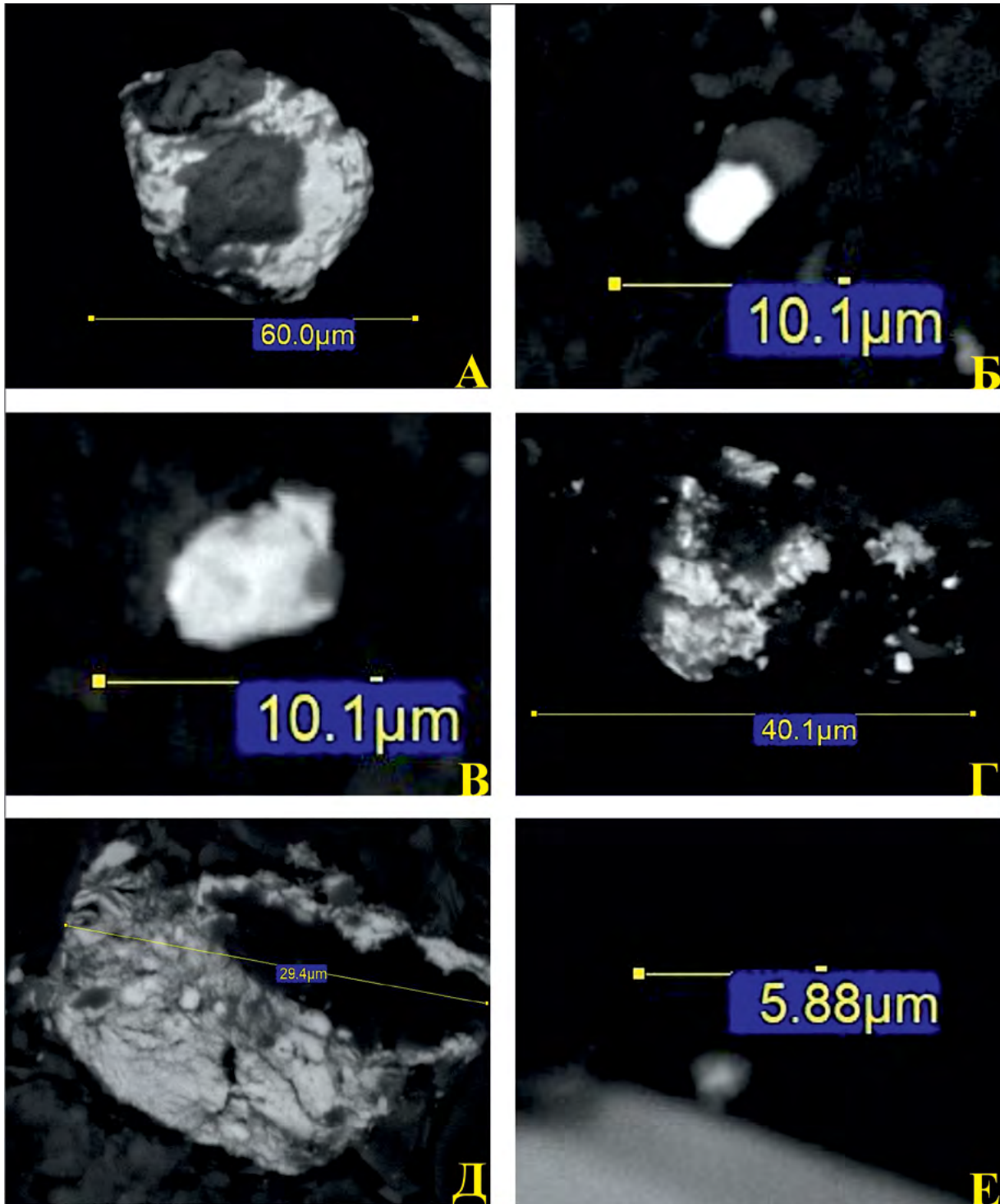


Рис. 15. Рудные минералы тяжелой фракции из проб 10 и 20 геохимического профиля: А — ксенотим-У; Б — антимонит с примесью As; В — фаза Pb с Se, Та; Г — аргентит (?); Д — флоренцит-Ce с примесью вольфрама; Е — минерал Sn с примесью Ge (касситерит?)

Fig. 15. Ore minerals of the heavy fraction from samples 10 and 20 of the geochemical profile: А — xenotime-Y; Б — antimonite with an admixture of As; В — phase Pb with Se, Ta; Г — argentite (?); Д — florencite-Ce with an admixture of tungsten; Е — mineral Sn with an admixture of Ge (cassiterite?)

Заключение

Предмезозойский орогенный этап развития региона послужил временем для частичной эрозии и денудации палеозойских месторождений, переноса и аккумуляции рудного материала в понижениях рельефа, где сформировались терригенные свиты Фан-Ягнобской синеклизы.

Богатый металлогенический потенциал палеозойского фундамента Зеравшано-Гиссарской зоны явился источником для формирования древней юрской россыпи внутри Фан-Ягнобской синеклизы. Полученные геохимические данные по породам юрской системы свидетельствуют об аномально высоком содержании большой группы рудных элементов. Геохимическая аномалия подтверждается прямыми находками рудных минералов: антимонита, галенита, аргентита, самородного золота

и серебра, монацита-Се, ксенотима-У и флоренсита-Се установленных нами по линии профиля в юрской толще. Данная находка многочисленных рудных минералов может быть квалифицирована как возможное рудопроявление. Это ставит дополнительную задачу по опробованию всего мезозойского разреза синеклизы, где могут быть обнаружены древние россыпи многих металлов.

Рудные минералы древней россыпи значительно мельче нерудных, поэтому их обнаружение ранее, без использования прецизионных методов, было невозможно. Приведенные минералогические и геохимические результаты подтверждают установленные ранее авторами [3] перспективы рудоносности Фан-Ягнобской синеклизы и, возможно, других мезозойских синеклиз Центрального Таджикистана на древние россыпи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вадило П.С. Подземный пожар в Центральном Таджикистане. Природа. 1958. № 8. С. 88–91.
2. Геология СССР. Таджикская ССР. М.: Изд-во научно-техн. литературы по геологии и охране недр. 1959. Т. XXIV. Ч. II. 732 с.
3. Литвиненко А.К., Саймудасири М. Перспективы рудоносности Фан-Ягнобской синеклизы Зеравшано-Гиссара, Центральный Таджикистан. Известия вузов. Геология и разведка. 2025. № 4. С. 134–142.
4. Мираков М.А., Файзиев А.Р., Паутов Л.А. Самородный селен в продуктах подземного пожара Фан-Ягнобского угольного месторождения (Центральный Таджикистан). Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2017. Т. 60. № 9. С. 456–460.
5. Мираков М.А., Паутов Л.А., Махмадшариф С., Карпенко В.Ю., Шодибеков М.А. Первая находка ртутных минералов — тиманнита и киновари в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан). Новые данные о минералах. 2020. Т. 54. Вып. 4. С. 96–106.
6. Охунов Р.В., Ёров З.Ё., Негматов И.И. Атлас-справочник угольного месторождения Фан-Ягноб. Душанбе, 2017. 170 с.
7. Паутов Л.А., Мираков М.А., Карпенко В.Ю., Махмадшариф С. Ge-содержащий касситерит из возгонов природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Раватском участке Фан-Ягнобского месторождения каменного угля (Таджикистан). Новые данные о минералах. 2022. Т. 56(1). С. 12–23.
8. Паутов Л.А., Мираков М.А., Махмадшариф С., Карпенко В.Ю., Файзиев А.Р. Находка самородного теллура в возгонах природного подземного пожара в урочище Кухи-Малик на Фан-Ягнобском угольном месторождении (Таджикистан). Новые данные о минералах. 2019. Т. 53. С. 95–99.
9. Расчленение стратифицированных и интрузивных образований Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1976. 207 с.
10. Саймудасири М., Литвиненко А.К. Современное минералообразование на Фан-Ягнобском месторождении каменного угля Южный Тянь-Шань (Таджикистан). Тез. Молодые — Научкам о Земле. 2024. Т. 3. С. 268–271.
11. Саймудасири М., Литвиненко А.К. Талий (Tl) и Рb-Vi содержащие минералы из возгонов природного подземного пожара на Фан-Ягнобском месторождении каменного угля (Таджикистан). Тез. Материалы XVII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле». Издательство РГУ им. Серго Орджоникидзе. 2025. С. 168–171.
12. Таджикибеков М., Раджабов И. Морфологические типы и важнейшие закономерности неогеновых внутригорных впадин Гиссаро-Алая. Проблемы геологии Республики Таджикистан. Душанбе, 1999. Вып. 1–2. С. 73–85.
13. Таджикибеков М. Внутригорные впадины Гиссаро-Алая в новейшем этапе геологического развития. Душанбе: Дониш, 2005. 256 с.

REFERENCES

1. Vadilo P.S. An underground fire in Central Tajikistan. Nature. 1958. No. 8. С. 88–91 (In Russ.).
2. Geology of the USSR. Tajik SSR. Moscow: Publishing House of Scientific and Technical Sciences. Publishing

- house of literature on geology and protection of mineral resources. 1959. Vol. XXIV. Part II. 732 p. (In Russ.).
3. Litvinenko A.K., Saymudasiri M. Prospects of ore bearing in the Fan-Yagnob syncline of Zeravshan-Gissar, Central Tajikistan. Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration. 2025. No. 4. P. 134–142 (In Russ.).
 4. Mirakov M.A., Fayziev A.R., Pautov L.A. Native selenium in the products of the underground fire of the Fan-Yagnob coal deposit (Central Tajikistan). Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. 2017. Vol. 60. No. 9. P. 456–460 (In Russ.).
 5. Mirakov M.A., Pautov L.A., Makhmadsharif S., Karpenko V. Yu., Shodibekov M.A. The first find of mercury minerals — tiemannite and cinnabar in the sublimes of a natural underground fire in the Kuhi-Malik stow at the Fan-Yagnob coal deposit (Tajikistan). New data on minerals. 2020. Vol. 54. Issue 4. P. 96–106 (In Russ.).
 6. Okhunov R.V., Yerov Z.E., Negmatov I.I. Atlas handbook of the Von-Yagnob coal deposit. Dushanbe. 2017. 170 p. (In Russ.).
 7. Pautov L.A., Mirakov M.A., Karpenko V. Yu., Makhmadsharif S. Ge-containing cassiterite from the ignitions of a natural underground fire in the Kuhi-Malik tract at the Ravat site of the Fan-Yagnob coal deposit (Tajikistan). New data on minerals. 2022. Vol. 56(1). P. 12–23 (In Russ.).
 8. Pautov L.A., Mirakov M.A., Makhmadsharif S., Karpenko V. Yu., Fayziev A.R. The discovery of native tellurium in the ignition of a natural underground fire in the Kuhi-Malik tract at the Fan-Yagnob coal deposit (Tajikistan). New data on minerals. 2019. Vol. 53. P. 95–99 (In Russ.).
 9. Dissection of stratified and intrusive formations of Tajikistan. Dushanbe: Donish, 1976. 207 p. (In Russ.).
 10. Saymudasiri M., Litvinenko A.K. Modern mineral formation at the Fan-Yagnob coal deposit of the Southern Tien Shan (Tajikistan). Young — Geosciences. 2024. Vol. 3. P. 268–271 (In Russ.).
 11. Saymudasiri M., Litvinenko A.K. Tally (Tl) and Pb-Bi containing minerals from the ignitions of a natural underground fire at the Fan-Yagnob coal deposit (Tajikistan). Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference «New Ideas in Geosciences». Moscow: Publishing House of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 2025. P. 168–171 (In Russ.).
 12. Tadjibekov M., Radjabov I. Morphological types and the most important patterns of the Neogene intragastric depressions of the Gissar-Alai. Problems of Geology of the Republic of Tajikistan. Dushanbe. 1999. Issue 1–2. P. 73–85 (In Russ.).
 13. Tadjibekov M. The Gissaro-Alai intracranial depressions in the latest stage of geological development. Dushanbe: Donish. 2005. 256 p. (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Саймудасири М. — обработал и проанализировал геологические данные, подготовил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Литвиненко А.К. — разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Mahmadsharif Saymudasiri — has processed and analyzed the geological data, prepared the published version of the article and agrees to assume responsibility for all aspects of the work.

Andrey K. Litvinenko — developed the concept and prepared the text of the article, finally approved the published version of the article and agrees to assume responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Саймудасири Махмашариф* — аспирант ФГБУ «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия e-mail: Geolog.said@mail.ru тел.: +7 (925)392-15-76 SPIN-код: 7490-8469 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9988-1782>

Mahmadsharif Saymudasiri* — Post-graduate researcher of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russian Federation e-mail: Geolog.said@mail.ru tel.: +7(925)392-15-76 SPIN-code: 7490-8469 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-9988-1782>

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ /
GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

Литвиненко Андрей Кимович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии и геммологии ФГБУ «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия

e-mail: akl1954@yandex.ru

тел: +7 (916) 655-08-08

SPIN-код: 6127-2320

Andrey K. Litvinenko — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russian Federation

e-mail: akl1954@yandex.ru

tel.: +7 (916) 655-08-08

SPIN-code: 6127-2320

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1779-5391>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ВЕРоятностная оценка объемно-генетическим методом масштабов генерации и эмиграции углеводородов рифейского комплекса Анабаро-Ленской краевой системы

Д.В. ПЕСКОВ^{1*}, А.М. ЖАРКОВ¹, М.А. КРАВЧЕНКО², И.Н. ЛУКОГОРСКИЙ³, Е.Н. ЧЕЛНАКОВА¹

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»
2, 21 линия, Васильевский остров, Санкт-Петербург 199106, Россия

² ООО «Газпром добыча Оренбург», 1/2, ул. Чкалова, Оренбург 460058, Россия

³ ООО «Газпром инвест», 6, лит. Д, ул. Стартовая, Санкт-Петербург 196210, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Анабаро-Ленская краевая система характеризуется предпосылками нефтегазоносности рифейских осадочных отложений. В этой связи наиболее остро стоит вопрос о наличии достаточно богатого источника нефти и газа для формирования залежей углеводородов. Слабая изученность докембрийской части разреза не позволяет использовать более точные методы расчета объемов генерации и эмиграции углеводородов (УВ) из нефтегазоматеринских пород (НГМП). При этом вероятностный анализ объемно-генетическим методом позволяет оценить диапазон объемов углеводородов, которые могли генерировать отложения, обогащенные органическим веществом.

Цель. Оценка масштабов генерации и эмиграции жидких и газообразных УВ из мукунской и билляхской серий, а также хастахской свиты рифейского возраста.

Материалы и методы. Вероятностная оценка объемно-генетическим методом сгенерированных и эмигрированных УВ из НГМП Анабаро-Ленской краевой системы.

Результаты. Суммарно рифейские НГМП северной краевой системы Сибирской платформы могли генерировать порядка 33,1–86,5 млрд т нефти и 57,7–174,2 трлн м³ газа.

Заключение. Проведенный анализ позволяет предположить, что в рифейских нефтегазоматеринских породах могло генерироваться значимое количество углеводородов для формирования скоплений нефти и газа. В этой связи наиболее актуальным и противоречивым вопросом может выступать оценка сохранности углеводородов в пунктах конечной миграции — ловушках, а также методология их поиска.

Ключевые слова: нефтегазоносность докембрия, краевые системы, объемно-генетический метод, Анабаро-Ленская краевая система, Лено-Анабарский регион

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Песков Д.В., Жарков А.М., Кравченко М.А., Лукогорский И.Н., Челнакова Е.Н. Вероятностная оценка объемно-генетическим методом масштабов генерации и эмиграции углеводородов рифейского комплекса Анабаро-Ленской краевой системы. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):79–89. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-79-89> EDN: [NOINEG](https://www.edn.ru/NOINEG)

Статья поступила в редакцию 19.01.2026

Принята к публикации 22.01.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

GENERATION AND EXPULSION OF HYDROCARBONS FROM THE RIPHEAN COMPLEX OF THE ANABAR–LENA MARGINAL SYSTEM: PROBABILISTIC ESTIMATE USING THE VOLUMETRIC–GENETIC APPROACH

DMITRY V. PESKOV^{1,*}, ALEXANDER M. ZHARKOV¹, MILENA A. ANTONOVA², IVAN N. LUKOGORSKY³,
EKATERINA N. CHELNAKOVA¹

¹ *Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University II
2, 21 line, Vasilevsky island, Saint Petersburg, 199106, Russia*

² *000 «Gazprom Dobycha Orenburg», 1/2, Chkalova str., Orenburg, 460058 Russia*

³ *000 «Gazprom Invest», 6, lit. D, Startovaya str., Saint Petersburg, 196210, Russia*

ABSTRACT

Background. The Anabar-Lena marginal system exhibits conditions favorable for the hydrocarbon prospectivity of Riphean sedimentary deposits. In this regard, the question about the presence of a sufficiently rich oil-and-gas source to form hydrocarbon deposits here is most acute. Poor knowledge of the Precambrian part of the section prevents using more accurate methods for estimating the volume of hydrocarbons generated and expelled from the source rocks. In this case, a probabilistic volumetric-genetic analysis is appropriate for estimating the range of hydrocarbon volumes that could be generated by organic-rich deposits.

Aim. To estimate the magnitude of generation and expulsion of liquid and gaseous hydrocarbons from the Mukun and Billiakh series, as well as the Riphean Khastakh formation.

Materials and methods. The probabilistic estimate of hydrocarbons generated and expelled from the source rocks of the Anabar-Lena marginal system was performed using the volumetric-genetic method.

Results. In total, the Riphean source rocks of the northern marginal system of the Siberian Platform could have generated about 33.1–86.5 billion t of oil and 57.7–174.2 trillion m³ of gas.

Conclusion. The performed analysis suggests that the Riphean source rocks may have generated a significant volume of hydrocarbons capable of forming oil-and-gas accumulations. In this regard, the most relevant and controversial issue may be the assessment of hydrocarbon preservation in traps, i.e., sites of their final expulsion, as well as and the methodology for their detection.

Keywords: Precambrian hydrocarbon prospectivity, marginal systems, volumetric-genetic method, Anabar-Lena marginal system, Lena-Anabar region

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Peskov D.V., Zharkov A.M., Antonova M.A., Lukogorsky I.N., Chelnakova E.N. Generation and expulsion of hydrocarbons from the riphean complex of the Anabar-Lena marginal system: probabilistic estimate using the volumetric-genetic approach. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):79–89. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-79-89> EDN: HOIHEG

Manuscript received 19 January 2026

Accepted 22 January 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Сибирская платформа (Лено-Тунгусская нефтегазоносная провинция) занимает особое место среди территорий с выявленной нефтегазоносностью. Залежи нефти и газа ассоциируются преимущественно с вендским терригенным и кембрийским карбонатным комплексами. Помимо традиционных скоплений УВ на севере платформы выявлены многочисленные битумные поля [10] и сланцевая куонамская формация [6], выступающая аналогом доманика Восточно-Европейской платформы [21].

Активное освоение Сибирской платформы началось в 2008 г. с запуском нефтепроводной системы Восточная Сибирь — Тихий океан. До этого момента промышленная добыча углеводородов практически не осуществлялась. Близость территории к материковому Китаю как одному из главных потребителей углеводородного сырья [11] стимулирует наращивание ресурсной базы Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. При этом отмечаются очевидные трудности при освоении северных районов, с точки зрения транспортной доступности которых единственной транспортной артерией служит Северный морской путь.

Гетерогенность Сибирской платформы определяет районы с разными толщинами осадочного чехла (краевые системы и центральная часть). Так, например, толщина осадочного чехла в центральной части в среднем не превышает 2–4 км, уменьшаясь до 0 км в пределах щитов. В краевых системах (КС) и рифтовых структурах толщина осадочного чехла возрастает до 5–10 км и более, что обеспечивает благоприятные условия для формирования глубоко залегающих залежей углеводородов [22]. Наибольшие перспективы открытия новых промышленно значимых месторождений УВ связывают с КС платформы, большая часть осадочного чехла которых выполнена осадками рифейского возраста, возрастающими к краю платформы (рис. 1).

Материалы и методы

Исследования последних лет показали, что в осадочных отложениях краевых систем начиная с рифейского возраста накапливались породы с повышенными концентрациями органического вещества. В этой связи наиболее остро стоит вопрос о сохранности сгенерированных, эмигрированных и аккумуляровавшихся углеводородов.

Краевые системы подвержены внутриплитным деформациям, в результате которых структурные ловушки предыдущей генерации либо переформируются (в литологические, структурно-литологические

и тектонически экранированные), либо разрушаются, обеспечивая перетоки УВ в верхние этажи нефтегазоносности.

В результате структурных перестроек формируется новая система ловушек. При этом в случае с Анабаро-Ленской КС основная фаза миграции УВ произошла до формирования антиклинальных поднятий [4, 16], отчетливо фиксирующихся методами современной сейсморазведки. В таком случае первоочередными объектами поиска будут выступать палеоподнятия фундамента базального структурно-формационного комплекса, ассоциирующегося с начальным этапом осадконакопления.

Оценка масштабов генерации выполнена объемно-генетическим методом. Данная методика хорошо применима для регионов со слабой геолого-геофизической изученностью и позволяет установить максимальный возможный объем прогнозных ресурсов [17]. Сложность подобного прогноза заключается в неоднозначности влияния внутриплитных деформаций в передовых частях платформы.

Помимо этого, в работе используется метод Монте-Карло, который позволяет проанализировать данные при известных приблизительных входных параметрах и информации об их статистическом распределении. Для проведения анализа генерируется большое число случайных значений параметров, для каждого такого значения выполняется расчет и формируется статистическое распределение для результата. Наибольшей неопределенностью характеризуется картирование толщин осадочных отложений в условиях низкокачественной сейсморазведки, не позволяющей проследить отражающие границы. В условиях единичных данных, отобранных на больших расстояниях, высокой неопределенностью характеризуются концентрации ОВ в породе.

С позиций современных геохимических исследований генерация и аккумуляция углеводородов возможна при содержании органического вещества в породе от 0,5–1 %, в редких случаях понижаясь до 0,2 % [2]. При меньших концентрациях микро-нефть будет рассеиваться в осадочном чехле, не образуя скоплений углеводородов.

Для пород с повышенными концентрациями ОВ характерен некомпенсированный тип осадконакопления, свойственный для КС платформ, мелководных (умеренно глубоководных) карбонатных отложений и надрифтовых осадочных бассейнов. В нефтегазоматеринских свитах данных областей содержание органического вещества варьируется от пороговых значений до 15 % и более.

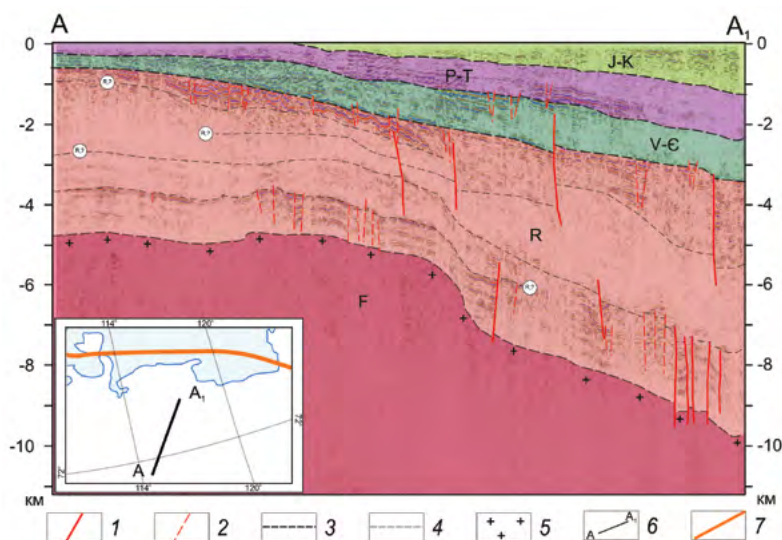


Рис. 1. Разрез по профилю А-А₁, (интерпретация авторов по материалам Росгео, 2019): 1 — разрывные нарушения; 2 — слабопроявленные разрывные нарушения; 3 — четкие сейсмические границы; 4 — нечеткие сейсмические границы; 5 — кристаллический фундамент; 6 — линия профиля; 7 — предполагаемая граница Сибирской платформы

Fig. 1. Section along profile A-A₁, (authors' interpretation based on Rosgeo materials, 2019): 1 — faults; 2 — weak faults; 3 — clear seismic boundaries; 4 — unclear seismic boundaries; 5 — crystalline basement; 6 — profile line; 7 — presumed boundary of the Siberian platform

Еще одним важным фактором, непосредственно влияющим на масштабы генерации нефти и газа, является степень преобразованности органического вещества, а также время нахождения пород в главной зоне нефте- или газогенерации. В случае присутствия в разрезе катагенетического несогласия расположенные ниже НГМП могут не генерировать УВ [1].

Наиболее дискуссионным параметром объемно-генетического метода является величина аккумуляции углеводородов. Для решения этой задачи обычно используют эмпирически определяемый коэффициент аккумуляции — долю аккумулярованных в ловушках УВ от общей их массы, образовавшейся и эмигрировавшей в коллектор [14]. Однако величину эмпирического коэффициента аккумуляции можно определить только уже для полностью разведанного бассейна или для изолированной нефтегазосборной площади с расположенной в ней ловушкой, в которой оценены промышленные запасы УВ.

Для слабоизученных объектов остается только один путь — использование коэффициентов аккумуляции, определенных для аналогичных геологических структур. Величины эмпирических коэффициентов аккумуляции разными авторами для различных геологических объектов определялись в весьма широком диапазоне — от 1–2 до 20 %,

что, естественно, вносит большую неопределенность при оценке потенциальных ресурсов УВ.

Нефтегазоматеринские породы

К нефтегазоматеринским свитам региона рифейского возраста можно отнести мукунскую и билляхские серии, а также хастахскую свиту. Помимо этого, к НГМП по результатам исследований ядра скважин Хастахская-930 и Бурская-3410 относят хайпахскую и дебенгдинскую свиты. Последующее уточнение стратиграфического положения [20] не позволяет относить результаты исследований к данным горизонтам в скважинах. В результате данные свиты не рассматривались в работе, поскольку данный вопрос требует дополнительного уточнения.

Мукунская серия представлена преимущественно обломочными породами рифейского возраста. Накопление серии началось не ранее 1680 млн лет назад, а закончилось до 1500 млн лет назад, на что указывает U-Pb возраст обломочного циркона из низов разреза и возраст даек и силлов, прорывающих доломиты вышележащей билляхской серии [9, 19]. Естественные обнажения пород отмечены в пределах Анабарского щита. Состоит серия из трех свит: ильинской, бурдурской и лабазтахской. В составе отложений присутствуют гравелиты, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Серия

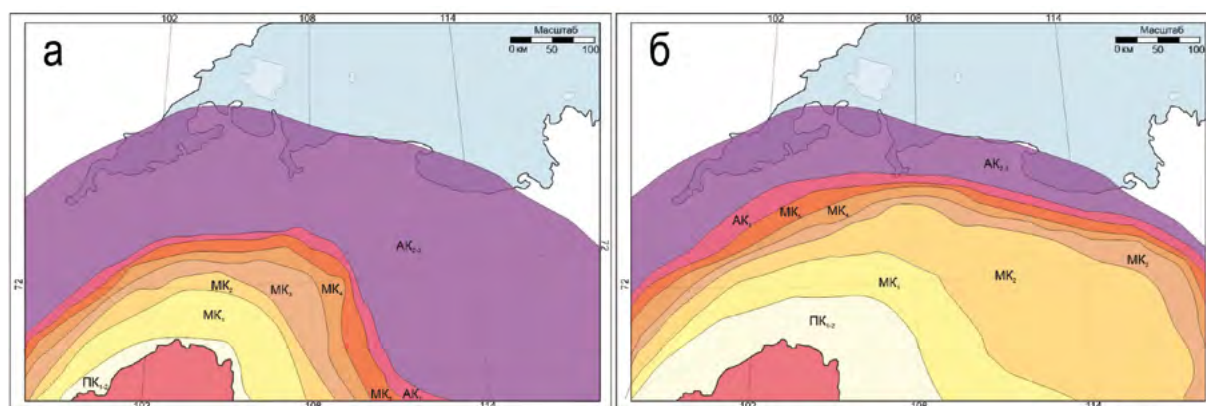


Рис. 2. Схемы катагенетической зональности: а — по кровле отложений раннерифейского возраста; б — по кровле отложений позднерифейского возраста (составлено авторами)

Fig. 2. Catagenetic zonation maps: а — at the top (roof) of Early Riphean deposits; б — at the top (roof) of Late Riphean deposits (compiled by the authors)

залегает с угловым несогласием на породах архейского возраста или нижнепротерозойских корах выветривания.

Билляхская серия рифейского возраста (1500–1400 млн лет [7]). Наиболее полный разрез представлен в районе Анабарского поднятия. Отложения связаны с мукунской серией постепенным переходом; нижняя ее граница условно проводится по появлению в разрезе первого горизонта строматолитовых доломитов [15]. Серия сложена тремя свитами: усть-ильинской, котуйканской и юсмастаской. В основании серии (усть-ильинская свита) преобладают аргиллиты и алевролиты. Далее разрез становится преимущественно карбонатным: преобладают доломиты и мергели.

Хастахская свита верхнерифейского возраста. Она выделяется пестроцветной окраской и сложена переслаиванием песчаников, алевролитов и аргиллитов [5].

Параметры моделирования

Ввиду слабой изученности глубоким бурением имеются точечные (единичные) данные о нефтегазоматеринских свойствах пород, что существенно ограничивает возможность моделирования процессов нефтегазообразования другими методами.

Моделирование масштабов генерации, эмиграции нефти и газа, а также плотности генерированных и эмигрировавших углеводородов проводилось с рядом допущений. Площадь распространения пород принята по результатам картирования территории миллионного масштаба, изложенных в объяснительных записках государственных геологических карт S49–52 и R49–52.

Концентрации органического вещества ($C_{\text{орг}}$) мукунской серии взяты из работы [18]. В качестве средних значений принято 2%, максимальных — 2,5%. Минимальные значения приняты граничными для НГМП. Для билляхской серии концентрации $C_{\text{орг}}$ изменяются в диапазоне от 1,83 до 4,87% [8], для хастахской диапазон изменения концентраций ОВ принят от 0,24 до 1,72% [12]. Кероген всех НГМП региона относится ко II типу [3].

Широкий разброс граничных значений приводит как к недооценке, так и переоценке генерационного потенциала НГМП. Кроме того, отсутствие достаточно представительной выборки данных усиливает чувствительность результатов к одиночным аномалиям, таким как редкие зоны с экстремально высоким или низким содержанием ОВ. В итоге такие аномалии могут искажать общую картину, делая моделирование менее надежным.

Для количественной оценки объемов генерации и эмиграции приняты формулы и коэффициенты, разработанные во ВНИГРИ (Санкт-Петербургский филиал ВНИГНИ). Табличные значения [13] подобраны с учетом степени преобразованности ОВ и включают в себя: коэффициенты генерации и эмиграции нефти и газа, остаточную массу ОВ и концентрации углерода в остаточном ОВ на рассматриваемой стадии катагенеза. Применяемые коэффициенты ориентированы на кероген II типа.

Катагенетическая зрелость ОВ определена по данным историко-эволюционного анализа с моделированием температурной эволюции региона. По результатам данного моделирования построены карты катагенетической зональности по кровле нижнерифейских (рис. 2а) и верхнерифейских (рис. 2б) отложений.

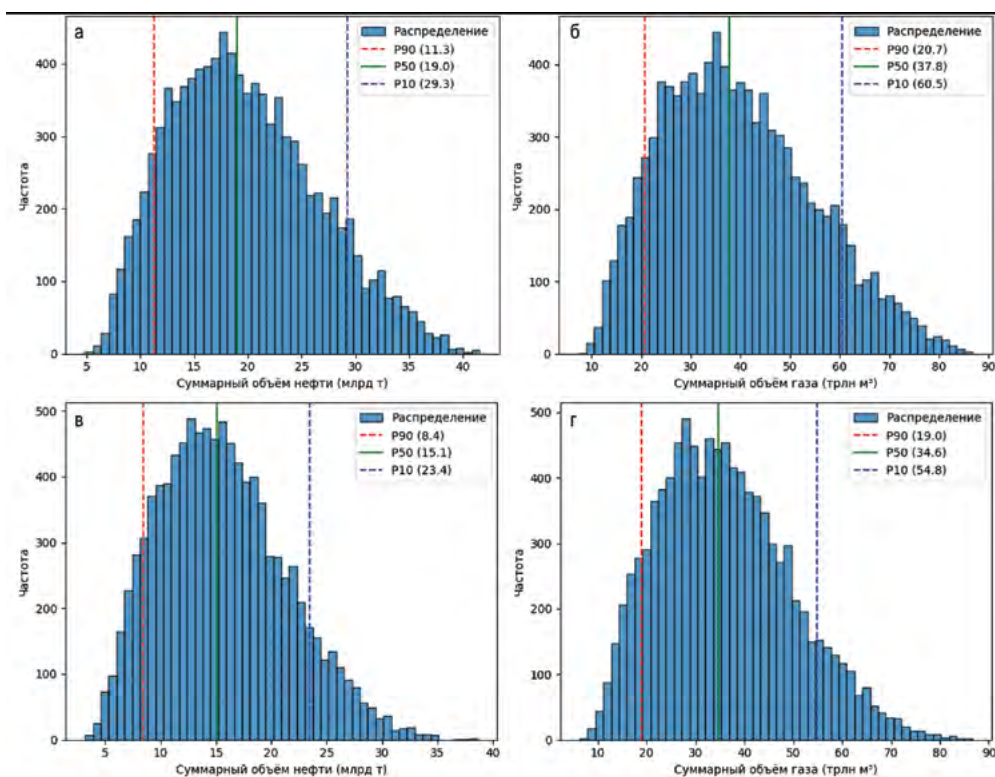


Рис. 3. Гистограмма суммарных объемов генерации: (а — нефти и б — газа) и эмиграции (в — нефти и г — газа) из НГМП мукунской серии (составлено авторами)

Fig. 3. Histogram of total volumes of generation (a — oil and б — gas) and emigration (в — oil and г — gas) from the source rocks of the Mukun Series (compiled by the authors)

Катагенез ОВ закономерно снижается по направлению к внутреннему полю платформы, что объясняется снижением глубин залегания рифейских осадочных отложений, а также снижением палеотеплового потока к центру платформы. Необходимо отметить, что нижнерифейские отложения по результатам бассейнового моделирования достигли температур и глубин процессов нефтеобразования в рифейское время и существенно реализовали свой генерационный потенциал еще до предвендской эрозии. Верхнерифейские НГМП также достигли пика нефтегазогенерации до предвендского прерыва в осадконакоплении, но в результате размыва отложений повторно верхняя часть верхнерифейских НГМП достигла условий нефтегазогенерации в позднепалеозойский-раннемезозойский этап геологического развития, что существенно могло сказаться на их генерационном потенциале.

Результаты

Согласно вероятностной оценке объемно-генетическим методом отложения мукунской серии могли сгенерировать значимое количество углеводородов. Объемы генерации составляют

от 11,3 до 29,3 млрд т нефти, с наиболее вероятными значениями 19,0 млрд т (рис. 3а). Объемы генерации газа оцениваются от 20,7 до 60,5 (P50 = 37,8) трлн м³ (рис. 3б). Масштабы эмиграции составляют от 8,4 до 23,4 (P50 = 15,1) млрд т жидких УВ (рис. 3в) и в диапазоне от 19,0 до 54,8 (P50 = 34,6) трлн м³ газообразных (рис. 3г). Плотность генерации (P50) оценивается от 44,4 до 349,7 тыс. т/км² нефти и от 41,5 до 765,7 млн м³/км² газа. Плотность эмиграции (P50) жидких углеводородов могла составлять 2,2–286,7 тыс. т/км² и 37,2–680,1 млн м³/км² газообразных.

Отложения билляхской серии могли генерировать от 20,0 до 54,2 млрд т нефти с наиболее вероятными значениями 34,5 млрд т нефти (рис. 4а) и от 34,9 до 110,4 (P50 = 66,5) трлн м³ газа (рис. 4б). Из НГМП могло эмигрировать 13,9–43,5 (P50 = 26,1) млрд т жидких УВ (рис. 4в) и от 31,4 до 100,8 (P50 = 60,2) трлн м³ газообразных (рис. 4г). Медианные значения плотности генерации (P50): от 88,7 до 680,3 тыс. т/км² нефти и от 82,9 до 1517,7 млн м³/км² газа. Плотность эмиграции жидких УВ могла составлять 4,4–578,1 тыс. т/км² и 74,5–1369,6 млн м³/км² газообразных.

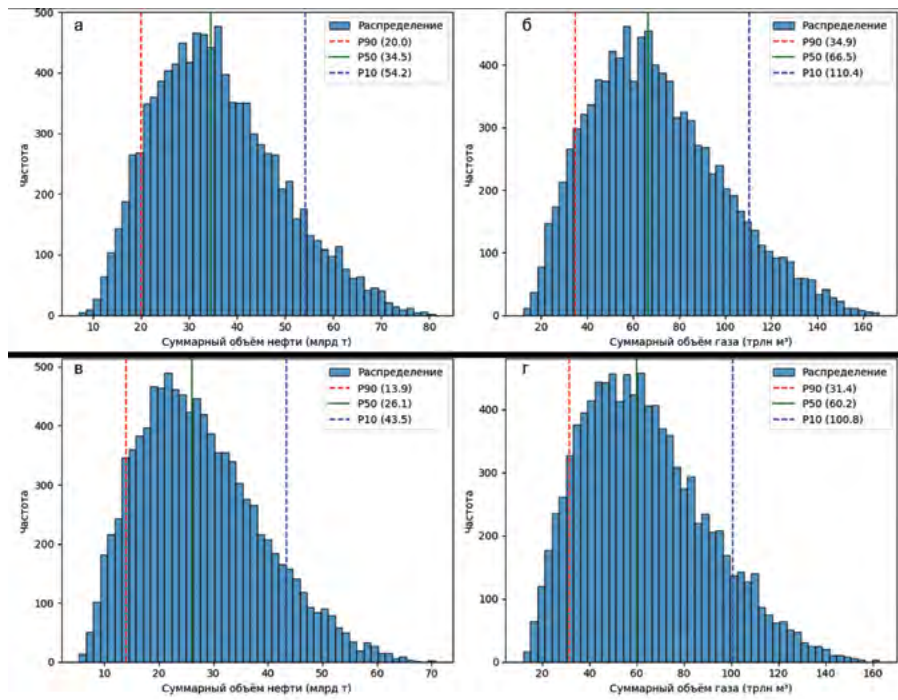


Рис. 4. Гистограмма суммарных объемов генерации (а — нефти и б — газа) и эмиграции (в — нефти и г — газа) из НГМП билляхской серии (составлено авторами)

Fig. 4. Histogram of total volumes of generation (a — oil and б — gas) and emigration (в — oil and г — gas) from the source rocks of the Billyakh Series (compiled by the authors)

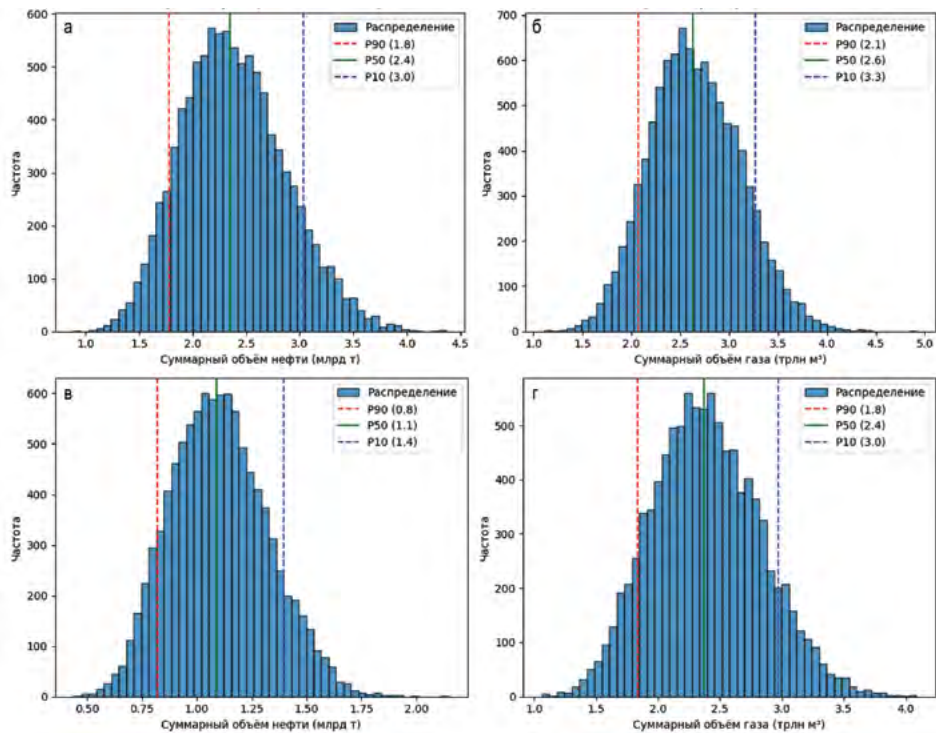


Рис. 5. Гистограмма суммарных объемов генерации (а — нефти и б — газа) и эмиграции (в — нефти и г — газа) из НГМП хастахской свиты (составлено авторами)

Fig. 5. Histogram of total volumes of generation (a — oil and б — gas) and emigration (в — oil and г — gas) from the source rocks of the Hastakh formation (compiled by the authors)

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR HYDROCARBON RESERVES

Хастахская свита могла генерировать жидкие углеводороды в диапазоне от 1,8 до 3,0 (с наиболее вероятными значениями 2,4 млрд т (рис. 5а)) и 2,1–3,3 (P50 = 2,6) трлн м³ газообразных (рис. 5б). Масштабы эмиграции, полученные вероятностным анализом объемно-генетического метода, варьируют от 0,8 до 1,4 (P50 = 1,1) млрд т нефти (рис. 5в) и 1,8–3,0 (P50 = 2,4) трлн м³ газа (рис. 5г). Плотность генерации (P50) составляет 42,2–337,6 тыс. т/км² нефти и 40,1–801,1 млн м³/км² газа. Плотность эмиграции (P50) составляет 2,1–302,7 тыс. т/км² и 35,9–716,7 млн м³/км² для нефти и газа соответственно.

Выводы

В результате проведенных исследований получены возможные масштабы генерации и эмиграции жидких и газообразных УВ. Суммарно выявленные НГМП рифейского

возраста могли генерировать от 33,1 до 86,5 млрд т нефти и от 57,7 до 174,2 трлн м³ газа. При этом мигрировала из НГМП большая часть углеводородов: от 23,1 до 68,3 млрд т нефти и от 52,2 до 158,6 трлн м³ газа.

Данных объемов достаточно (с учетом пессимистических оценок, что в процессе миграции рассеивалось 95–99% углеводородов) для формирования крупных скоплений нефти и газа в верхнепротерозойской системе ловушек. Ключевым фактором выступает целостность (сохранность) древних ловушек. Длительная геологическая история региона, включавшая периоды тектонической активизации, поднятий и эрозии, могла привести к нарушению герметичности покрышек и полному или частичному разрушению ранее сформированных месторождений. Полученные результаты могут быть использованы при планировании геолого-разведочных работ на нефть и газ в пределах Анабаро-Ленской краевой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баженова Т.К., и др.* Масштабы нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции на юго-западе Сибирской платформы. Разведка и охрана недр. 2014. № 10. С. 12–17.
2. *Большакова М.А. и др.* О классификации нефтегазоматеринских пород. Георесурсы. 2025. Т. 27. № 2. С. 54–63. DOI: 10.18599/grs.2025.2.5
3. *Большакова М.А., Ситар К.А., Кожанов Д.Д.* Об особенностях состава и свойств древних нефтегазоматеринских отложений. Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 700–707. EDN: MKTALQ
4. *Ботнева Т.А., Фролов С.В.* Условия образования углеводородных скоплений в осадочном чехле Енисей-Ленской системы прогибов. Геология нефти и газа. 1995. № 5. С. 32–38.
5. *Вараксина И.В., Шаваров Р.Д.* Литология и коллекторские свойства докембрийских отложений Лено-Анабарской нефтегазоносной области. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 9. С. 159–169.
6. *Горлов Д.А., Левшунова С.П.* Прогноз зон раздельного нефтегазоаккумуляции в отложениях кунямской и иниканской свит нижнего-среднего кембрия Восточной Сибири. Геология нефти и газа. 2022. № 2. С. 67–77. DOI: 10.31087/0016-7894-2022-2-67-77
7. *Горохов И.М. и др.* Раннерифейская билляхская серия Анабарского поднятия, Северная Сибирь: изотопная С, О геохимия и Pb-Pb возраст доломитов. Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2019. Т. 27. № 5. С. 19–35. DOI: 10.31857/S0869-592X27519-35
8. *Калабин В.В., Лопатин Н.В., Горшков А.С., Тихонов И.В.* Нефтегазовые информационные системы Анабаро-Хатангской седловины. Геоинформатика. 2013. № 1. С. 21–27.
9. *Карпинчик Г.О., Савельев А.Д., Середа Е.Е.* Петрографические особенности и реконструкция источников сноса нижнерифейских песчаников мукунжской серии юго-востока Анабарского щита. Литосфера. 2025. Т. 25. № 3. С. 373–397.
10. *Каширцев В.А., Конторович А.Э., Сафронов А.Ф., Иванов В.Л.* Месторождения природных битумов на северо-востоке Сибирской платформы (Российский сектор Арктики) Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 93–105.
11. *Конторович А.Э., Буриштейн Л.М., Губин И.А., Парфенова Т.М., Сафронов П.И.* Глубокопогруженные нефтегазовые системы нижнего палеозоя на востоке Сибирской платформы: геолого-геофизическая характеристика, оценка ресурсов углеводородов. Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 721–737. EDN: WDBEOS
12. *Лежнин Д.С., Афанащенко А.П., Соболев П.Н., Найденов Л.Ф.* Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Хатангско-Ленского междуречья. Геология нефти и газа. 2021. № 4. С. 7–28. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-4-7-28
13. *Неручев С.Г., Моисеева О.Б., Климова Л.И., Смирнов С.В.* Моделирование процессов миграции и аккумуляции нефти и газа в ловушках. Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 8. С. 1145–1164.
14. *Неручев С.Г., Смирнов С.В.* Оценка потенциальных ресурсов углеводородов на основе моделирования процессов их генерации и формирования месторождений нефти и газа. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2007. Т. 2. С. 13.

15. Нижняя граница рифея и строматолиты афебия. Труды Геологического института. Вып. 312. М.: Наука, 1978.
16. Песков Д.В., Жарков А.М., Антонова М.А., Мартынов А.В. Углеводородный потенциал древних ловушек Лено-Анабарского региона и условия его реализации. Научный журнал Российского газового общества. 2024. № 4(46). С. 28–35.
17. Прищепа О.М. Комплексный способ количественной оценки ресурсов нефти и газа в зонах нефтегазонакопления. Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2011. Т. 6. № 4. С. 14.
18. Савченко В.И., Ступакова А.В., Перетолчин К.А. О перспективах наличия крупных месторождений нефти и газа на Восточном Таймыре. Георесурсы. 2017. № Спецвыпуск, ч. 1. С. 186–193. DOI: 10.18599/grs.19.19
19. Khudoley A.K. et al. Anabar-Lena composite tectono-sedimentary element, northern East Siberia. Geological Society, London, Memoirs. 2025. Vol. 57. No. 1. P. M57–2021–29. DOI: 10.1144/M57-2023-4
20. Nagovitsin K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform. Precambrian Research. 2015. Vol. 270. P. 226–245. DOI: 10.1016/j.precamres.2015.09.012
21. Prischepa O., Nefedov Y., Nikiforova V., Ruiming X. Raw material base of Russia's unconventional oil and gas reserves (hydrocarbons shale strata). Frontiers in Earth Science. 2022. Vol. 10. P. 22. DOI: 10.3389/feart.2022.958315
22. Prischepa O., et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation. Frontiers in Earth Science. 2023. Vol. 11. P. 22. DOI: 10.3389/feart.2023.1192051

REFERENCES

1. Bazhenova T.K., et al. Scales of oil and gas generation and oil and gas accumulation in the southwest of the Siberian Platform. Exploration and Conservation of Mineral Resources. 2014. No. 10. Pp. 12–17 (In Russ.).
2. Bolshakova M.A., et al. On the classification of oil and gas source rocks. Georesursy. 2025. Vol. 27. No. 2. Pp. 54–63 (In Russ.). DOI: 10.18599/grs.2025.2.5
3. Bolshakova M.A., Sitar K.A., Kozhanov D.D. On the features of composition and properties of ancient oil and gas source deposits. Journal of Mining Institute. 2024. Vol. 269. P. 700–707 (In Russ.). EDN: MKTALQ.
4. Botneva T.A., Frolov S.V. Conditions for the formation of hydrocarbon accumulations in the sedimentary cover of the Yenisei-Lena system of troughs. Geology of Oil and Gas. 1995. No. 5. P. 32–38 (In Russ.).
5. Varaksina I.V., Shavarov R.D. Lithology and reservoir properties of Precambrian deposits in the Leno-Anabar oil and gas bearing area. Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020. Vol. 331. No. 9. P. 159–169 (In Russ.).
6. Gorlov D.A., Levshunova S.P. Forecast of zones of separate oil and gas accumulation in the deposits of the Kuonam and Inikan suites of the Lower-Middle Cambrian in Eastern Siberia. Geology of Oil and Gas. 2022. No. 2. P. 67–77 (In Russ.). DOI: 10.31087/0016-7894-2022-2-67-77
7. Gorokhov I.M., et al. Early Riphean Billyakh Series of the Anabar Uplift, Northern Siberia: isotopic C, O geochemistry and Pb-Pb age of dolomites. Stratigraphy and Geological Correlation. 2019. Vol. 27. No. 5. P. 19–35 (In Russ.). DOI: 10.31857/S0869-592X27519-35
8. Kalabin V.V., Lopatin N.V., Gorshkov A.S., Tikhonov I.V. Oil and gas information systems of the Anabar-Khatanga saddle. Geoinformatics. 2013. No. 1. P. 21–27 (In Russ.).
9. Karpinchik G.O., Savel'ev A.D., Sereda E.E. Petrographic features and reconstruction of provenance of Lower Riphean sandstones of the Mukun Series in the southeast of the Anabar Shield. Lithosphere. 2025. Vol. 25. No. 3. P. 373–397 (In Russ.).
10. Kashirtsev V.A., Kontorovich A.E., Safronov A.F., Ivanov V.L. Deposits of natural bitumens in the northeast of the Siberian Platform (Russian sector of the Arctic). Russian Geology and Geophysics. 2010. Vol. 51. No. 1. P. 93–105 (In Russ.).
11. Kontorovich A.E., Burstein L.M., Gubin I.A., Parfenova T.M., Safronov P.I. Deeply buried oil and gas systems of the Lower Paleozoic in the east of the Siberian Platform: geological and geophysical characteristics, assessment of hydrocarbon resources. Journal of Mining Institute. 2024. Vol. 269. P. 721–737 (In Russ.). EDN: WDBEOS
12. Lezhnin D.S., Afanasenkov A.P., Sobolev P.N., Naidev L.F. Geological state and oil and gas potential prospects of the Riphean-Paleozoic deposits of the Khatanga-Lena interfluvium. Geology of Oil and Gas. 2021. No. 4. P. 7–28. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-4-7-28. (In Russ.)
13. Neruchev S.G., Moiseeva O.B., Klimova L.I., Smirnov S.V. Modeling of migration and accumulation processes of oil and gas in traps. Russian Geology and Geophysics. 2000. Vol. 41. No. 8. P. 1145–1164 (In Russ.).
14. Neruchev S.G., Smirnov S.V. Estimation of potential hydrocarbon resources on the basis of modelling the processes of their generation and formation of oil and gas fields. Oil and Gas Geology. Theory and practice. 2007. No. 2. P. 13 (In Russ.).
15. Lower boundary of the Riphean and Aphyibia stromatolites. Proceedings of the Geological Institute. Iss. 312. Moscow: Nauka, 1978 (In Russ.).

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ / GEOLOGY AND PROSPECTING FOR HYDROCARBON RESERVES

16. Peskov D.V., Zharkov A.M., Antonova M.A., Martynov A.V. Hydrocarbon potential of ancient traps in the Leno-Anabar region and conditions for its realization. *Scientific Journal of the Russian Gas Society*. 2024. No. 4(46). P. 28–35 (In Russ.).
17. Prishchepa O.M. Comprehensive method for quantitative assessment of oil and gas resources in oil and gas accumulation zones. *Petroleum Geology: Theory and Practice*. 2011. Vol. 6. No. 4. P. 14 (In Russ.).
18. Savchenko V.I., Stupakova A.V., Peretolchin K.A. On the prospects for the presence of large oil and gas fields in Eastern Taimyr. *Georesursy*. 2017. No. Special issue pt. 1. P. 186–193 (In Russ.). DOI: 10.18599/grs.19.19
19. Khudoley A.K., et al. Anabar-Lena composite tectono-sedimentary element, northern East Siberia. *Geological Society, London, Memoirs*. 2025. Vol. 57. No. 1. P. M57–2021–29 (In Russ.). DOI: 10.1144/M57-2023-4
20. Nagovitsin K.E., Rogov V.I., Marusin V.V., Karlova G.A., Kolesnikov A.V., Bykova N.V., Grazhdankin D.V. Revised Neoproterozoic and Terreneuvian stratigraphy of the Lena-Anabar Basin and north-western slope of the Olenek Uplift, Siberian Platform. *Precambrian Research*. 2015. Vol. 270. P. 226–245 (In Russ.). DOI: 10.1016/j.precamres.2015.09.012
21. Prishchepa O., Nefedov Y., Nikiforova V., Ruiming X. Raw material base of Russia's unconventional oil and gas reserves (hydrocarbons shale strata). *Frontiers in Earth Science*. 2022. Vol. 10. P. 22. DOI: 10.3389/feart.2022.958315
22. Prishchepa O., et al. Theoretical and methodological approaches to identifying deep accumulations of oil and gas in oil and gas basins of the Russian Federation. *Frontiers in Earth Science*. 2023. Vol. 11. P. 22. DOI: 10.3389/feart.2023.1192051

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Песков Д.В. — выполнил оценку генерационного потенциала рифейских осадочных отложений объемно-генетическим методом, обработал статистические данные и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Жарков А.М. — разработал концепцию статьи, подготовил раздел «Введение», окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Кравченко М.А. — проанализировала исходную информацию, подготовила раздел «Нефтегазоматеринские свиты», а также участвовала в написании раздела «Материалы и методы» и согласна взять на себя ответственность за все аспекты работы.

Лукогорский И.Н. — подготовил перевод аннотации на английский язык, участвовал в подготовке раздела «Параметры моделирования» и согласен взять на себя ответственность за все аспекты работы.

Челнакова Е.Н. — участвовала в написании раздела «Параметры моделирования», а также подготовке списка литературы и согласна взять на себя ответственность за все аспекты работы.

Dmitry V. Peskov — performed the assessment of the generative potential of the Riphean sedimentary deposits using the volumetric-genetic method, processed the statistical data, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Alexander M. Zharkov — developed the conceptual framework of the paper, prepared the Introduction section, approved the final version of the manuscript for publication, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Milena A. Kravchenko — analyzed the source data, prepared the section «Source rock suites», contributed to writing the «Materials and Methods» section, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Ivan N. Lukogorsky — prepared the English translation of the abstract, participated in preparing the «Modeling Parameters» section, and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Ekaterina N. Chelnakova — participated in writing the section «Modeling parameters», as well as preparing the list of references and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Песков Дмитрий Владимирович* — инженер проблемной лаборатории «Наука о Земле» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».
2, 21 линия, Васильевский остров, Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: Peskov_DV@pers.spmi.ru
тел.: +7 (812) 328-81-77, внутр. 1177
SPIN-код: 7709-5734
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8905-5519>

Жарков Александр Михайлович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии нефти и газа, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».
2, 21 линия, Васильевский остров, Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: Zharkov_AM@pers.spmi.ru
тел.: +7 (812) 328-81-77, внутр. 1177
SPIN-код: 7092-0109
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7326-1664>

Кравченко Милена Алексеевна — инженер I категории отдела геолого-гидродинамического моделирования службы разработки месторождений и геолого-разведочных работ инженерно-технического центра ООО «Газпром добыча Оренбург».
1/2, ул. Чкалова, Оренбург, 460058, Россия
e-mail: m.kravchenko@gdo.gazprom.ru
тел.: +7 (3532) 73-10-18

Лукогорский Иван Николаевич — инженер 1 категории отдела геолого-буровых работ ООО «Газпром инвест».
6, лит. Д, ул. Стартовая, Санкт-Петербург, 196210, Россия
e-mail: lukogorsky@mail.ru
тел.: +7 (812) 455-17-00, внутр. 34324
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6485-938X>

Челнакова Екатерина Николаевна — аспирант кафедры геологии нефти и газа ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».
2, 21 линия, Васильевский остров, Санкт-Петербург 199106, Россия
e-mail: etchelnakova@yandex.ru

Dmitry V. Peskov* — Engineer, Earth Science Problem Laboratory, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University.
2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia
e-mail: Peskov_DV@pers.spmi.ru
tel.: +7 (812) 328-81-77, ext. 1177
SPIN-code: 7709-5734
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8905-5519>

Alexander M. Zharkov — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Department of Geology of Oil and Gas Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University.
2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia
e-mail: Zharkov_AM@pers.spmi.ru
tel.: +7 (812) 328-81-77, ext. 1177
SPIN-code: 7092-0109
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7326-1664>

Milena A. Kravchenko — 1st-category Engineer, Department of Geological-Hydrodynamic Modeling, Field Development and Geological Exploration Service, Engineering and Technical Center, Gazprom Dobycha Orenburg LLC.
1/2, Chkalova str., Orenburg, 460058, Russia
e-mail: m.kravchenko@gdo.gazprom.ru
tel.: +7 (3532) 73-10-18

Ivan N. Lukogorsky — 1st-category Engineer, Department of Geological and Drilling Operations, Gazprom Invest LLC.
6, lit.D, Startovaya str., St. Petersburg, 196210, Russia
e-mail: lukogorsky@mail.ru
tel.: +7 (812) 455-17-00, ext. 34324
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6485-938X>

Ekaterina N. Chelnakova — Post-graduate student, Department of Geology of Oil and Gas, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University.
2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia
e-mail: etchelnakova@yandex.ru



ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ НИЖНЕПЕРМСКИХ ПОДСОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ПРАВОБЕРЕЖНОГО УЧАСТКА АСТРАХАНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.А. ГОРБУНОВ*

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Подсолевые нижнепермские отложения юга Прикаспийской впадины рассматриваются как одно из основных направлений поисков и наращивания ресурсной базы углеводородов (Воронин и др., 1991; Федорова и Быстрова, 2010; Бабашева и др., 2023; Меркулов и др., 2023, 2024). На значительный углеводородный потенциал этой части разреза указывают многочисленные нефтегазопроявления и промышленные притоки углеводородов из филипповских отложений нижней перми, установленные в скважинах Астраханского свода и сопредельных территориях Астраханско-Калмыцкого сектора Прикаспийской впадины. Однако освоение этой части разреза, осложненного соляной тектоникой, затруднено, так как применяемые стандартные методы интерпретации сейсмических данных не позволяют с достаточно высокой детальностью изучать внутреннее строение толщи и не позволяют разработать ее надежную геологическую модель. Преодоление указанной проблемы возможно за счет применения полнообъемной интерпретации — одного из наиболее современных методов, применяемых при разработке геологических моделей сложнопостроенных участков недр.

Цель. Разработка модели геологического строения подсолевых отложений нижней перми Правобережного участка АГКМ и оценка их перспектив нефтегазоносности с применением технологии полнообъемной интерпретации сейсморазведочных данных.

Материалы и методы. Для разработки геологической модели Правобережного участка АГКМ использованы результаты сейсморазведочных работ МОГТ 3D в объеме 800 км², результаты интерпретации материалов ГИС по скважинам, расположенным в пределах изучаемой территории, а также опубликованные материалы, характеризующие геологическое строение и развитие осадочного чехла южной части Прикаспийской впадины.

Результаты. Разработана модель геологического строения подсолевых отложений нижней перми Правобережного участка АГКМ, выделены крупные перспективные объекты антиклинального типа, рекомендованные для дальнейшего изучения.

Ключевые слова: Прикаспийская впадина, Правобережный участок АГКМ, трехмерная сейсморазведка, полнообъемная интерпретация, филипповские отложения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 124091700015–2.

Для цитирования: Горбунов А.А. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности нижнепермских подсолевых отложений Правобережного участка Астраханского газоконденсатного месторождения. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2026;68(1):90—98. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-90-98> EDN: [IZMSXL](https://edn.ru/IZMSXL)

Статья поступила в редакцию 26.02.2026

Принята к публикации 30.03.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

GEOLOGICAL SETTING AND HYDROCARBON PROSPECTS OF THE LOWER PERMIAN SUBSALT SUCCESSION WITHIN THE RIGHT-BANK SECTOR OF THE ASTRAKHAN GAS CONDENSATE FIELD

ALEKSEI A. GORBUNOV*

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. The subsalt Lower Permian rocks in the southern Pre-Caspian Basin are recognized as a primary target for further hydrocarbon exploration (Voronin et al., 1991; Fedorova and Bystrova, 2010; Babasheva et al.; 2023; Merkulov et al.; 2023, 2024). Their considerable potential is evidenced by numerous oil and gas shows and commercial hydrocarbon inflows from the Lower Permian Filippovsky sediments, identified in wells within the Astrakhan Arch and adjacent areas of the Astrakhan-Kalmyk sector of the Pre-Caspian Basin. However, the development of this succession is complicated by active salt tectonics. Conventional seismic interpretation techniques are insufficient for resolving the internal structure of these formations or constructing reliable geological models. These challenges can be addressed through the application of full-volume seismic interpretation, one of the most advanced methods for constructing geological models of complex subsurface areas.

Aim. To construct a geological model of the Lower Permian subsalt deposits within the Right-Bank sector of the Astrakhan Gas Condensate Field (AGCF) and to evaluate their hydrocarbon potential using full-volume seismic interpretation technology.

Materials and methods. Geological modelling of the Pravoberezhny section of the AGCF was conducted based on the results of 3D common depth point seismic surveys covering 800 km², well log data on the study area, and published materials on the geological structure and development of the sedimentary cover in the southern Pre-Caspian Basin.

Results. A geological model of the Lower Permian subsalt deposits in the Pravoberezhny section of the AGCF was developed. Large anticline-type objects recommended for further study were identified.

Keywords: Pre-Caspian Basin, Pravoberezhny section of the Astrakhan Gas Condensate Field, 3D seismic full-volume seismic interpretation technology, Philipovian sediments

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. 124091700015–2.

For citation: Gorbunov A.A. Geological setting and hydrocarbon prospects of the lower permian subsalt succession within the Right-Bank sector of the Astrakhan gas condensate field. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):90–98. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-90-98> EDN: [IZMSXL](https://www.edn.ru/)

Manuscript received 26 February 2026

Accepted 30 March 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Нефтегазоносность филипповских пород нижней перми установлена на 70 площадях, расположенных в пределах северо-восточного борта Прикаспийской впадины [12]. На юге

впадины признаки нефтегазоносности филипповского интервала установлены более 30 лет назад. По данным Н.И. Воронина, первые интенсивные газопроявления установлены в пределах Каракульско-Смушковской зоны поднятий при вскрытии

кунгурских сульфатно-карбонатных пород в скважине Алексеевская-5, нефтепроявления — в скважине Чкаловская-3 [4]. Нефтеводопроявления зафиксированы также на западе — в пределах Карасальской моноклинали. Позднее нефтегазопроявления в филипповских отложениях, включавшие притоки нефти и газа, перетоки из межколонного пространства, примазки нефти в керне, а также газопроявления в виде разгазирования бурового раствора и повышенных показаний по газовому каротажу отложений зафиксированы в процессе бурения 38 разведочных и эксплуатационных скважин в центральной части Астраханского свода при разведке и вводе в промышленную эксплуатацию башкирской залежи АГКМ [4, 12].

В связи с изложенным нижнепермские породы юга Прикаспийской впадины рассматриваются в качестве одного из основных направлений наращивания ресурсной базы углеводородов [2, 4, 9, 10, 12]. В настоящее время, по мнению Н.И. Воронина, Н.Ф. Федоровой, И.В. Быстровой и др., практический интерес может представлять центральная часть Астраханского ГКМ, где филипповские породы залегают в интервале 3750–3900 м [4, 12]. По мнению автора настоящего исследования, углеводородный потенциал могут также представлять филипповские отложения Правобережного участка АГКМ, признаки нефтеносности нижнепермских отложений установлены при испытаниях в эксплуатационной колонне параметрической скважины Пионерская-1. При этом в интервалах 3842–3892, 3905–3935, 3892–3900 м был получен незначительный приток нефти дебитом 0,15 м³/сут. при динамическом уровне 2180 м.

Однако освоение этой части разреза, осложненного соляной тектоникой, затруднено, так как применяемые стандартные методы интерпретации сейсмических данных не позволяют с достаточно высокой детальностью изучать внутреннее строение толщи и не позволяют разработать ее надежную геологическую модель [1, 3, 13]. Преодоление указанной проблемы возможно за счет применения полнообъемной интерпретации — одного из наиболее современных методов, применяемых при разработке геологических моделей сложностроенных участков недр.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка модели геологического строения подсолевых отложений нижней перми Правобережного участка АГКМ и оценка их перспектив нефтегазосности с применением технологии полнообъемной интерпретации сейсморазведочных данных.



Рис. 1. Обзорная схема района работ
Fig. 1. Regional setting of the studied area

Характеристика объекта исследования

Объектом изучения является Правобережный участок АГКМ, расположенный на юго-западе Прикаспийской низменности (рис. 1). Участок принадлежит западной Правобережной части Астраханского газоконденсатного месторождения, которое относится к Астраханскому газоносному району Калмыцко-Астраханской нефтегазосной области Прикаспийской нефтегазосной провинции [7, 8]. Башкирская залежь Астраханского газоконденсатного месторождения приурочена к верхней части карбонатного массива. По размерам оцененных запасов УВ месторождение является уникальным [11].

С 1977 г. на Правобережном участке АГКМ проводится сейсморазведка 2Д, а с 2001 г. — трехмерные сейсморазведочные работы. Общий выполненный объем трехмерной сейсморазведки в настоящее время достиг 920 км². Бурение проводилось, как правило, вместе с сейсморазведочными работами и было направлено преимущественно на изучение башкирских отложений среднего карбона. Общий метраж глубокого параметрического и поисково-разведочного бурения на Правобережном участке Астраханского месторождения составляет 66 985 м. К настоящему времени в пределах участка пробурены 19 скважин. Из них только семь вскрыли башкирские отложения,

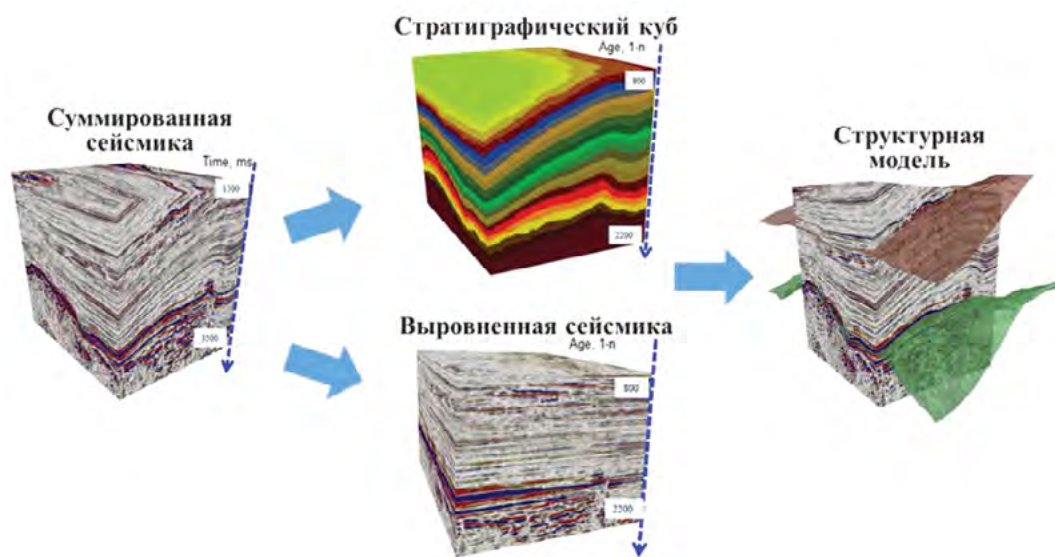


Рис. 2. Формирование полнообъемной сейсмогеологической модели по технологии SAI
Fig. 2. SAI Workflow

включая скважины 1–4 на Долгожданной площади, 1 — на Воложковской, а также скважины 36 и 72 Астраханские. С 1984 г. бурение разведочных и эксплуатационных скважин на участке не проводилось.

В осадочном разрезе в пределах изучаемой территории выделяются надсолевой и подсолевой крупные стратиграфические комплексы, разделенные соленосной кунгурской толщей. Надсолевой комплекс включает терригенные отложения верхней перми-квартера, подсолевой — терригенно-карбонатные породы от девона до нижней перми. В подсолевых отложениях выделяются четыре основных нефтегазоносных комплекса (НГК): нижне-среднедевонский, среднедевонско-нижнефранский, верхнедевонско-турнейский и визейско-башкирский. К слабо изученным относится подсолевой нижнепермский НГК (артинско-сакмарский и филипповский подкомплексы). Нефтегазоносность глубокозалегающих отложений D_1-C_1 в пределах изучаемого участка не подтверждена бурением. Однако результаты бурения и опробования 6 глубоких скважин, пробуренных на левобережье Астраханского свода, а также данные опробования скважины Правобережная-1, расположенной вблизи Правобережного участка Астраханского месторождения, указывают на его возможные перспективы. Нефтепроявления в филипповских отложениях установлены в скв. Пионерская-1, где в интервале 3846–3936 м получено 2,3 м³ смеси фильтрата бурового раствора и нефти, в скв. Воложковская-1.

Материалы и методы

Для разработки геологической модели Правобережного участка АГКМ использованы результаты сейсморазведочных работ МОГТ 3D в объеме 800 км², результаты интерпретации материалов ГИС по 19 скважинам, расположенным в пределах изучаемой территории, а также опубликованные материалы, характеризующие геологическое строение и развитие осадочного чехла южной части Прикаспийской впадины. Для решения поставленных задач выполнена полнообъемная интерпретация глубинного сейсмического куба МОГТ 3D в объеме 800 км².

Технология полнообъемной интерпретация (SAI) использует специальные алгоритмы, которые позволяют проследить отражающие горизонты, интерпретируемые как геологические границы, и устанавливать их предполагаемые стратиграфические взаимоотношения. В результате исходные суммированные сейсморазведочные данные трансформируются в трехмерный грид — «Стратиграфический куб» (СК), в каждой ячейке которого определен относительный возраст осадконакопления [14]. В рамках контроля качества получаемой полнообъемной модели выполняется объемное выравнивание исходных суммированных сейсморазведочных данных с использованием трехмерного грида Стратиграфического куба. Критерием качества является горизонтальное расположение всех осей синфазности после выравнивания (рис. 2).

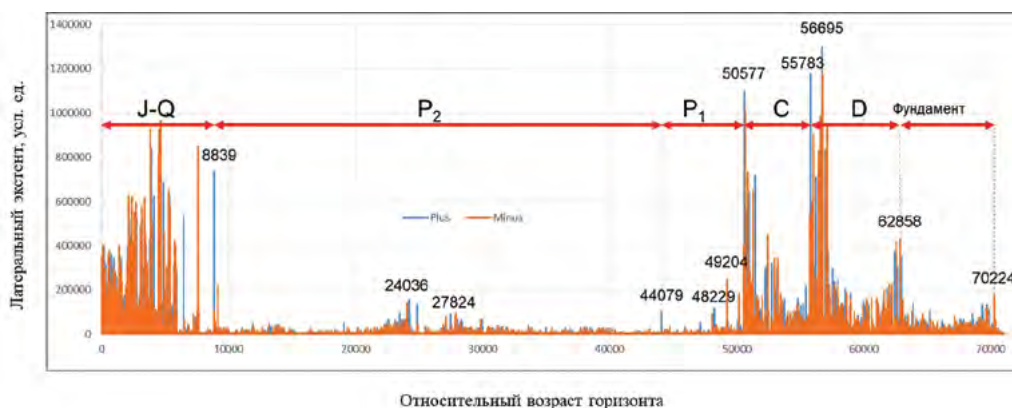


Рис. 3. График выдержанности горизонтов стратиграфического куба Правобережного участка. По горизонтали — относительный возраст СК, по вертикали — латеральный экстенд рефлектора в условных единицах
Fig. 3. Majority Chart for the Right-Bank sector of the Astrakhan Gas Condensate Field. On the horizontal axis is the relative age of the SC, on the vertical axis is the lateral extent of the reflector in arbitrary units

На основе стратиграфического куба формируется график выдержанности осей синфазности, отражающий их латеральный экстенд. Наиболее выдержанные рефлекторы рассматриваются в качестве геологических границ, соответствующих значимым геологическим событиям, которые разделяют чехол на комплексы, различающиеся условиями осадконакопления. Затем для всего осадочного разреза, отраженного на сейсмической записи, из наиболее протяженных временных границ формируется анимированная модель, которая, как правило, включает несколько сотен поверхностей. Анализ анимированной модели позволяет получить информацию о геологических процессах, протекавших в бассейне, установить наиболее важные аспекты формирования осадочных комплексов. С учетом проведенного анализа для формирования геологической модели выбираются поверхности, наиболее информативно отражающие развитие бассейна и позволяющие эффективно решать поставленные геологические задачи.

Результаты

В результате проведенной полнообъемной сейсмической интерпретации с использованием технологии SAI построен стратиграфический куб, включающий 70 224 горизонта и характеризующий строение разреза в пределах изучаемой территории от 0 до 11 км.

На рисунке 3 приведен график выдержанности горизонтов стратиграфического куба. Анализ графика показывает, что изученный сейсморазведкой разрез включает 6 ключевых интервалов. Первый интервал охватывает диапазон относительных возрастов от 0 до 8839, второй — от 8839 до 44 079,

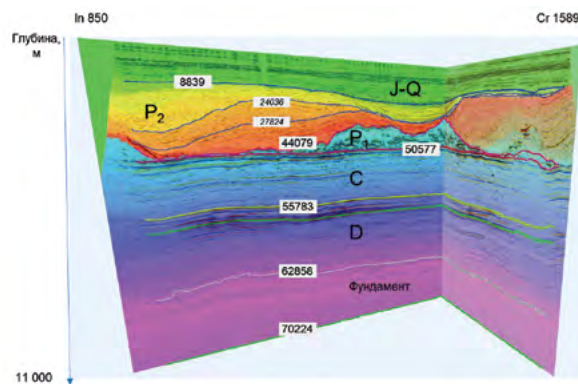


Рис. 4. Положение ключевых горизонтов на сечении сейсмического куба. Цвет отражает относительный возраст стратиграфического куба
Fig. 4. Key seismic horizons at the seismic cube section. The color reflects the relative age of the stratigraphic cube

третий — от 44 079 до 50 577, четвертый — от 50 577 до 55 783, пятый — от 55 783 до 62 858, шестой — от 62 858 до 70 224.

С учетом совместной интерпретации результатов полнообъемной интерпретации и возрастные отбивки в скважинах установлено, что первый интервал соответствует мезозойско-кайнозойским отложениям, второй охватывает породы верхней перми — триаса, третий — нижнепермские образования. Четвертый и пятый интервалы, соответствующие каменноугольным и девонским отложениям, подстилаются породами, отнесенным к фундаменту.

На рисунке 4 показано положение наиболее выдержанных горизонтов с указанием их относительных возрастов на фоне сейсмической записи на пересечении инлайна 850 и кросслайна 1589 проинтерпретированного сейсмического куба.

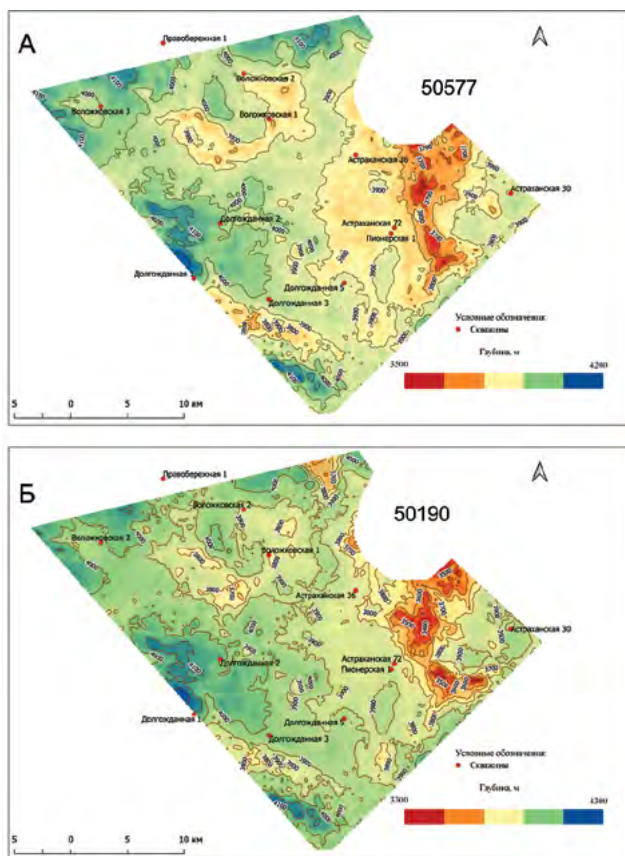


Рис. 5. Структурные карты поверхностей 50577 (А) и 50190 (Б) вблизи кровли артинского горизонта нижней перми

Fig. 5. Structural maps of surfaces 50577 (A) and 50190 (B) near the top of the Artinsky horizon of the Lower Permian

Вблизи кровли артинских отложений изучены горизонт 50577 и вышележащий — 50190 (рис. 5). Диапазон залегания артинских отложений в пределах изучаемого участка АГКМ составляет 4300–3300 м. Структурный план горизонта 50577, приуроченного к несогласию на границе каменноугольных и пермских отложений, наследуется от поверхности в кровле башкирских отложений, но при этом характеризуется меньшей расчлененностью, так как после перерыва в осадконакоплении и размыва части каменноугольных пород пермские отложения заполняли неоднородности поверхности несогласия, что подтверждается еще менее контрастным рельефом вышележащего горизонта 50190.

Поверхности 49204, 48229 и 44079 отражают строение филипповского горизонта, расположенного в нижней части кунгурского яруса нижней перми (рис. 6).

Эта часть разреза характеризуется сложной внутренней структурой, обусловленной присутствием карбонатных органогенных построек (рис. 6, 7). Глубина залегания подошвы филипповских отложений варьирует от 4100 до 3400 м, кровли — от 4000 до 2800 м.

Карбонатные постройки филипповского горизонта широко развиты в пределах изучаемого участка (рис. 6). Они отличаются площадью и высотой. При этом выделяются два крупных кластера, расположенных в западной и восточной частях исследуемой территории, которые могут представлять поисковый интерес и требуют дальнейшего изучения разведочным бурением.

Обсуждение результатов

Анализ опубликованных материалов показывает, что в нижнепермских отложениях Астраханского свода выделяют две толщи: нижнюю — ассельско-сакмаро-артинскую и верхнюю — филипповскую. Нижняя, сложенная кремнисто-глинисто-карбонатными отложениями, обладает хорошим генерационным потенциалом и, по мнению ряда исследователей, может в том числе представлять интерес в качестве источника сланцевых УВ [5, 6, 10, 15]. Формирование отложений происходило в относительно глубоководных, удаленных от источников сноса обстановках, что способствовало накоплению преимущественно сапропелевого ОВ. При этом доля пород, обладающих генерационным потенциалом, увеличивается вверх по разрезу от эпизодического присутствия в нижней пачке до 60–70% в верхнем интервале. В отдельных образцах водородный индекс (HI) достигает 350–377 мг УВ/г $C_{орг.}$, а содержание органического углерода — 7,38% [9, 10].

В филипповское время соленость морского бассейна сильно возросла. В результате сформировались карбонатно-сульфатные и сульфатные отложения. Отложения филипповского горизонта, представленные карбонатно-ангидритовой толщей с пачкой «плойчатых» доломитов в основании, залегают на нижнепермских артинских породах. Толщина филипповского горизонта в центральной части Астраханского НГКМ варьирует от 150–160 до 200–300 м, общая толщина «плойчатых» доломитов изменяется в широких пределах от первых метров до 80–90 м и преимущественно составляет около 50 м [12]. В пачке доломитов выделяются реперные пласты доломитизированных известняков R-1 и R-2 мощностью соответственно 15–20 и 5–9 м. На северном склоне Астраханского свода толщина пачки «плойчатых доломитов» сокращается

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ /
GEOLOGY AND PROSPECTING FOR HYDROCARBON RESERVES

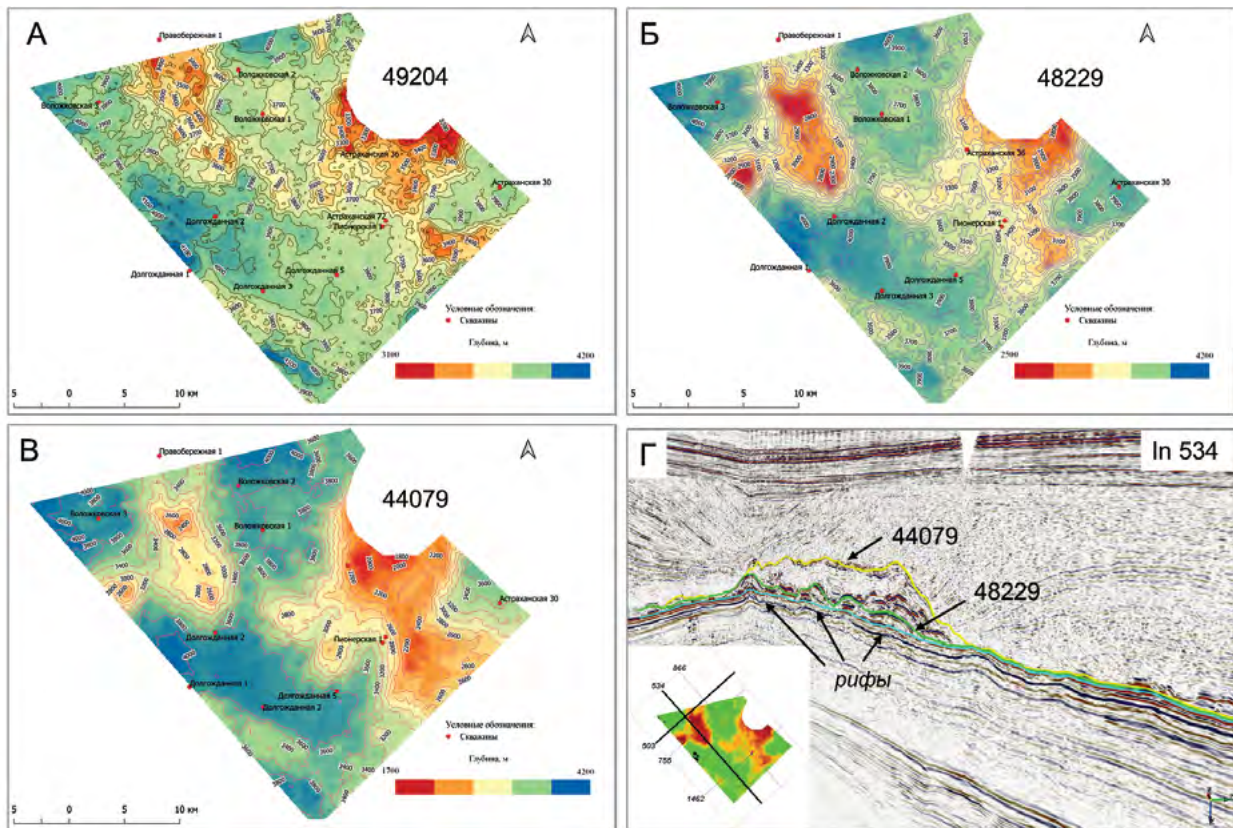


Рис. 6. Карты поверхностей филипповского интервала кунгурских отложений (А–В). Сечение сейсмического куба, отражающее строение филипповских карбонатных биогермных построек (Г)
Fig. 6. Surface maps of the Filippovsky horizon of Kungurian deposits (A–B). Seismic cube section reflecting the structure of the Filippovsky reef structures (Г)

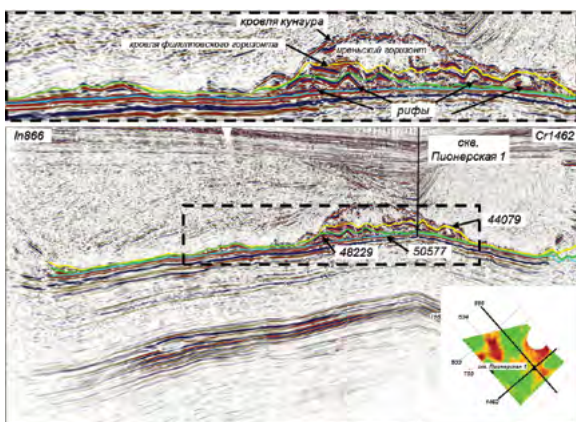


Рис. 7. Внутреннее строение нижнепермской рифовой постройки
Fig. 7. The internal structure of the Lower Permian reef structure

и составляет 7–28 м. Реперные карбонатные пласты там маломощные (2–3 м) или отсутствуют [9, 10]. В юго-западном направлении мощность

нижнепермских отложений возрастает. Так, по результатам ГИС в скважинах Правобережного участка АГКМ мощность филипповских пород варьирует от сотен метров до полутора километров и более при глубине залегания от 1700 до 4200 м. Результаты проведенных исследований показали, что в пределах Правобережного участка АГКМ внутреннее строение филипповских отложений отличается от хорошо изученных центральных и северных областей месторождения присутствием в нижней части биогермных образований, которые формируют две крупные агломерации в его западной и восточной частях. Учитывая, что их максимальная высота достигает 1400 и 1900 м соответственно, рифовые постройки, несомненно, представляют поисковый интерес и могут содержать значительный углеводородный потенциал. Склонные фации восточной агломерации вскрыты скважинами Пионерская-1, Астраханская-72 и Астраханская-36. По данным ГИС, они представлены глинистыми известняками, доломитами, песчаниками и аргиллитами. По аналогии

с сопредельными участками АГКМ пористость филипповских карбонатов, может достигать 16–25%, коэффициент проницаемости — 3,1–32,9 мД [12]. Иреньский горизонт, представленный преимущественно ангидритами и перекрывающий филипповские отложения, и является для них хорошей покрывкой.

Следует отметить, что промышленная нефтеносность нижнепермских отложений установлена на юго-восточном борту Прикаспийской впадины, где на месторождении Кайран открыта залежь нефти, связанная с нижнепермской карбонатной постройкой.

Заключение

Применение технологии полнообъемной интерпретации трехмерных сейсмических данных позволило изучить внутреннее строение сложнопостроенного филипповского интервала нижнепермской части разреза Правобережного участка АГКМ. В результате проведенных исследований разработана модель геологического строения подсолевых отложений нижней перми и выделены крупные перспективные объекты антиклинального типа, представленные карбонатными рифовыми образованиями, рекомендованные для дальнейшего разведочного бурения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астраханский карбонатный массив. Строение и нефтегазоносность. Под ред. Ю.А. Воложа, В.С. Парасыны. М.: Научный мир, 2008. 221 с.
2. Бабашева М.Н., Бабашев В.Н., Панкратов В.Ф., Куанышев Ф.М., Пронин А.П. Поиск нетрадиционных подсолевых месторождений углеводородов в Прикаспийской впадине. Геология нефти и газа. 2023. № 1. С. 67–74. DOI: 10.31087/0016-7894-2023-1-67-74
3. Волож Ю.А., Гогоненков Г.Н., Делия С.В. Углеводородный потенциал глубоких горизонтов Астраханской зоны нефтегазонакопления: проблемы и решения. Геотектоника. 2019. № 3. С. 3–21.
4. Воронин Н.И., Миталев И.А., Макарова А.М., Просянкин Д.Н. Филипповские отложения — новый перспективный горизонт на юго-западе Прикаспийской впадины. Геология нефти и газа. 1991. № 5. С. 41–46.
5. Исказиев К.О., Савинова Л.А., Алмазов Д.О., Ляпунов Ю.В. Перспективы нефтегазоносности глубоководных нижнепермских отложений в пределах восточной части Прикаспийской впадины. Нефтяное хозяйство. 2021. № 5. С. 22–25. DOI: 10.24887/0028-2448-2021-5-22-25
6. Котровский В.В. Геотермические условия образования и размещения залежей углеводородов в осадочном чехле Прикаспийской мегавпадины. Саратов: Изд-во СГУ, 1986. 156 с.
7. Меркулов О.И., Сизинцев С.В., Зинченко И.А., Богачкин А.Б. Перспективные направления геолого-разведочных работ на УВС на территории Волго-Уральской, Прикаспийской и Причерноморско-Северо-Кавказской НГП в рамках реализации стратегии развития МСБ РФ до 2035 г. Недропользование XXI век. 2019. № 3. С. 144–159.
8. Меркулов О.И., Титаренко И.А., Сизинцев С.В. Направления развития минерально-сырьевой базы углеводородов юго-западной части Прикаспийской нефтегазоносной провинции. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2022. № 3–4. С. 15–22.
9. Меркулов О.И., Стенин В.П., Малявин С.Ю., Гонтарев В.В., Роггелин Ю.И. Базовые аспекты формирования углеводородных скоплений в нижнепермских отложениях Астраханского свода. Недра Поволжья и Прикаспия. 2023. № 110. С. 4–11.
10. Меркулов О.И., Стенин В.П., Малявин С.Ю., Щеголов В.Б., Сизинцев С.В. Нижнепермские подсолевые отложения Астраханского свода: перспективное направление поисков нефти в юго-западном Прикаспии. Геология нефти и газа. 2024. № 2. С. 29–40. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-2-29-40
11. Постнова Е.В., Меркулов О.И., Сизинцев С.В. Состояние сырьевой базы углеводородов юго-востока европейской части России и первоочередные направления геолого-разведочных работ. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2017. № 5. С. 4–12.
12. Федорова Н.Ф., Быстрова И.В. Филипповские отложения нижней перми — новый источник углеводородов прикаспийской нефтегазоносной провинции. Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 3. С. 223–227.
13. Шнеерсон М.Б. Современные полевые технологии наземной сейсморазведки. Экспозиция нефть газ. 2019. № 4(71). С. 39–42. DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10032
14. Gorbunov A., Lavrenova E. SAI-advanced solution to geologic objectives. 2018. Preprint. DOI: 10.13140/RG.2.2.30054.47689
15. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence — second revised and enlarged edition. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 699 p.

REFERENCES

1. Volozh Yu.A., Parasyna V.S. (eds.) Astrakhan carbonate massif. Structure and petroleum potential. Moscow: Nauchnyy mir, 2008. 221 p. (In Russ.).
2. Babasheva M.N., Babashev V.N., Pankratov V.F., Kuanyshev F.M., Pronin A.P. Exploration for unconventional subsalt hydrocarbon deposits in the Pre-Caspian Basin. Russian Oil and Gas Geology. 2023. No. 1. P. 67–74 (In Russ.). DOI: 10.31087/0016-7894-2023-1-67-74
3. Volozh Yu.A., Gogonenkov G.N., Deliya S.V. Hydrocarbon potential of deep horizons in the Astrakhan petroleum accumulation zone: problems and solutions. Geotectonics. 2019. No. 3. P. 3–21 (In Russ.).
4. Voronin N.I., Mitalev I.A., Makarova A.M., Prosyankin D.N. Filippovsky deposits — a new promising horizon in the southwest of the Pre-Caspian Basin. Russian Oil and Gas Geology. 1991. No. 5. P. 41–46 (In Russ.).
5. Iskaziev K.O., Savinova L.A., Almazov D.O., Lyapunov Yu.V. Petroleum potential of deep-water Lower Permian deposits within the eastern part of the Pre-Caspian Basin. Oil Industry. 2021. No. 5. P. 22–25 (In Russ.). DOI: 10.24887/0028-2448-2021-5-22-25
6. Kotrovsky V.V. Geothermal conditions for the formation and distribution of hydrocarbon deposits in the sedimentary cover of the Pre-Caspian mega-depression. Saratov: SGU Publishing House, 1986. 156 p. (In Russ.).
7. Merkulov O.I., Sizintsev S.V., Zinchenko I.A., Bogachkin A.B. Promising directions for hydrocarbon exploration in the Volga-Ural, Pre-Caspian, and Black Sea-North Caucasian provinces within the 2035 mineral resource base strategy. Nedropol'zovanie XXI vek, 2019. No. 3. P. 144–159 (In Russ.).
8. Merkulov O.I., Titarenko I.A., Sizintsev S.V. Directions for the development of the hydrocarbon mineral resource base in the southwestern part of the Pre-Caspian petroleum province. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. 2022. No. 3–4. P. 15–22 (In Russ.).
9. Merkulov O.I., Stenin V.P., Malyavin S. Yu., Gontarev V.V., Roggelin Yu.I. Basic aspects of hydrocarbon accumulation formation in the Lower Permian deposits of the Astrakhan Arch. Nedra Povolzh'ya i Prikaspiya. 2023. No. 110. P. 4–11 (In Russ.).
10. Merkulov O.I., Stenin V.P., Malyavin S. Yu., Shcheglov V.B., Sizintsev S.V. Lower Permian subsalt deposits of the Astrakhan Arch: a promising direction for oil exploration in the Southwestern Pre-Caspian region. Russian Oil and Gas Geology. 2024. No. 2. P. 29–40 (In Russ.). DOI: 10.47148/0016-7894-2024-2-29-40
11. Postnova E.V., Merkulov O.I., Sizintsev S.V. State of the hydrocarbon resource base in the southeastern part of European Russia and priority directions for geological exploration. Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie. 2017. No. 5. P. 4–12 (In Russ.).
12. Fedorova N.F., Bystrova I.V. Lower Permian Filippovsky deposits — a new source of hydrocarbons in the Pre-Caspian petroleum province. Geologiya, geografiya i global'naya energiya. 2010. No. 3. P. 223–227 (In Russ.).
13. Shneerson M.B. Modern field technologies for onshore seismic exploration. Ekspozitsiya Neft' Gaz. 2019. No. 4. P. 39–42 (In Russ.). DOI: 10.24411/2076-6785-2019-10032
14. Gorbunov A., Lavrenova E. SAI-advanced solution to geologic objectives. 2018. Preprint. DOI: 10.13140/RG.2.2.30054.47689
15. Tissot B.P., Welte D.H. Petroleum formation and occurrence. 2nd revised and enlarged edition. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 699 p.

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

A.A. Горбунов — выполнил исследование и подготовил статью, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Aleksei A. Gorgunov — conducted the research and prepared the manuscript, finally approved the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Горбунов Алексей Анатольевич* — старший научный сотрудник кафедры геологии и разведки месторождений углеводородов ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия e-mail: Aleksey.a.Gorbunov@gmail.com Тел.: +7 (903) 452-45-93

Aleksey A. Gorbunov* — Senior Researcher at the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya Street, Moscow 117997, Russia e-mail: Aleksey.a.Gorbunov@gmail.com tel.: +7 (903) 452-45-93

ОРИГИНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 504.05

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-99-108>

EDN: [BLTSDU](#)



ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ЛИТОЛОГО-СТРАТИГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Е.А. КРАХИНА*, В.Н. ЭКЗАРЬЯН

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье представлен анализ данных оползневых процессов, наблюдаемых на территории Московской области. Рассматриваются основные факторы формирования и активизации оползневого склона, определяющие их развитие и распространение.

Цель. Выделить основные факторы и условия, способствующие развитию и активизации оползневых процессов на территории Московской области, и охарактеризовать типы в зависимости от литолого-стратиграфических комплексов.

Материалы и методы. Морфологический анализ оползневых процессов, включающий изучение основных параметров: конфигурацию оползневого тела в плане, глубину и крутизну склонов, механизмы смещения породы, высоту стенки срыва. Сравнительный геоморфологический анализ, направленный на выявление общих закономерностей и региональных особенностей оползневых процессов в различных географических зонах и на различных типах склонов.

Результаты. В рамках работы рассмотрены основные закономерности распределения оползней в зависимости от литолого-стратиграфических характеристик и геоморфологических условий.

Заключение. Выделены три основных литолого-стратиграфических комплекса, подверженных оползневому процессам: четвертичные песчано-глинистые отложения, юрские глины (оксфордский ярус) и карбонатные породы с глинистыми прослоями. Каждый из них характеризуется своими особенностями, включая тип смещения, глубину захвата склона и причины возникновения.

Ключевые слова: литолого-стратиграфические комплексы, Московская область, категории оползневого процесса, классификационные признаки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Особенности формирования и развития оползневых процессов Московской области в различных литолого-стратиграфических условиях. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):99—108. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-99-108> EDN: [BLTSDU](#)

Статья поступила в редакцию 01.10.2025

Принята к публикации 22.10.2025

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

FORMATION AND DEVELOPMENT FEATURES OF LANDSLIDE PROCESSES IN MOSCOW OBLAST (RUSSIA) UNDER VARIOUS LITHOLOGICAL AND STRATIGRAPHIC CONDITIONS

ELENA A. KRAKHINA*, VLADIMIR N. EKZARIAN

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. This article presents an analysis of data on landslide processes observed in the Moscow Oblast (Russia). Key factors in the formation and activation of the landslide slope, which determine the development and spreading of landslide processes, are considered.

Aim. To identify the key factors and conditions contributing to the development and activation of landslide processes in the Moscow Oblast, and to characterize their types depending on lithological and stratigraphic complexes.

Materials and methods. The morphological analysis of landslide processes included the study of their main parameters, such as the configuration of the landslide body in plan, the depth and steepness of the slopes, the mechanisms of rock displacement, and the height of the collapse wall. A comparative geomorphological analysis aimed at identifying common patterns and regional features of landslide processes in different geographical areas and on different types of slopes was conducted.

Results. The main patterns of landslide distribution depending on lithological and stratigraphic characteristics and geomorphological conditions were considered.

Conclusion. Three main lithological and stratigraphic complexes, which are subject to landslide processes, have been identified: Quaternary sandy-clay deposits, Jurassic clays (Oxfordian stage), and carbonate rocks with clay interlayers. Each of these types has its own characteristics, including the type of displacement, the depth of slope capture, and the causes of emergence.

Keywords: lithological and stratigraphic complexes, Moscow Oblast, types of landslide processes, classification features

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Krakhina E.A., Ekzarian V.N. Formation and development features of landslide processes in Moscow oblast (Russia) under various lithological and stratigraphic conditions. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):99—108. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-99-108> EDN: [BLTSDU](https://bltsdu.com)

Manuscript received 01 October 2025

Accepted 22 October 2025

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Наиболее подробно история изучения глубоких оползней, развивающихся в глинах юрского возраста, изложена в работах В.В. Кюнтцеля [9, 10]. Ученым было выделено несколько периодов изучения оползневых процессов. Начальный период охватывает первую половину XIX — начало XX веков. Разрабатываются основы стратиграфии региона, устанавливаются

условия залегания и состав горных пород, выявляется нарушенное залегание пород на некоторых участках склонов рек. В 1892 г. вышла сводная работа С.Н. Никитина [12], посвященная геологическому строению центральных районов России. В работе приводилось описание ряда оползневых участков на территории Москвы и Московской области, а также впервые было отмечено обязательное участие юрских глин

в геологическом строении оползневых склонов. В труде была приведена морфологическая характеристика оползневого процесса с бугристо-ступенчатым характером поверхности.

На втором этапе, продлившемся до 40-х годов XX века, было начато изучение отдельных оползневых участков. Инженерно-геологические исследования включали ряд работ: крупномасштабные съемки оползневых склонов, буровые и лабораторные работы. В докладе В.А. Жукова [2] на 1-м Всесоюзном оползневом совещании в 1935 г., освещавшем изученность оползней Московской области, была приведена карта М 1:300 000. В работе была выделена группа оползней, развивающаяся на территории Московской области, связанных с песчано-глинистыми породами четвертичной системы и подземными водами, заключенными в них.

В отчете Б.М. Кордуна «Составление комплекса инженерно-геологических карт Нечерноземной зоны Европейской части РСФСР в связи с ее хозяйственным освоением» была опубликована карта с инженерно-геологическими условиями в масштабе 1:150 000 [8]. Из исследований, содержащих региональные сведения об оползневых процессах, следует отметить монографию И.В. Попова [13, 14] в двух томах — «Инженерная геология СССР».

В 1971 году была опубликована монография под названием «Геология СССР» [1]. Четвертый том был посвящен исследованиям европейской части территории СССР. В работе детально рассмотрены механизмы оползневых процессов и их связь с определенными стратиграфическими комплексами Московской области.

С 1980 года Подмосковная комплексная гидрогеологическая и инженерно-геологическая партия в соответствии с приказом Министерства геологии СССР от 19.04.77 «О дальнейшем развитии работ по прогнозированию экзогенных геологических процессов» проводила ряд стационарных наблюдений за развитием оползней и режимов оползнеобразующих факторов.

С 1980-х годов в Московской области проводились комплексные исследования склонов, подверженных оползневой деформациям, на участках, отведенных для строительства (коллекторов водонесущих коммуникаций, линий ЛЭП, исторических памятников). Работы были связаны со специальными инструментальными наблюдениями по различного рода реперам, маркам, наблюдательным скважинам за оползневыми процессами и оползнеобразующими факторами.

Материалы и методы

Развитие и распространение оползневых процессов на территории Московской области обусловлено комплексом факторов, включая геоморфологическую расчлененность и динамическую активность рельефа, неотектонические подвижки земной коры, а также особенности геологического строения и гидрогеологических условий. Взаимодействие указанных факторов формирует сложную геодинамическую обстановку, которая способствует активизации оползневых явлений [7].

Наибольшее количество оползневых участков зафиксировано в юго-восточных и южных районах Московской области, в тех местах, которые отмечаются значительной динамикой и густотой расчлененности рельефа речной и овражно-балочной сетью. Оползни в основном поражают склоны долин рек Москвы, Оки, Истры, Сетуни, Коломенки, Пахры, Нары, Десны, Клязьмы, Шолоховки и Осенки.

Закономерности распределения различных типов оползней на территории области определяются особенностями литолого-стратиграфического строения склонов и их оснований. Выделяются основные региональные литолого-стратиграфические комплексы, в которых наиболее интенсивно развиваются пластические деформации, приводящие к возникновению оползней:

- 1) песчано-глинистые отложения четвертичной системы;
- 2) глины оксфордского яруса верхнего отдела юрской системы;
- 3) карбонатные породы с тонкими прослоями глин среднего отдела каменноугольной системы.

Результаты и обсуждения

Оползни, относящиеся к первому комплексу, обусловленные деформацией четвертичных отложений, представляют собой наиболее обширную категорию оползневых процессов. Склоны, сформированные ледниковыми и водно-ледниковыми отложениями среднеплейстоценового возраста, подвергаются деформации. Оползни, как правило, происходят на молодых склонах, которые имеют различное происхождение: речное, овражное или техногенное. У таких склонов профиль равновесия еще не сформирован. Основные показатели оползневых участков рассматриваемого типа представлены в таблице 1.

Оползневые процессы, развивающиеся в четвертичных отложениях, характеризуются как небольшие по размерам, с неглубоким (до 5 или 10 м)

Таблица 1. Параметры оползневого участка первого литолого-стратиграфического комплекса
Table 1. Parameters of the landslide site of the first lithological and stratigraphic complex

№	Параметры		Значения
1	Крутизна склонов		21°—35°
2	По глубине захвата склона смещениями	Поверхностные	1—5 м
3		Мелкие	5—10 м
4	Конфигурация оползневого тела в плане		Циркообразная Глетчеровидная Фронтальная
5	Механизм смещения		Оползни течения Оползни сдвига
6	Высота стенки срыва		От 0,3 до 5—10 м

захватом пород, включающие все три типа по классификации Ф.П. Саваренского [15]: инсеквентные, консеквентные и асеквентные. Оползание пород происходит по горизонту ледниковых морен, по юрским или меловым глинам.

Склоновые участки, осложненные оползневыми деформациями (поверхностного и мелкого характера), развитыми в отложениях четвертичной системы, зафиксированы вблизи деревни Апраксино в долине реки Шолоховки. На левом склоне выявлены оползневые процессы с циркообразной формой в плане, которые характеризуются наличием четко выраженных задернованных стенок срывов. На правом склоне наряду с циркообразными формами наблюдаются фронтальные оползневые участки. В структуре фронтальных оползней отмечены небольшие по протяженности ступени, последовательно вытянутые вдоль бровки склона.

Оползневые процессы имеют ограниченное распространение в пределах долины реки Сетунь (рис. 1). Они приурочены к обрывистым участкам коренных склонов долины (в основном правый берег реки), эрозионным уступам поймы, а также к местам, подвергнутым техногенному воздействию (нагрузка на склоны из-за инженерных объектов: мостовых переходов, труб, выпусков сточных вод в реку).

В долине реки Нары, в частности на территории государственного природного заказника Московской области, оползневые процессы активизируются в местах подтока грунтовых вод. Террасы на склонах долины реки Нары имеют крутизну от 7—10° до 20—40°. Оползневые участки характеризуются наличием овражно-балочной сети, с наличием постоянных и временных водотоков, также очаги активных оползней приурочены к вогнутым, подмываемым берегам рек.

Оползни, входящие в состав второго комплекса, во многом обусловлены процессами деформации юрских глинистых отложений. В частности, высокая пористость, повышенная влажность, пластичность и гидрофильность оксфордских глин верхнего отдела юрской системы, содержащих монтмориллонит, способствуют активизации оползневых процессов. При залегании этих глин в подошве склонов или присутствии их в разрезе, а также при наличии достаточной динамической активности рельефа и избыточных давлений активизируются процессы пластической деформации. Они приводят к развитию оползневых явлений, что имеет большое значение для понимания общей геодинамической обстановки региона. Основные показатели оползневых участков рассматриваемого типа представлены в таблице 2.

Высота склонов, подверженных развитию и активизации оползневых процессов, варьируется в диапазоне от 2—5 до 45—50 м. Наиболее распространенная высота склонов превышает 10 м, что составляет около 74% от общего числа, 17% склоновых участков характеризуются высотой более 30 м, тогда как 9% склонов имеют высоту менее 10 м.



Рис. 1. Оползневые склоны в долине реки Сетунь
Fig. 1. Landslide slopes in the valley of the Setun River

Таблица 2. Параметры оползневой участка 2 литолого-стратиграфического комплекса
Table 2. Parameters of the landslide site of the second lithological and stratigraphic complex

№	Параметры	Значения
1	Крутизна склонов	10—20°
2	По глубине захвата склона смещениями	От 10 м
3	Конфигурация оползневой тела в плане	Фронтальная
4	Механизм смещения	Оползни сдвига

По механизму смещения оползни данной категории классифицируются как оползни сдвига. Оползневый механизм активизируется в результате комплексного воздействия природных и техногенных факторов, вызывающих изменение напряженно-деформированного состояния склонов. Это приводит к возникновению пластических нарушений, приводящих к сдвигу блока глинистых отложений юрской системы, что влечет развитие оползневых деформаций.

Внутри второй категории по классификационным признакам Е.П. Емельяновой [3—6] было выделено два вида оползневых процессов по степени захвата основания склона: висячие и подошвенные.

Висячие оползни в горизонтальных слоях встречаются значительно реже подошвенных. На всех склонах с висячими оползнями можно выделить две части по высоте: 1) верхняя, разрушаемая оползнями часть, границей которой является подошва слабого раздавливаемого слоя, залегающего в средней части склона (глубокая часть оползня); 2) нижняя, устойчивая, транзитная для оползневых масс часть. У их сопряжения профиль имеет ясный перегиб — выпуклость в средней части. При значительной высоте и крутизне стенки срыва (в верхней части склона) угол наклона поверхности оползневой тела оказывается минимальным. Нижняя часть склона, напротив, отличается значительной крутизной.

Формирование оползней висячего типа связано с особенностями неотектонических движений, способствующих выходу на поверхность карбонатных отложений среднего отдела каменноугольной системы. Это приводит к тому, что юрские глины, подверженные оползневой деформации, оказываются выше подошвы склона. Оползневые процессы инициируются при отсутствии выходов карбонатных пород на поверхность и развиваются аналогично подошвенным оползням. Однако при поднятии поверхности языковая часть оползня обнажается и подвергается интенсивной эрозии, что усиливает оползневый процесс. Дальнейшее

поднятие приводит к смещению грунта, который сползает к подножию склона, образуя шлейф.

В.В. Кюнтцель [9] отмечал, что на территории Московской области активность оползневых процессов прекращается на участках, где кровля юрских глин опускается на 8—10 м ниже уреза реки. Мощность юрских глин в Московской области в основном характеризуется величиной 20—40% от высоты склона.

При однообразном геологическом строении верхней части склона ширина оползневых ступеней зависит от мощности покрывающих пород и от общей высоты склона [10]. Ширина вновь отделяющихся оползневых ступеней, измеряемая на уровне поверхности плато, зависит от состава пород верхней части склона. От прочности и устойчивости этих пород зависит сохранность крутизны стенки срыва до момента отделения следующего блока. При деформирующихся породах трещина отрыва нового блока может располагаться не на плато, а на бровке оползневой уступа; следовательно, форма в плане будет гребенчатой или бугристой. Чем прочнее породы, слагающие верхнюю часть склона, тем яснее выражены и тем дольше сохраняются в рельефе оползневые ступени. Преобладание в верхней части склона песчано-глинистых пород вызывает развитие на оползневом склоне локальных смещений второго и более высоких порядков в таком масштабе, что они иногда почти полностью маскируют типичный для фронтальных оползней рельеф, и только линейная вытянутость стенки срыва в голове оползня свидетельствует о масштабе и характере первого смещения.

Глубокие оползни на склонах, подстилаемых юрскими глинами, начинают проявляться при их высоте всего 10—15 м. Юрские глины на территории области имеют черный или темно-серый цвет. Такой же цвет имеют майкопские глины, известные легкостью возникновения в них оползней и характеризующиеся небольшой предельной высотой склонов, всего 15—25 м (З.А. Макеев) [11]. Возможно, в этих случаях играет роль богатство

органическим веществом и восстановительная среда, способствующая его сохранению. Юрские глины Московской области богаты глауконитом и монтмориллонитом.

Примером типового оползня этого вида является массив, расположенный у села Гололобово на правом крутом склоне долины реки Коломенки. Оползневый участок имеет эллиптическую форму, протяженность которого варьируется от 450 до 550 м, а ширина от 85 до 240 м. На поверхности оползня четко выражен уступ высотой 2—5 м, полностью покрытый дерном. На теле оползня можно выделить три условные ступени. Для верхней ступени оползневого склона характерно наличие двух хорошо выраженных в рельефе валообразных гряд с округлыми и выпуклыми вершинами (ориентированными вдоль поверхностного уступа). Для понижений между грядами характерен влаголюбивый растительный покров. Ширина понижения между валообразными грядами составляет около 5 м. Далее идет переход на следующую оползневую ступень (среднюю). Ширина колеблется на разных участках от 18 до 27 м. По аналогии с первой также присутствуют в рельефе две валообразные гряды и понижения с влаголюбивыми видами растений. Нижняя оползневая ступень на склоне представляет собой три пологих уступа. Ширина всего яруса составляет от 48 до 65 м, уступов — 12 м. Уступы характеризуются бугристо-грядовыми формами рельефа и направлены к урезу реки. Оползневый уступ пересекают прямолинейные промоины и осложняют его оплывины, что указывает на подверженность эрозионным процессам.

Все оползневые террасы и уступы покрыты дерном, что свидетельствует о стабилизации поверхности и снижении риска дальнейшего развития оползневых процессов. Краевые зоны

оползневого склона характеризуются наличием локальных деформаций поверхности оползневого уступа, выражающихся в образовании незначительных (высотой от 0,3 до 0,5 м) стенок срыва. Данный параметр указывает на эпизодическую локальную активность оползневых процессов.

На склонах с юрскими глинистыми отложениями ниже уровня оползневого базиса часто наблюдаются подошвенные оползни, особенно в районах с водотоками, не полностью прорезавшими эти слои. Характерные черты таких оползней включают выраженный крутой надоползневый уступ высотой 2—15 м и уклоном 20—22°. На поверхности оползней выделяются 2—3 уровня ступеней, соединяющих бугры и впадины. Уступ и оползневые террасы нередко осложнены свежими оползневыми образованиями, что свидетельствует о сложной динамике и множестве факторов, влияющих на их развитие.

Оползневые процессы характерны для берегов реки Пахра из-за значительной расчлененности рельефа эрозионной сетью (рис. 2). В результате на крутых склонах образуются участки с бугристым и грядово-бугристым рельефом. Оползни на склонах Пахры относятся к двум типам:

1) оползни, вызванные деформацией четвертичных отложений, имеют небольшие размеры. Их протяженность варьируется от нескольких метров до десятков, а в редких случаях — сотен метров;

2) оползни на склонах с высотой более 20 м и уклоном поверхности оползневой террасы свыше 8°. Оползневые процессы связаны с деформацией коренного субстрата.

Оползневые процессы на склонах реки Клязьмы (рис. 3) могут быть вызваны различными факторами: метеорологическими (климатическими) — количество выпадающих осадков и характер их инфильтрации; геологическими — процессы

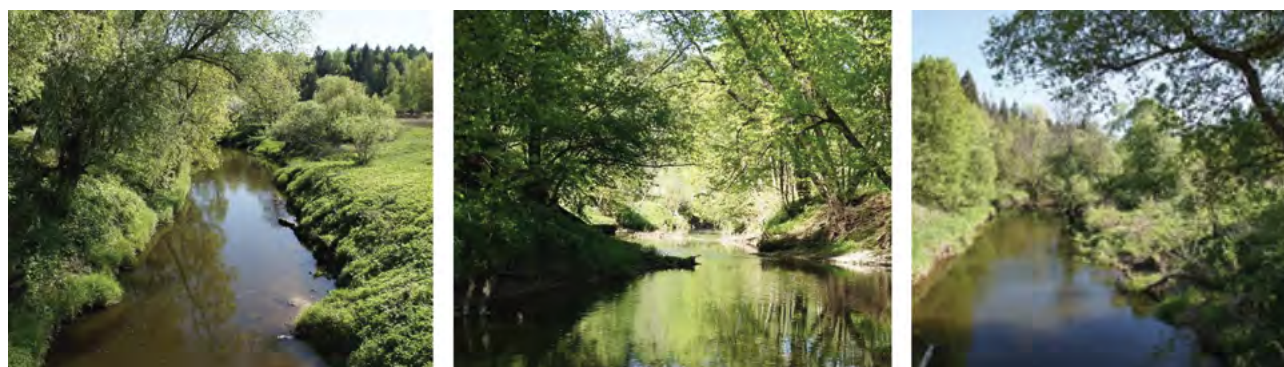


Рис. 2. Оползневые склоны в долине реки Пахры
Fig. 2. Landslide slopes in the valley of the Pakhra River



Рис. 3. Оползневые склоны в долине реки Клязьмы
Fig. 3. Landslide slopes in the Klyazma River valley

выветривания, водной эрозии, абразии и суффозии; гидрогеологическими — процессы протаивания и промерзания грунтов, слагающих склоновые массивы; техногенными — нагрузки при строительстве зданий и сооружений.

Активизация оползневых процессов в долине реки Клязьмы обуславливается воздействием эрозионного фактора. Обрушение пород, слагающих коренной берег в верхней части водораздела р. Клязьмы, происходит под эродирующим воздействием водотока. Оползни возникают в результате подмыва коренного берега.

Склоновый участок в районе деревни Липки, осложненный крупными оползнями протяженностью порядка 1,5 км, характеризуется следующими параметрами: длина оползневого склона — 85 м; высота оползня — 35 м; крутизна склона — 20°. На склоне наблюдается единая оползневая ступень, которая характеризуется стабильными параметрами высоты и простираия.

У деревни Быковка выявлен глубокий оползень выдавливания длиной около 3,7—3,9 км, связанный с деформацией верхнеюрских глин оксфордского яруса.



Рис. 4. Оползневые склоны в долине реки Десны
Fig. 4. Landslide slopes in the valley of the Desna River

В районе деревни Лапино — оползень фронтальный, протяженность по фронту значительно превосходит длину по оси движения. В рельефе склона выделяется до двух уровней оползневых ступеней, преимущественно выдержанных по высоте и простираию.

Оползневые процессы в верховьях долины реки Десны (рис. 4) встречаются на локальных участках. В рельефе хорошо выражены оползневые террасы с одним или двумя ярусами (ступенями), ширина составляет около 25 м, длина до 350 м. Часть оползневого склона залегает под уровнем межи и подрезается водотоком. Наклоненные к стенке срыва участки оползневого тела выдаются над межью реки на 10 м, а объем оползневых блоков составляет около 180 тыс. м³.

Оползневые процессы в долине р. Десны связаны с особенностями геологического строения: правобережный склон сложен мергелем и мелом, которые покрыты тонким слоем лессовидных суглинков. Участок склона разрезан балочной сетью на отдельные фрагменты с крутыми и покатыми склонами крутизной около 25°. Для склоновых участков характерна южная и юго-восточная экспозиция.

Оползни, относящиеся к третьему комплексу, связаны с деформированием глинистых отложений среднего карбона, развиваются на левом склоне долины реки Оки. Основные параметры оползневого участка представлены в таблице 3.

Оползневые участки, расположенные выше по течению реки Оки от овражно-балочной сети, имеют надоползневые уступы высотой около 10 м, крутизной более 42°. В рельефе характерно наличие двух оползневых террас высотой 9—11 м и шириной около 5—6 м.

Таблица 3. Параметры оползневого участка третьего литолого-стратиграфического комплекса
Table 3. Parameters of the landslide site of the third lithological and stratigraphic complex

№	Параметры	Значения
1	Крутизна склонов	14—22°
2	Длина по оси движения	100—120 м
3	Конфигурация оползневого тела в плане	Фронтальная

Заключение

На территории Московской области оползневые явления распространены и обусловлены комплексом факторов, включая расчлененность рельефа, неотектонические движения и геологическое строение склонов. Наиболее подвержены оползням юго-восточные и южные районы с активной динамикой рельефа.

Оползневые процессы, характерные для территории Московской области, обособляются по заданным параметрам и значениям в три литолого-стратиграфических комплекса:

Песчано-глинистые отложения четвертичного периода. Комплекс характеризуется поверхностными и мелкими смещениями на молодых склонах речного, овражного или техногенного происхождения. Оползни часто имеют значительную протяженность и относятся к типу течения и сдвига.

Глины оксфордского яруса верхнего отдела юрского периода. Оползни этого комплекса связаны

с пластическими деформациями в глинах, богатых монтмориллонитом. Они характеризуются большей глубиной захвата склона и относятся к оползням сдвига. Различают подошвенные и висячие типы оползней, последние связаны с неотектоническими движениями.

Карбонатные породы с тонкими прослоями глин среднего отдела каменноугольного периода. Оползни развиты на левом склоне долины реки Оки и характеризуются фронтальной конфигурацией и наличием оползневых террас.

Оползни прослеживаются на склонах долин рек Москвы, Оки, Истры, Сетуни, Коломенки, Пахры, Нары, Десны, Клязьмы, Шолоховки и Осенки. Оползневые процессы на склонах рек Пахры, Клязьмы и Десны имеют свои особенности, связанные с речной эрозией, развитием суффозионных процессов, гидрогеологическими условиями и деятельностью человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геология СССР. Т. 4. Центр Европейской части СССР (Московская, Владимирская, Ивановская, Калининская, Калужская, Костромская, Рязанская, Тульская, Смоленская и Ярославская области). Геологическое описание. Гл. ред. А.В. Сидоренко. М., 1971. 742 с.
2. Жуков В.А. Оползневые явления Московской области. Труды Первого Всесоюзного оползневого совещания. Л. — М.: ОНТИ, 1935. 320 с.
3. Емельянова Е.П. Основные закономерности оползневых процессов. М.: Недра, 1972 г. 308 с.
4. Емельянова Е.П. О причинах и факторах оползневых процессов. В сб. «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии». М.: Госгеолиздат, 1953. 67—81 с.
5. Емельянова Е.П. Методическое руководство по стационарному изучению оползней. Москва, Госгеолтехиздат, 1956, 246 с.
6. Емельянова Е.П. О значении литологического состава горных пород в оползневых процессах и классификации оползней. Известия вузов, геология и разведка. 1959. № 10. 663 с.
7. Крахина Е.А., Экзарьян В.Н. Особенности и оценка оползневой опасности на территории города Москвы. Науки о Земле и недропользование. 2025. Т. 48. № 1(90). С. 77—87.
8. Кордун Б.М. Отчет МИРП «Составление комплекса инженерно-геологических карт Нечерноземной зоны Европейской части РСФСР в связи с ее хозяйственным освоением». М., 1980. 59 с.
9. Кюнтцель В.В. Закономерности оползневого процесса на Европейской территории СССР. М.: Недра, 1980. 213 с.
10. Кюнтцель В.В. О возрасте глубоких оползней Москвы и Подмосковья, связанных с юрскими глинистыми отложениями. Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 1965. Т. XL. № 3. С. 93—100.
11. Макеев З.А. Инженерно-геологическая характеристика майкопских глин. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 320 с.
12. Никитин С.Н. Успехи геологических знаний в России за 1890 год. Ежегодник Императорского Русского географического общества. 1892. 45 с.

13. Попов И.В. Инженерная геология СССР. Том II. М.: Изд-во Московского университета, 1965. 476 с.
14. Попов И.В. Инженерная геология СССР. Том 1. М.: Изд-во Московского университета, 1961. 174 с.
15. Саваренский Ф.П. Опыт построения классификации оползней. Труды I Всесоюзного оползневого совещания. Л. — М.: ОНТИ, 1935. С. 29—37.

REFERENCES

1. Geology of the USSR. Vol. 4. The center of the European part of the USSR (Moscow, Vladimir, Ivanovo, Kalinin, Kaluga, Kostroma, Ryazan, Tula, Smolensk and Yaroslavl regions). Geological description. Chief editor A.V. Sidorenko. Moscow, 1971. 742 p. (In Russ.).
2. Zhukov V.A. Landslide phenomena of the Moscow region. Proceedings of the First All-Union Landslide Conference. Leningrad — Moscow: Onti, 1935. 320 p. (In Russ.).
3. Yemelyanova E.P. Basic patterns of landslide processes. Moscow: Nedra, 1972. 308 p. (In Russ.).
4. Yemelyanova E.P. On the causes and factors of landslide processes. In the collection "Issues of hydrogeology and engineering geology". Moscow: Gosgeolizdat, 1953. P. 67—81 (In Russ.).
5. Yemelyanova E.P. Methodological guide for the stationary study of landslides. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1956. 246 p. (In Russ.).
6. Yemelyanova E.P. On the importance of the lithological composition of rocks in landslide processes and the classification of landslides. Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 1959. No. 10. 663 p. (In Russ.).
7. Krakhina E.A., Ekzaryan V.N. Features and assessment of landslide danger in the territory of the city of Moscow. Earth sciences and subsurface use. 2025. Vol. 48. No. 1(90). P. 77—87 (In Russ.).
8. Kordun B.M. MI1RP report "Compilation of a set of engineering and geological maps of the non-Chernozem zone of the European part of the RSFSR in connection with its economic development". Moscow, 1980. 59 p. (In Russ.).
9. Kuntzel V.V. Patterns of the landslide process in the European territory of the USSR. Moscow: Nedra, 1980. 213 p. (In Russ.).
10. Kuntzel V.V. On the age of deep landslides in Moscow and the Moscow region associated with Jurassic clay deposits. Bulletin of the Moscow Society of Nature Testers. Geological Department. 1965. Vol. XL. No. 3. P. 93—100 (In Russ.).
11. Makeev Z.A. Engineering and geological characteristics of the Maikop clays. Publishing House of the USSR Academy of Sciences, Moscow, 1963. 320 p. (In Russ.).
12. Nikitin S.N. Successes of geological knowledge in Russia in 1890. Yearbook of the Imperial Russian Geographical Society. 1892, 45 p. (In Russ.).
13. Popov I.V. Engineering geology of the USSR. Vol. II. Moscow: Publishing House of Moscow University, 1965. 476 p. (In Russ.).
14. Popov I.V. Engineering geology of the USSR. Vol. I. Moscow: Publishing House of the Moscow University, 1961. 174 p. (In Russ.).
15. Savarensky F.P. The experience of building a classification of landslides. Proceedings of the First All-Union Landslide Conference. Leningrad — Moscow: ONTI, 1935. P. 29—37 (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Крахина Е.А. — доработала концепцию статьи, подготовила текст статьи редактировала текст, выполнила визуализацию и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Экзарьян В.Н. — разработал концепцию статьи, редактировал текст, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Elena A. Krakhina — finalized the article's concept, prepared the article's text, edited the text, performed visualization, and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Vladimir N. Ekzarian — developed the article's concept, edited the text, approved the final version of the article, and agree to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Крахина Елена Александровна* — аспирант ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия

e-mail: l.k98@mail.ru

SPIN-код: 4391-6744

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8043-3740>

Elena A. Krakhina* — Post-graduate researcher, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: l.k98@mail.ru

SPIN-code: 4391-6744

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8043-3740>

Экзарьян Владимир Нишанович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия

e-mail: vnekzar@rambler.ru

SPIN-код: 7968-3231

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8521-6715>

Vladimir N. Ekzarian — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor, Head of the Ecology and Environmental Management Department, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: vnekzar@rambler.ru

SPIN-code: 7968-3231

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-8521-6715>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ПРИМЕНЕНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ СФЕРЫ ВЛИЯНИЯ РЕКОНСТРУИРУЕМОГО СООРУЖЕНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ ЗАСТРОЙКУ

А.А. ГОРЛОВ*, И.К. ФОМЕНКО, М.А. НАУМОВ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В мировой практике проектирования и строительства значительную популярность приобретает применение стохастических подходов, которые на сегодняшний день активно используются при решении геотехнических задач. Эти методы позволяют учитывать неопределенность, связанную с изменчивостью физико-механических свойств грунтов, обусловленную их неоднородностью.

Цель. Рассмотреть возможность применения стохастического подхода вместе с учетом линейного изменения модуля общей деформации грунтов основания при глубине сжимаемой толщи, определяемой согласно Терцаги [13], для оценки сферы влияния реконструируемого сооружения на окружающую застройку.

Материалы и методы. Использование метода случайных конечных элементов (RFEM) вместе с учетом линейного изменения модуля общей деформации с глубиной позволяет учесть пространственную изменчивость свойств грунтов, а также выполнить прогноз возникновения деформаций. Для получения значений конечной осадки основания глубина сжимаемой толщи была определена согласно Терцаги [13]. Исследование проводилось на примере реконструируемого объекта в ЦАО г. Москвы, в ходе реконструкции была увеличена нагрузка на грунты основания.

Результаты. Сравнение традиционного метода расчета и расчета с использованием метода RFEM показало, что при обоих вариантах расчета жилое здание не попадает в зону влияния реконструкции. Однако отмечены значительные расхождения в полученных значениях общих деформаций (конечной осадки) основания в зависимости от метода расчета. Также показана оценка вероятности превышения заданного значения общих деформаций при стохастическом расчете.

Заключение. Результаты работы указывают на необходимость внедрения стохастического подхода в современную практику проектирования наряду с изменением метода определения глубины сжимаемой толщи и учета повышения модуля общей деформации с глубиной с целью повышения надежности и эффективности принимаемых проектных решений.

Ключевые слова: стохастический подход, инженерная геология, глубина сжимаемой толщи, конечная осадка, модуль общей деформации, неопределенность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Горлов А.А., Фоменко И.К., Наумов М.А. Применение стохастического подхода для оценки сферы влияния реконструируемого сооружения на окружающую застройку. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2026;68(1):109—118. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-109-118> EDN: [DGKNKL](https://edn.dgknkl.ru/)

Статья поступила в редакцию 11.04.2025

Принята к публикации 12.06.2025

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

STOCHASTIC APPROACH TO ASSESSING THE IMPACT AREA OF THE RECONSTRUCTED FACILITY ON THE SURROUNDING DEVELOPMENT

ANDREY A. GORLOV*, IGOR K. FOMENKO, MIKHAIL A. NAUMOV

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. Acquiring popularity in global design and construction practice, stochastic approaches are actively used in geotechnical applications. These approaches take into account the uncertainty associated with the variability in the physical and mechanical properties of soils due to their heterogeneity.

Aim. To consider the application of a stochastic approach, taking into account the linear change in the total deformation modulus of base soils over the depth of compressible stratum, determined according to Terzaghi [13], for assessing the area of impact of the reconstructed facility on the surrounding development.

Materials and methods. The combination of random finite element method (RFEM) with the linear change in the total deformation modulus over the depth of compressible stratum takes into account spatial variability of soil properties, as well as predicts the occurrence of deformations. The depth of compressible stratum was determined according to Terzaghi in order to calculate the final settlement of the base [13]. The study was conducted using the example of a reconstructed facility in Moscow, Russian Federation. During the reconstruction, the load on base soils was increased.

Results. A comparison of the conventional calculation method and RFEM showed that the residential building is out of the impact area in both cases. However, significant differences were observed in the total deformation (final settlement) of the base, depending on the calculation method. In addition, the probability of exceeding the set value of total deformation was assessed using the stochastic approach.

Conclusion. The results of the work indicate the need to implement a stochastic approach in contemporary design practices along with enhancing the method for determining the depth of compressible stratum and taking into account the increase in the total deformation modulus over the depth for improving the reliability and efficiency of design decisions.

Keywords: stochastic approach, engineering geology, depth of compressible stratum, final settlement, total deformation modulus, uncertainty

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Gorlov A.A., Fomenko I.K., Naumov M.A. Stochastic approach to assessing the impact area of the reconstructed facility on the surrounding development. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):109—118. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-109-118> EDN: [DGNKNL](https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-109-118)

Manuscript received 11 April 2025

Accepted 12 June 2025

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

В мировой практике проектирования и строительства значительную популярность приобретает применение стохастических подходов, которые на сегодняшний день активно используются при решении геотехнических задач. Эти методы позволяют учитывать неопределенность, связанную с изменчивостью физико-механических свойств грунтов, обусловленную их неоднородностью. Использование стохастических моделей не только повышает надежность и эффективность принимаемых проектных решений, но и открывает возможность прогнозирования. Использование таких подходов вместе с применением теории надежности дает возможность качественного роста уровня проектирования, что однозначно приводит к положительному экономическому эффекту [8–12, 14].

В современных условиях развития строительной отрасли России использование стохастических методов в инженерной геологии становится необходимостью. Эта потребность обусловлена рядом факторов: усложнением строительных проектов, ростом интенсивности и плотности застройки городских территорий, необходимостью снижения негативного влияния новых объектов строительства на уже существующую инфраструктуру. При этом необходимо понимать, что применение таких методов требует частичного пересмотра и в некоторых случаях дополнения действующих нормативно-технических документов, например в части, касающейся расчета глубины сжимаемой толщи. В свою очередь, это приведет к значительному улучшению качества получаемой инженерно-геологической информации, что позволит распространить полученный положительный эффект на все сопряженные отрасли [2–4].

Данная работа посвящена рассмотрению применения стохастического подхода с элементами вероятностного анализа в инженерной геологии на примере расчета сферы влияния сооружения на окружающую застройку.

Материалы и методы

Стохастический расчет был выполнен с использованием метода случайных конечных элементов (RFEM) [9], в нем используется комбинация метода конечных элементов и двумерной теории случайных полей. Данный алгоритм расчета позволяет реализовать стохастический подход при решении геотехнических задач. Необходимо отметить, что применение этого метода также возможно при выполнении вероятностного анализа,

что значительно расширяет сферу использования, делая его в некотором смысле универсальным. Пространственная изменчивость свойств грунта при использовании данного подхода моделируется с помощью теории случайных полей, согласно которой в любой области расчетного-геологического элемента (РГЭ) свойства грунта являются случайной переменной, характеризующейся вероятностной функцией распределения и коррелирующей со значениями свойств грунта в смежных областях. Она определяется с помощью функции автокорреляции (1), которую можно оценить на основе данных полевых или лабораторных испытаний параметра в различных точках массива. Вычисление осуществляется с помощью функции коэффициента корреляции Маркова [10]. Такая постановка задачи обуславливает стохастический характер данного метода.

$$R(\tau_x, \tau_y) = \exp \left\{ - \sqrt{ \sqrt{ \left(\frac{2\tau_x}{\theta_x} \right)^2 + \left(\frac{2\tau_y}{\theta_y} \right)^2 } } \right\}, \quad (1)$$

где $R(\tau_x, \tau_y)$ — коэффициент автокорреляции, τ_x и τ_y — абсолютные расстояния между двумя точками в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно, θ_x и θ_y — корреляционные расстояния в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

В данном исследовании стохастический расчет был выполнен в программе OptumG2. Для модуля общей деформации была задана величина корреляционного расстояния в горизонтальном ($x = 10$ м) и в вертикальном ($y = 0$ м) направлениях. Коэффициент вариации принимался (по модулю общей деформации) — 30%. Количество итераций — 300.

Также в данной работе выполнен учет линейного изменения модуля общей деформации с глубиной на основе формулы (2) для определения модуля деформации в модели упрочняющегося грунта:

$$E = E^{ref} \left(\frac{\sigma_1 + c \cot \varphi_p}{\sigma^{ref} + c \cot \varphi_p} \right)^m, \quad (2)$$

где E^{ref} — модуль деформации при референсном давлении 100 кПа, σ^{ref} — референсное давление, σ_1 — бытовое давление, c — сцепление, φ — угол внутреннего трения, m — показатель степени, предложенный Охде (1939) [11].

Таблица 1. Параметры, описывающие физико-механические свойства грунтов
Table 1. Parameters describing the physical and mechanical properties of soils

СГК	№ РГЭ	Глубина залегания кровли, м	Описание грунта	ρ , г/см ³	C , кПа	ϕ , °	ν , д.ед.	E^{ref} , МПа
Современные техногенные образования (<i>tQIV</i>)	1	0	Техногенный грунт — песок средней крупности (<i>tQIV</i>)	1,75	1	32	0,30	26,3
Верхнечетвертичные аллювиальные отложения (<i>aQIII</i>)	2	3	Суглинок мягкопластичный (<i>aQIII</i>)	1,97	26	18	0,35	16,4
	3	5,8	Суглинок тугопластичный (<i>aQIII</i>)	2,05	32	22	0,35	21,8
Среднечетвертичные флювиогляциальные, водно-ледниковые отложения московского оледенения (<i>f, lgQIIms</i>);	4	13,8	Песок средней крупности (<i>f, lgQIIms</i>)	1,87	1	35	0,30	30,0
	5	24,1	Суглинок мягкопластичный (<i>f, lgQIIms</i>)	1,95	22	18	0,35	17,9
	6	26,0	Песок средней крупности (<i>f, lgQIIms</i>)	2,01	2	36	0,30	30,3 ^п
Каменноугольные отложения верхнего отдела (<i>C₃</i>).	7	34,4	Известняк (<i>C₃</i>)	-	-	-	-	-

Примечание. ¹ — значения модуля общей деформации грунта на кровле (*) и подошве (п) слоя.

Расчет сферы влияния сооружения на окружающую застройку выполнялся на примере реконструируемого объекта, расположенного в ЦАО г. Москвы. В ходе реконструкции сооружения была увеличена нагрузка, оказываемая на грунты основания. Фундамент сооружения плитный, с глубиной заложения 2 м, размеры в плане 26×22 м, нагрузка на грунты основания до реконструкции — 150 кН/м², после реконструкции — 220 кН/м². В непосредственной близости к реконструируемому объекту (2,5 м) расположено жилое здание, имеющее ленточные фундаменты с глубиной заложения 2 м, размеры в плане 22×18 м, нагрузка на грунты основания 200 кН/м².

В геологическом строении площадки до глубины 39,4 м выделяются 4 стратиграфо-генетических комплекса (СГК) пород:

Современные техногенные образования (*tQIV*) представлены песком средней крупности, темно-серым, средней плотности, малой степени водонасыщения, с включением до 25 % мусора строительного, глинистым. Возраст отсыпки более 10 лет. Мощность образований от 1,45 до 3,00 м.

Верхнечетвертичные аллювиальные отложения (*aQIII*) представлены суглинком от мягкопластичного до тугопластичного, красно-коричневым, с прослоями песка, с включением до 10 % щебня и дресвы. Максимальная вскрытая мощность отложений 10,80 м.

Среднечетвертичные флювио-гляциальные, водно-ледниковые отложения московского оледенения (*f, lgQIIms*) представлены песками средней крупности, от желтого до серого, средней плотности, от средней степени водонасыщения до водонасыщенного, с включением до 10 % гальки, гравия, щебня и обломков известняка, глинистыми; суглинком буровато-коричневым, мягкопластичным, с включением до 10 % гравия и щебня, обводненным по контактам с включениями. Максимальная вскрытая мощность отложений 20,60 м.

Каменноугольные отложения верхнего отдела (*C₃*) представлены известняком желтовато-серым, водонасыщенным, с прослоями мергеля. Максимальная вскрытая мощность отложений 5,00 м.

Гидрогеологические условия площадки до глубины 39,4 м характеризуются наличием одного водоносного горизонта, приуроченного к каменноугольным отложениям верхнего отдела (*C₃*). Горизонт вскрыт на глубине 20,0 м и носит безнапорный характер.

Параметры физико-механических свойств грунтов (табл. 1), используемые в расчетах, получены в результате проведения инженерно-геологических изысканий.

Расчет сферы влияния выполнялся в двух вариантах. В первом случае (далее — «традиционный расчет») использован метод конечных

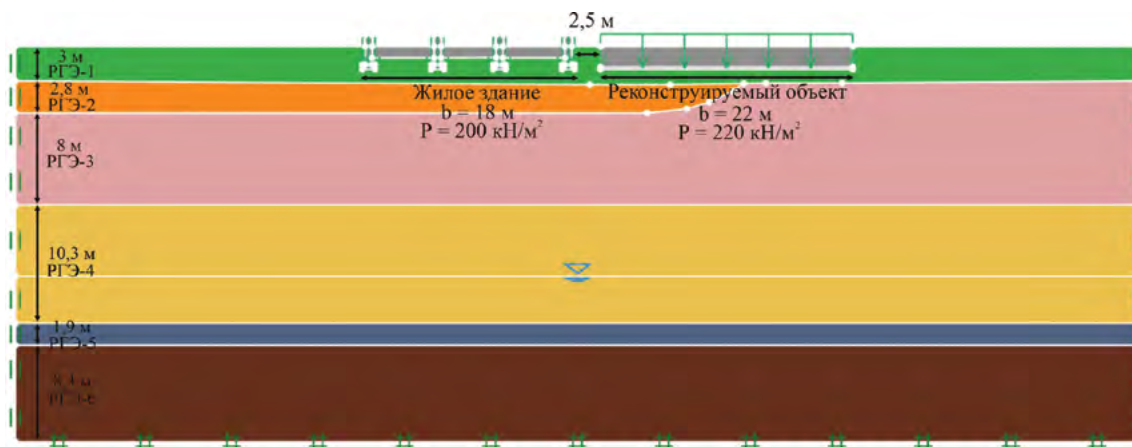


Рис. 1. Расчетная схема при стохастическом расчете
 Fig. 1. Calculation scheme for stochastic calculation

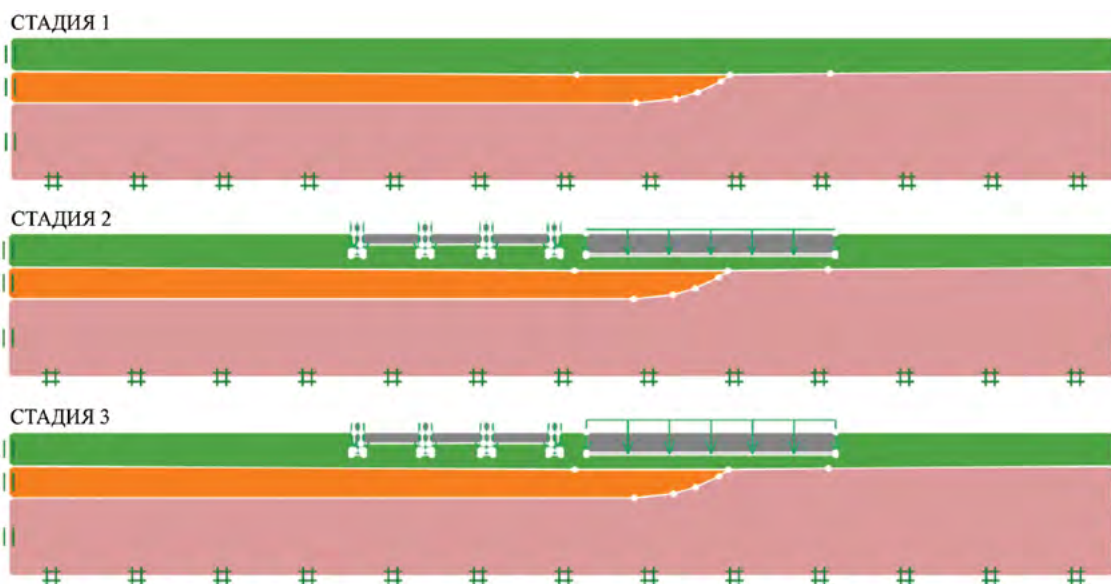


Рис. 2. Стадийность выполняемых расчетов
 Fig. 2. The stages of the calculations performed

элементов, глубина сжимаемой толщи была определена в соответствии с требованиями СП 22.13330.2016 и составила 12,7 м. Во втором варианте расчета глубина сжимаемой толщи определена согласно Терцаги [13] по формуле (3) и составила 47 метров.

$$Z_f = 2B(1 + \log L / B), \quad (3)$$

где B — ширина фундамента, L — длина фундамента.

Исходя из геологического строения участка работ глубина сжимаемой толщи принята на глубине вскрытия кровли известняков (СЗ) — 34,4 м.

Второй расчет является иллюстрацией применения стохастического подхода при оценке сферы влияния сооружения на окружающую застройку, расчетная схема представлена на рисунке 1. Расчет выполнялся с использованием метода RFEM, а также с учетом линейного изменения модуля общей деформации грунта с увеличением глубины.

Оба расчета выполнялись в три стадии (рис. 2). На первой стадии моделировалось начальное напряженно-деформированное состояние грунтового массива, на второй стадии — существующие сооружения. На третьей стадии выполнялось моделирование изменения поля деформаций грунтового массива в ходе реконструкции объекта.

Таблица 2. Результаты оценки влияния реконструкции с применением разных методик
Table 2. The results of assessing the impact of reconstruction using different methods

Метод расчета	Расстояние до сооружения, м	Категория сооружения	Допустимая осадка, мм	Общие деформации, мм	Допустимая относительная разность осадок	Расчетная относительная разность общих деформаций	Радиус зоны влияния, м
Жилое здание							
Детерминированный (глубина сжимаемой толщи опр. по СП)	2,5	III	5	4,6	0,0004	0,00009	-
Вероятностный (RFEM) — вероятность 50% (с увеличенной глубиной сжимаемой толщи)				8,6		0,0003	-
Реконструируемое здание							
Детерминированный (глубина сжимаемой толщи опр. по СП)	-	III	30	22,6	0,0012	0,00016	26
Вероятностный (RFEM) — вероятность 50% (с увеличенной глубиной сжимаемой толщи)				38,2		0,0003	31

Одним из ключевых аспектов в контексте решения рассматриваемой задачи является понятие осадки. Согласно определению, приведенному в СП 22.13330.2016, осадка характеризуется только вертикальной оставляющей деформаций основания. Такой подход является вполне приемлемым при оценке деформаций в границах загруженной поверхности фундамента, поскольку в этом случае горизонтальные деформации основания, как правило, незначительны. В то же время при оценке осадки основания, расположенного на удалении от области нагружения, учет только вертикальной составляющей приводит к недооценке реальной величины осадки. Это связано с тем, что в подобных условиях горизонтальные деформации основания могут существенно превышать вертикальные. В связи с этим в данной статье рассматриваются общие деформации основания, рассчитанные по формуле (4), то есть учтены как вертикальные, так и горизонтальные составляющие деформаций основания.

$$|u| = \left(u_x^2 + u_y^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где u_x — горизонтальная составляющая деформаций основания, u_y — вертикальная составляющая деформаций основания.

Результаты и обсуждение

При обоих вариантах расчета жилое здание попадает в зону влияния реконструкции, так как согласно СП 22.13330.2016, п. 9.34 радиус

зоны влияния нового строительства или реконструкции допускается ограничивать расстоянием, при котором расчетное значение дополнительной осадки грунтового массива или основания существующего сооружения окружающей застройки не превышает 1 мм. Рассчитанный радиус зоны влияния (считается от края реконструируемого сооружения) при традиционном расчете составил 26 м, при стохастическом — 31 м. При использовании традиционного подхода в основании жилого здания выявлены деформации, не превышающие норму (4,6 мм), тогда как при стохастическом расчете с увеличением глубины сжимаемой толщи деформации составили 8,6 мм, что выше предельных дополнительных деформаций согласно СП 22.13330.2016, при этом разница между полученными значениями деформаций существенна: результат стохастического расчета на 87% больше. Расчетная относительная разность осадок составила 0,00009, что гораздо меньше допустимого значения 0,0004.

Также отметим, что неоднородное строение грунтовой толщи, а именно выклинивание суглинка мягкопластичного ($aQIII$), приводит к неравномерному распределению деформаций в основании реконструируемого сооружения, что отражено на рисунке 3, при этом допустимая относительная разность осадок не превышена. В данном случае применение стохастического подхода показало результаты, еще более отличные от традиционного расчета. Конечная осадка (общие деформации) реконструируемого сооружения

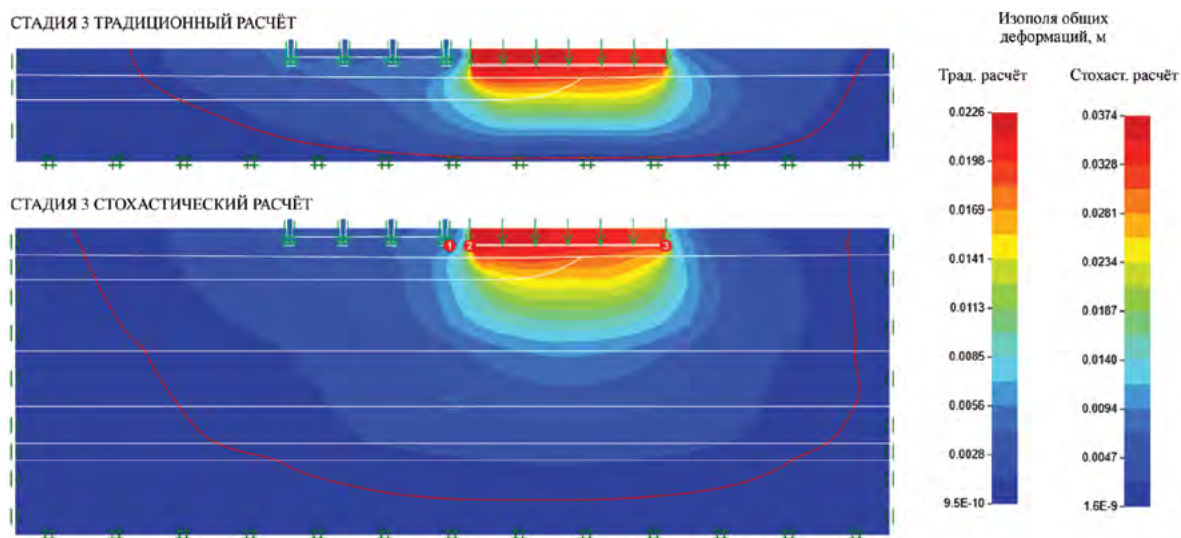


Рис. 3. Изополя общих деформаций на третьей стадии при традиционном и стохастическом с вероятностью 50 % вариантах расчета

Fig. 3. Isofields of general deformations at the third stage, with traditional and stochastic with a probability of 50 %, calculation options

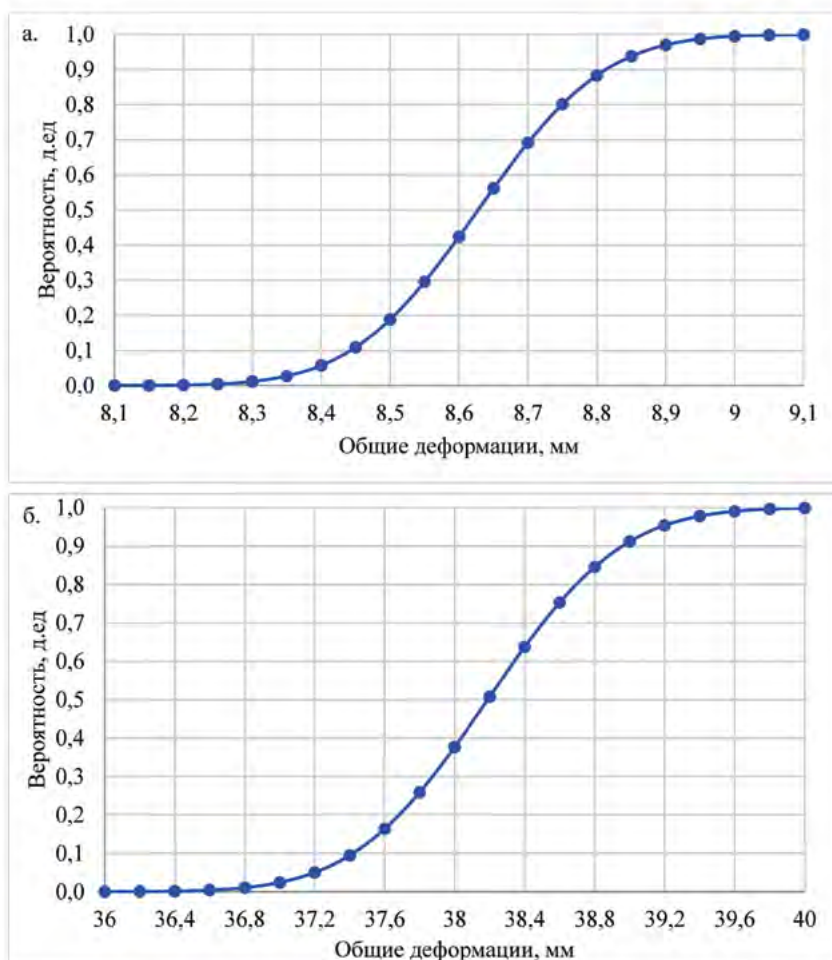


Рис. 4. Кумулятивные кривые функции распределения общих деформаций по результатам стохастического расчета: а — реконструируемое здание; б — жилое здание

Fig. 4. Cumulative curves of the distribution function of total displacements based on the results of stochastic calculation: а — reconstructed building; б — residential building

превысила норму и составила 38,2 мм при стохастическом расчете, в то время как при традиционном расчете конечная осадка не превышает 22,6 мм, что является допустимым значением.

Кроме того, обработка данных, получаемых при стохастическом расчете, определение стандартного отклонения и среднего значения общих деформаций позволяют построить кумулятивную кривую функции распределения (рис. 4), на основе которой определяется вероятность превышения заданного значения осадки. Так, например, для реконструируемого сооружения вероятность превышения общих деформаций, равных 38 мм, составит 62 %.

Если в качестве заданного значения принять допустимую величину общих деформаций, равную для жилого и реконструируемого зданий 0,005 и 0,03 м соответственно, то можно заключить, что с одинаковой вероятностью, близкой к 100 %, заданная величина общих деформаций оснований будет превышена для жилого и реконструируемого зданий.

Заключение

Применение стохастического подхода в инженерной геологии на сегодняшний день как никогда актуально и необходимо. Стохастические методы позволяют учесть вероятностный характер распределения свойств в массиве, что повышает достоверность получаемых результатов расчетов [5, 7].

Более того, стохастические методы обеспечивают возможность проведения вероятностного анализа, предоставляя данные для оценки вероятности превышения заданных значений в данном исследовании общих деформаций (конечной осадки) основания.

Однако внедрение стохастических методов требует корректного определения ключевых параметров, таких как, например, глубина сжимаемой толщи. Сравнение различных подходов к ее определению показывает, что использование методов, описанных в нормативных документах, может привести к существенным погрешностям в получаемых результатах [1, 6]. Важно продолжать процесс совершенствования нормативной базы и методических рекомендаций для обеспечения достоверности получаемой инженерно-геологической информации.

Кроме того, в выполненных расчетах учитывается повышение модуля общей деформации грунта с увеличением глубины. Этот фактор существенно влияет на распределение напряжений и деформаций в массиве грунта, что в конечном счете также сказывается на величине конечной осадки основания.

Полученные результаты подчеркивают необходимость внедрения стохастических методов в современную практику проектирования, что, в свою очередь, приведет к повышению надежности и экономической эффективности строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горлов А.А., Фоменко И.К. Оценка глубины сжимаемой толщи при расчетах оснований фундаментов. XI Международная научная конференция молодых ученых «Молодые — Наукам о Земле». М., 2024. С. 15–19.
2. Горлов А.А., Фоменко И.К. Стохастический расчет осадки основания фундамента с использованием метода случайных конечных элементов (RFEM). Материалы шестой Общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве». М., 2024. С. 150–156.
3. Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Самарин Е.Н. Вероятностный подход при моделировании устойчивости склонов: реализация и особенности. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 6. С. 26–38.
4. Кургузов К.В., Фоменко И.К., Сироткина О.Н. Вероятностно-статистические подходы к оценке неопределенности литотехнических систем. Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2020. № 2. С. 65–74.
5. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: Изд-во АСВ, 1998.
6. Фоменко И.К., Зеркаль О.В., Горлов А.А., Аверин И.В., Шубина Д.Д. Оценка сжимаемой толщи оснований фундаментов при численном моделировании (в порядке обсуждения). Промышленное и гражданское строительство. 2024. № 8. С. 65–70.
7. Фоменко И.К., Кропоткин М.П. Сравнение вероятностных расчетов при анализе устойчивости откосов дорожных насыпей методом конечных элементов. Материалы восемнадцатой Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М., 2023. С. 19–27.
8. Baecher G., Christian J. Reliability and statistics in geotechnical engineering. New Jersey, USA: Publishing house of the John Wiley and Sons. 2005.
9. Fenton G., Griffith D. Risk assessment in geotechnical engineering. New Jersey, USA: Publishing house of the John Wiley & Sons. 2008.
10. Griffiths D., Fenton G. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. New York, USA: Publishing house of Springer. 2007.
11. Ohde J. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Der Bauingenieur. № 20. 1939. Heft 33/34. P. 451–459.

12. Tang C., Phoon K.-K. Databases for Data-Centric Geotechnics: Geotechnical Structures. Boca Raton: CRC Press. 2025.
13. Terzaghi K., Peck R., Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. New Jersey, USA: Publishing house of the John Wiley & Sons. 1996. P. 592.
14. Vanmarcke E. Random fields: analysis and synthesis. Cambridge, UK: MIT Press. 1983.

REFERENCES

1. Gorlov A.A., Fomenko I.K. Assessment of the depth of the compressible stratum when calculating the foundations of foundations. XI International Scientific Conference of young scientists «Young — Earth Sciences». Moscow, 2024. P. 15–19 (In Russ.).
2. Gorlov A.A., Fomenko I.K. Stochastic calculation of the foundation foundation precipitation using the random finite element method (RFEM). Proceedings of the sixth All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Specialists «Engineering surveys in construction». Moscow, 2024. P. 150–156 (In Russ.).
3. Zerkal O.V., Fomenko I.K., Samarin E.N., 2023. Probabilistic approach to slope stability modeling: implementation and features. Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2023. No. 6. P. 26–38 (In Russ.).
4. Kurguzov K.V., Fomenko I.K., Sirotkina O.N. Probabilistic and statistical approaches to estimating uncertainty of lithotechnical systems. Geocology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology. 2020. No. 2. P. 65–74 (In Russ.).
5. Raiser V.D. Theory of reliability in construction design. Moscow: Publishing House of the DIA, 1998 (In Russ.).
6. Fomenko I.K., Zerkal O.V., Gorlov A.A., Averin I.V., Shubina D.D. Evaluation of the compressible thickness of foundations in numerical modeling (in the order of discussion). Industrial and civil engineering. 2024. No. 8. P. 65–70 (In Russ.).
7. Fomenko I.K., Kropotkin M.P. Comparison of probabilistic calculations in the analysis of the stability of slopes of road embankments by the finite element method. Materials of the eighteenth All-Russian Scientific and Practical Conference and exhibition «Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation». Moscow, 2023. P. 19–27 (In Russ.).
8. Baecher G., Christian J. Reliability and statistics in geotechnical engineering. New Jersey, USA: Publishing house of the John Wiley and Sons. 2005.
9. Fenton G., Griffith D. Risk assessment in geotechnical engineering. New Jersey, USA: Publishing house of the John Wiley & Sons. 2008.
10. Griffiths D., Fenton G. Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering. New York, USA: Publishing house of Springer. 2007.
11. Ohde J. Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Der Bauingenieur. № 20. 1939. Heft 33/34. p. 451–459.
12. Tang C., Phoon K.-K. Databases for Data-Centric Geotechnics: Geotechnical Structures. Boca Raton: CRC Press. 2025.
13. Terzaghi K., Peck R., Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. New Jersey, USA: Publishing house of the John Wiley & Sons. 1996. P. 592.
14. Vanmarcke E. Random fields: analysis and synthesis. Cambridge, UK: MIT Press. 1983.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Горлов А.А. — подготовил текст статьи, подготовил данные для построения и расчета моделей в программе OptumG2, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Фоменко И.К. — разработал концепцию статьи, определил методы исследования, внес вклад в подготовку текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Наумов М.А. — выполнил обработку данных для вероятностной оценки, внес вклад в подготовку текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Andrey A. Gorlov — prepared the text of the article, prepared the data for constructing and calculating models in the OptumG2 program, finally approved the published version of the article and agreed to assume responsibility for all aspects of the work.

Igor K. Fomenko — developed the concept of the article, defined the research methods, contributed to the preparation of the text of the article, finally approved the published version of the article and agreed to assume responsibility for all aspects of the work.

Mikhail A. Naumov — performed data processing for probabilistic estimation, contributed to the preparation of the text of the article, finally approved the published version of the article and agrees to assume responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Горлов Андрей Александрович* — аспирант кафедры инженерной геологии, ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»,
23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия
e-mail: andrey.gor10@yandex.ru
SPIN-код: 3842-6251
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3486-3051>

Andrey A. Gorlov* — Post-graduate researcher of the Department of Engineering Geology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
Miklukho-Maklaya str., 23, Moscow 117997, Russia
e-mail: andrey.gor10@yandex.ru
SPIN-code: 3842-6251
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3486-3051>

Фоменко Игорь Константинович — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»,
23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия
e-mail: ifolga@gmail.com
SPIN-код: 9127-1871
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015>

Igor K. Fomenko — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor of the Department of Engineering Geology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23 Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: ifolga@gmail.com
SPIN-code: 9127-1871
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2318-6015>

Наумов Михаил Александрович — аспирант кафедры инженерной геологии ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»,
23, ул. Миклухо-Маклая, Москва 117997, Россия
e-mail: naumovma@mgri.ru
SPIN-код: 5048-6082
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6323-384X>

Mikhail A. Naumov — Post-graduate researcher of the Department of Engineering Geology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
Miklukho-Maklaya str., 23, Moscow 117997, Russia
e-mail: naumovma@mgri.ru
SPIN-code: 5048-6082
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6323-384X>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ОРИГИНАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

УДК 553.824(575.3)

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-119-127>

EDN: [EZHDED](#)



РОЛЬ ТЕКТОНИКИ В ФОРМИРОВАНИИ ЛАТЕРИТНОЙ КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ ГВИНЕЯ

Л.А. ЯРГ, А.С. КАМАРА*, В.В. НЕВЕЧЕРЯ

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В последние годы в Республике Гвинея наблюдается значительный рост строительства и реконструкции базовой инфраструктуры: строительство международного аэропорта Конакри, ГЭС Амария, Кукутамба, модернизация порта Конакри и других жизненно важных систем. Этот динамичный процесс потребовал проведения региональных инженерно-геологических исследований латеритных кор выветривания на территории Гвинеи, поскольку они являются основой в большинстве случаев вышеупомянутых сооружений.

Цель. Развитие теоретических положений формирования инженерно-геологической латеритной формации и оценка роли геодинамики Срединно-Атлантического рифта на формирование коры выветривания Гвинеи.

Материалы и методы. Сбор, анализ и обобщение общегеологических, географических литературных и фондовых материалов и личные полевые и лабораторные исследования авторов для понимания роли геодинамики на формирование коры выветривания и их классифицирования.

Результаты. Изложена концепция влияния экваториального сегмента Атлантического рифта на формирование латеритной бокситоносной коры выветривания Гвинеи.

Заключение. Концепция является оригинальной для понимания закономерностей формирования состава, структурно-текстурных особенностей и физико-механических свойств инженерно-геологической формации ЛКВ.

Ключевые слова: геодинамика, дискретность массива, поверхности выравнивания, инженерно-геологическая формация ЛКВ, классифицирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Ярг Л.А., Камара А.С., Невечеря В.В. Роль тектоники в формировании латеритной коры выветривания Республики Гвинея. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2026;68(1):119—127. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-119-127> EDN: [EZHDED](#)

Статья поступила в редакцию 31.07.2025

Принята к публикации 06.03.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

ROLE OF TECTONICS IN THE FORMATION OF LATERITIC WEATHERING CRUST IN THE REPUBLIC OF GUINEA

LIUDMILA A. YARG, ABOUBACAR S. CAMARA*, VADIM V. NEVECHERIA

*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting
23, Mikluho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

ABSTRACT

Background. In recent years, the Republic of Guinea has experienced a significant growth in the construction and reconstruction of basic infrastructures, including Conakry International Airport, the Amaria and Kukutamba hydroelectric power stations, the port of Conakry among other essential facilities. This dynamic process necessitates regional engineering and geological research of lateritic weathering crusts in Guinea, as they serve as the foundation for most of the aforementioned structures.

Aim. Development of the theoretical principles governing the development of engineering and geological lateritic formations and assessment of the influence of Mid-Atlantic rift geodynamics on the weathering crust of Guinea.

Materials and methods. Collection, analysis, and review of geological and geographical scientific publications, archival materials, and the authors' field and laboratory data with the purpose of establishing the role of geodynamics in the formation of weathering crusts and their classification.

Results. A concept has been proposed to describe the influence of Atlantic rift geodynamics on the formation of Guinea's lateritic bauxite-bearing weathering crust.

Conclusion. The proposed original concept elucidates the composition formation patterns, structural and textural features, and physical and mechanical properties of the engineering and geological formation of the lateritic weathering crust.

Keywords: geodynamics, massif discreteness, alignment surfaces, engineering and geological formation, lateritic weathering crust, classification

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Financial disclosure: no financial support was provided for this study.

For citation: Yarg L.A., Camara A.S., Nevecheria V.V. Role of tectonics in the formation of lateritic weathering crust in the Republic of Guinea. Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 2026;68(1):119—127. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-119-127> EDN: EZHDED

Manuscript received 31 July 2025

Accepted 06 March 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Республика Гвинея в последние годы добилась значительного прогресса в создании базовой инфраструктуры [3]. Эти достижения знаменуют собой динамику современного развития Гвинеи. Основанием сооружений в большинстве случаев служит латеритная кора выветривания (ЛКВ).

В данной работе на основании естественно-исторического подхода формирования инженерно-геологических структур оценивается роль геодинамики в формировании ЛКВ Гвинеи.

Среди всех континентов наибольшие площади ЛКВ расположены в Экваториальной Африке. Леоно-Либерийский — один из самых крупных

эократон является основной тектонической структурой Гвинеи, Сьерра-Леоне, Кот-д'Ивуара, Ганы. ЛКВ мощностью 100 м и более покрывают обширные плато и пенеплены [4, 7, 9, 10].

Большая роль в формировании ЛКВ, ранее не замечавшаяся, принадлежит геодинамике: спредингу Африканской и Южно-Американской плит и развитию Срединно-Атлантического рифта (рис. 1). Центральная Атлантика представляет собой один из ключевых объектов для понимания тектонических процессов и формирования структур Экваториальной Африки. Исходя из кинематики движения плит, начальный этап раскрытия

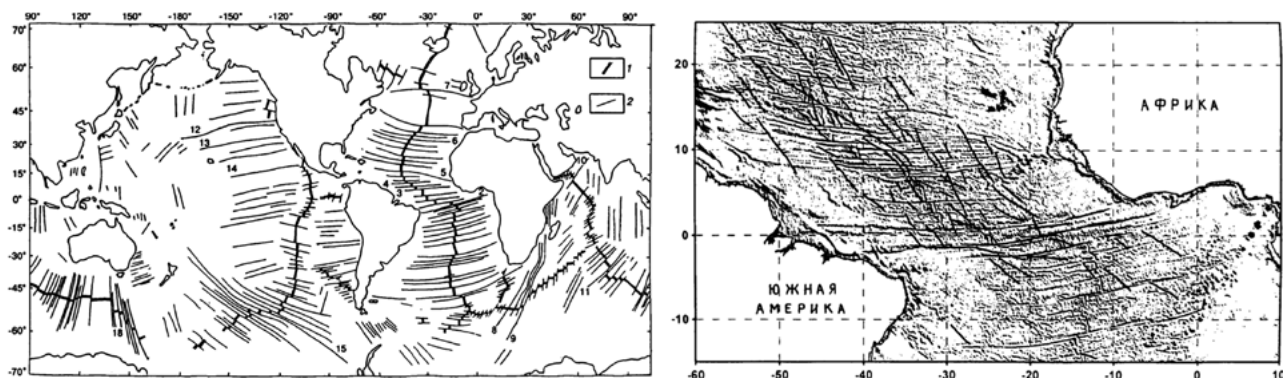


Рис. 1. Раскрытие Атлантического рифта и резкого сгущения поперечных и меридиональных разломов в Экваториальном сегменте САР

Fig. 1. The opening of the Atlantic rift and the sharp condensation of transverse and meridional faults in the Equatorial segment of the САР

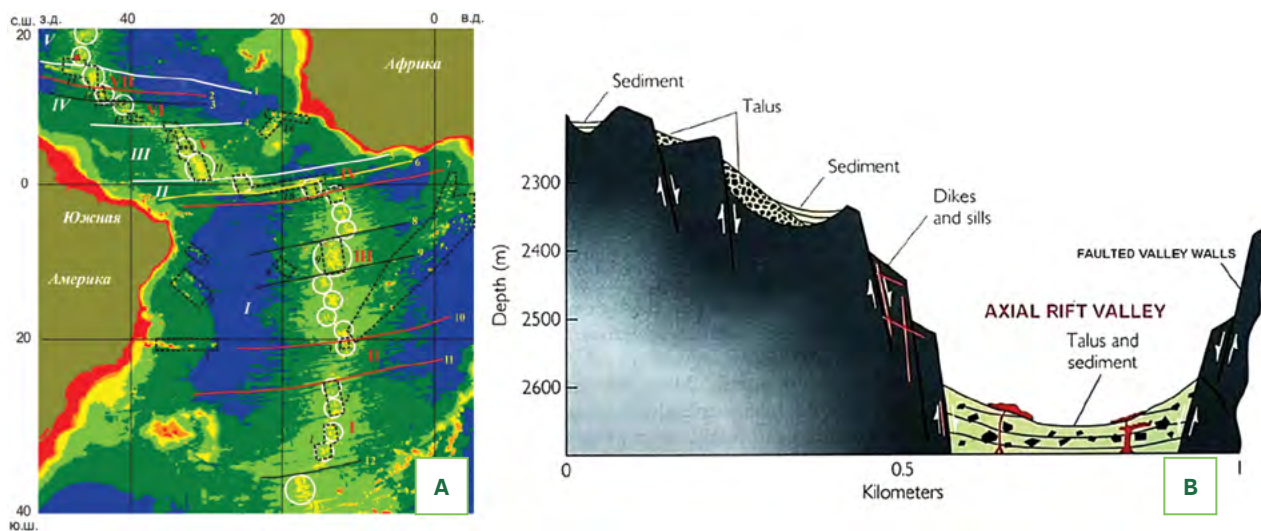


Рис. 2. Тектономагматические провинция Экваториального фрагмент САР (А) [8] и схема строения рифта Сьерра-Леоне (В)

Fig. 2. Tectonomagmatic province of the Equatorial SAR fragment (А) and the structure scheme of the Sierra Leonean rift (В)

экваториальной области проходил не в широтном, а в меридиональном направлении и реализовался в виде правосторонних сдвиговых деформаций с растяжением, что подчеркивает сложная форма границы раскола Африки — Южной Америки в районе Гвинейского залива [6].

В сложно построенном Экваториальном сегменте рифтовой системы выделяются зоны резкого сгущения поперечных разломов, смещающих рифтовую зону на восток — рифт Сьерра-Леоне (рис. 2).

Детальное изучение рифта Сьерра-Леоне с помощью многолучевого эхолота SIMRAD 12S, непрерывного сейсмопрофилеирования и драгирования

выполнялось в ходе проведения 22-го рейса НИС «Академик Николай Страхов» в Центральную Атлантику (тектонические структуры, магматизм и глубинное строение океанского и морского дна, 2000 г.) совместно с сотрудниками Института морской геологии Италии под научным руководством академика Ю.М. Пущаровского [5]. Исследования в районе разлома Сьерра-Леоне выявили сложную картину формирования Экваториального сегмента Срединно-Атлантического хребта (САР) [5]. Структура характеризуется весьма неоднородным строением и сложной геодинамикой. Рифт Сьерра-Леоне имеет сложную форму с многочисленными изгибами, дно современной рифтовой



Рис. 3. Глобальные тектонические воздействия экваториального сегмента САХ на Леоно-Либерийский щит
Fig. 3. Global tectonic impacts of the equatorial segment of the Arctic Ocean on the Leono-Liberian Shield

долины — плоское, сложенное потоками свежих подушечных базальтов, высота борта желоба достигает 1800–2800 м, обнаружены признаки широко распространенной гидротермальной активности. Сложное сочетание разновременных и разнонаправленных полей напряжений сопровождается образованием многочисленных зон растяжения. Субширотные линии — трансформные разломы, разделяют тектономагматические провинции (рис. 2А): I — Южно-Атлантическая; II — Романш; III — Сьера-Леоне; IV — Вима; V — Центрально-Атлантическая.

Развитие структуры континентальных окраин объясняется не только движением по системе нормальных сбросов, параллельных границе «океан — континент», т.е. параллельных оси древнего рифта, но также наличием поперечных разрывов, которые отделяют друг от друга блоки земной коры.

С формированием и эволюцией структур Атлантического океана связано формирование и эволюция тектонического строения континентальной

части Африки, формирование геологического строения, рельефа, геоморфологические условия Гвинеи.

На рисунке 3 приведены глобальные тектонические воздействия экваториального сегмента Срединно-Атлантического хребта (САХ), которые оказывают влияние на Леоно-Либерийский щит.

В конце палеозоя — мезозое Западная Африка испытала мощную тектономагматическую активизацию в связи с распадом Гондванского континента и раскрытием Атлантики [4]. На суше эта активизация выразилась образованием системы трансформных глубинных разломов и многочисленных опережающих нарушений, внедрением по ним многочисленных трапповых интрузий и кимберлитов (рис. 4).

Дискретность массива создавали не только крупные тектонические разрывы (рис. 4), но и сопряженные с ними зоны трещиноватости [1, 8]: а) оперения разломов; б) веерообразной трещиноватости расщепления разлома; в) системы мелких крутопадающих трещин дробления; г) системы трещин растяжения и дробления, развивающиеся

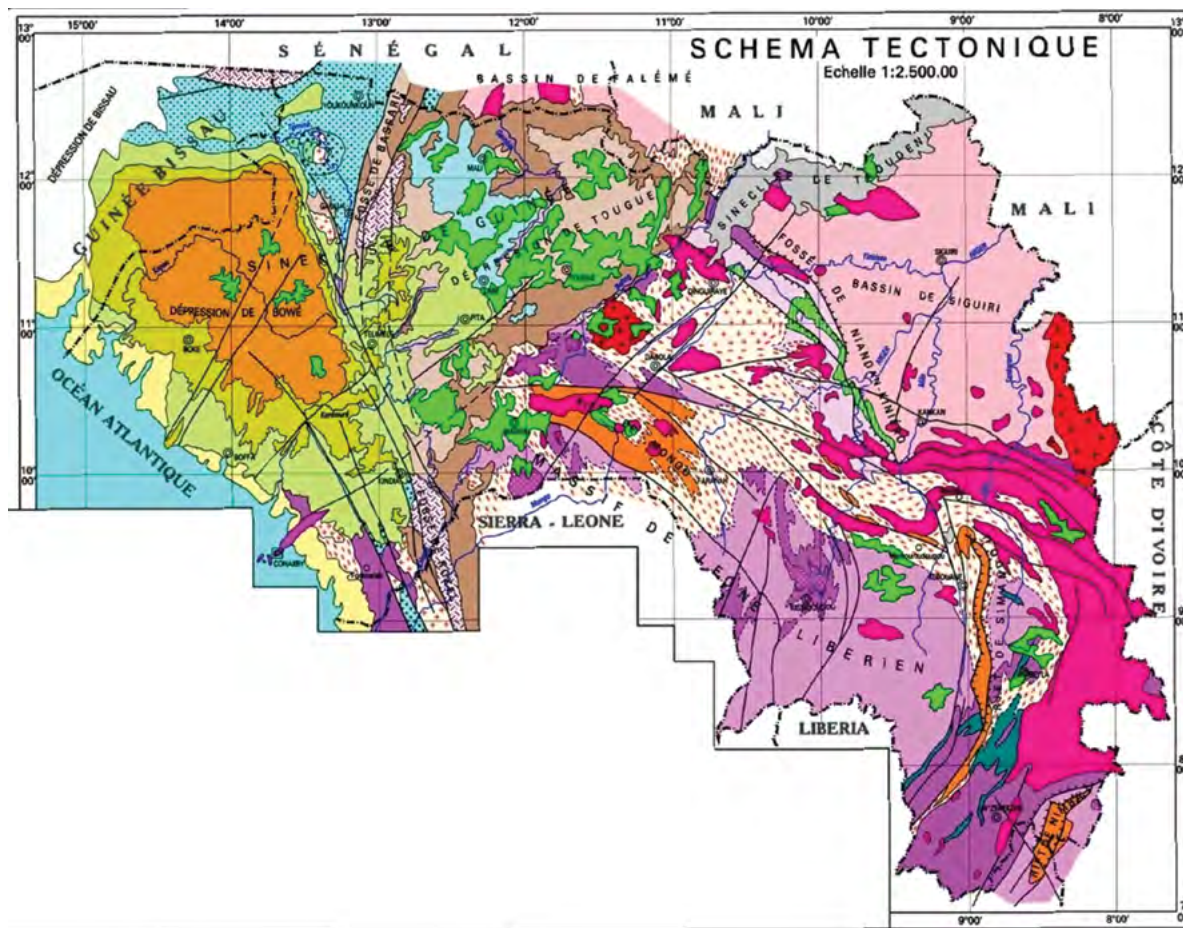


Рис. 4. Разломная тектоника обуславливает блоковое строение Леоно-Либерийского массива
Fig. 4. Fault tectonics determines the block structure Leono-Liberian massif

в куполовидных частях антиклинальных структур и др. Сдвиговые перемещения по трансформным разломам не затухают, а преобразуются в другие формы тектонических движений.

Медленные вздымания Леоно-Либерийского щита благоприятствовали раскрытию старых и возникновению новых трещин. На протяжении длительной истории развития они неоднократно подновлялись. Дискретность массива (рис. 5), высокая его проницаемость, огромная удельная поверхность и способствовала проникновению атмосферных осадков на большую глубину.

Дифференцированные разнонаправленные блоковые перемещения в массиве более predeterminedляли формирование поверхности выравнивания, отмечаемые на абс. отм. 225–275, 350–375, 450–550, 600–800 м (табл.), создав ярусность строения рельефа. Перманентные положительные движения, денудация и выветривание сформировали коры выветривания мощностью от 30 до 150 м,



Рис. 5. Дискретность массива в зоне континентальных окраин

Fig. 5. Discreteness of the massif in the zone of continental margins

Таблица. Геоморфология и кора выветривания
Table. Geomorphology and weathering crust

Геоморфология	Возраст	Абсолютные отметки, м	Характер распространения		Кора выветривания Условия залегания	Мощность КВ
Высокие выровненные поверхности	Позднемиоценовой	1150–1200	Фрагментарное	Плато Fouta Djallon-Mandingo, Гвинейская возвышенность	Площадная КВ Линейная КВ	137 27–384
Африканская поверхность выравнивания	Среднемиоценовой	700–1100	Широкое распространение	Плато Fouta Djallon-Mandingo, Гвинейская возвышенность	Площадная КВ Линейная КВ	79 23–146
Нижняя выровненная поверхность	Средний плейстоцен	260–280	На склонах речных долин	Гвинейская возвышенность, плато Fouta Djallon	Педименты КВ	31 15–72
Высокая терраса р. Milo	Плиоцен	640–720	Плоские поверхности, расчлененные эрозионными врезами водотоков	Долины рек Tinkisso, Milo и др.	Переотложенная КВ Галька идеально окатанная, кварцевого (60–70 %) состава, покрытая железистой рубашкой; мощность 6–8 м	
II террасы долин рек	Средний плейстоцен	20–25	Фрагментарно: прерывистые полосы шириной 300–1500 м по бортам долин рек	Долины рек Tinkisso, Milo и др.	Погребённая КВ. Перекрыта мелким обломочным аллювием, мощностью 5–7 м, представленным кварцем и латеритом. Кровля сцементирована гидроокислами железа с образованием кирасы, мощность 1,0–1,25 м	
I надпойменные террасы высотой	Поздний плейстоцен	8–10	Непрерывные полосы вдоль русел рек; ширина террас 400 м, крупных — первые километры	Долины рек Tinkisso, Milo и др.	Переотложенная КВ. Супеси и суглинки, с большим количеством латеритного обломочного материала, закономерно увеличивающимся вверх по разрезу, мощность 4–10 м	
II морская терраса	Средний плейстоцен	10–30	Повсеместно	Приморская равнина	Площадная КВ С поверхности породы латеритизированы и бронированы кирасой средней степени твердости. Мощность 2,5 м	
Мангровые побережья и пляж	Голоцен	0–10	Полосы мангр шириной 6–8 км, пляжей, разделенные эстуариями рек	Приморская равнина	Погребённая КВ. Перекрыта песками кварцевыми, с обломками кирасы. Мощность 10 м	



Рис. 6. Классифицирование латеритной коры выветривания
Fig. 6. Classification of the lateritic weathering crust

перекрывающие пенеплены или погребённые в опущенных частях под более молодыми: аллювиальными (в долинах рек) и морскими отложениями на побережье (табл.).

Классификация инженерно-геологической латеритной формации КВ с учетом субстрата, условиями залегания, возраста и мощностью ЛКВ (табл.) представлена на рисунке 6.

Согласно критериям выделения формации при инженерно-геологических исследованиях, предложенным Г.К. Бондариком [2], «Формация — это геологическое тело, сформировавшееся в определенных тектонических и палеогеографических условиях, пережившее определенную историю геологического развития и представляющее собой парагенетически связанные стратиграфо-генетические комплексы отложений».

Авторы предлагают следующую формулировку: «Инженерно-геологическая латеритная формация коры выветривания экваториальных стран (Леоно-Либерийский щит) — это геологическое тело, гипергенно-эндогенного происхождения, а) сформировавшееся в условиях континентальных окраин (спрединге Африканской и Южно-Американской плит); б) с активной геодинамикой, создавшей дискретности массива; в) в условиях экваториального климата, сохраняющегося в течение длительного геологического периода (К-Q);

г) характеризующееся инженерно-геологической зональностью вертикального строения; д) закономерной изменчивостью минерального и гранулометрического состава, структурно-текстурных связей, физико-механических свойств в вертикальном профиле ЛКВ».

Заключение

1. Бокситоносная кора выветривания является инженерно-геологической формацией, пережившей сложную историю геологического развития, сформировавшейся в определенных тектонических и палеогеографических условиях в течение длительного периода формирования (с мезозоя до настоящего времени) в условиях тропического климата.

2. КВ Гвинеи является продуктом эндогенного и экзогенного происхождения. Важная роль в формировании инженерно-геологической латеритной формации КВ Леоно-Либерийского кристаллического массива принадлежит геодинамике: спредингу Африканской и Южно-Американской плит. Существенное влияние на распространение, структуру и условия залегания ЛКВ оказали тектонические движения, связанные с формированием Сьера-Леонского рифта.

3. Геотектоника привела к дискретности Леоно-Либерийского массива, испещренного крупными, в том числе трансформными, разломами,

дифференцированным разнонаправленным блоковым перемещением, создала высокую проницаемость массива, огромную удельную поверхность взаимодействия с агентами выветривания, способствовала формированию площадных и линейных кор выветривания.

4. При инженерно-геологической оценке территории Гвинеи значимым компонентом инженерно-геологических условий являются латеритная формация, состав субстрата, условий залегания, возраста, поверхности выравнивания и мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абатурова И.В. и др. Инженерно-геологические условия месторождений твердых полезных ископаемых и методы их изучения. М.: Ай Пи Ар Медиа, 2023. 276 с. ISBN 978-5-4497-1793-1.
2. Бондарик Г.К. Общая теория инженерной (физической) геологии. М.: Недра, 1981.
3. Камара А.С., Невечера В.В., Ярг Л.А. Специальная инженерно-геологическая карта распространения эндо- и экзогенных геологических процессов Гвинейской Республики. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023;65(6):26–40. DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-6-26-40
4. Мамедов В.И., Буфеев Ю.В., Никитин Ю.А. Геология Гвинейской республики. Т. 1. Изд-во МГУ. 2011. 341 с.
5. Пейве А.А. Структурно-вещественные неоднородности, магматизм и геодинамические особенности Атлантического океана. Труды ГИН РАН. Вып. 548. М.: Научный мир, 2002. 314 с.
6. Пушаровский Ю.М. Тектоника Атлантики с элементами нелинейной геодинамики. Тр. ГИН АН СССР. Вып. 481. 1994. 83 с.
7. Селиверстов Ю.П. Эволюция рельефа и покровные образования влажных тропиков Сахарской платформы. Л.: Недра, 1978. 285 с.
8. Сколотнев С.Г. Регулярные и региональные вариации вещественного состава и строения океанической коры и структуры океанического дна Центральной, Экваториальной и Южной Атлантики: дис. ... д-ра геол.-мин. наук, М., 2019.
9. Ярг Л.А. Эволюция кор выветривания Земного шара. Геология и разведка. 2014. № 5. С. 53–74.
10. Guillocheau F., Simon B., Baby G., Bessin P., Robin C., Dauteuil O. Planation surfaces as a record of mantle dynamics: The case example of Africa. Gondwana Research. 2018. Vol. 53. P. 82–98.

REFERENCE

1. Abaturova I.V., et al. Engineering and geological conditions of solid mineral deposits and methods of their study. Moscow: IP Media, 2023. 276 p. (In Russ.) ISBN 978-5-4497-1793-1.
2. Bondarik G.K. General theory of Engineering (physical) Geology. Moscow: Nedra Publ., 1981 (In Russ.).
3. Camara A.S., Nevecheria V.V., Yarg L.A. Special-purpose geotechnical map on distribution of endo- and exogenous geological processes of the Republic of Guinea. Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 2023;65(6):26–40 (In Russ.). DOI: 10.32454/0016-7762-2023-65-6-26-40
4. Mamedov V.I., Bufeev Yu.V., Nikitin Yu.A. Geology of the Republic of Guinea. T. 1. MSU Publ., 2011. 341 p. (In Russ.).
5. Peive A.A. Structural and material inhomogeneities, magmatism and geodynamic features of the Atlantic Ocean. Proceedings of the GIN RAS, Issue 548. Moscow: Scientific World, 2002. 314 p. (In Russ.).
6. Pushcharovsky Yu.M. Tectonics of the Atlantic with elements of nonlinear geodynamics. Proceedings of the GIN USSR Academy of Sciences. 1994. Issue. 481. 83 p. (In Russ.).
7. Seliverstov Yu.P. Evolution of relief and cover formations of the humid tropics of the Sahara platform. Leningrad: Nedra, 1978. 285 p. (In Russ.).
8. Skolotnev S.G. Regular and regional variations in the material composition and structure of the oceanic crust and the structure of the ocean floor of the Central, Equatorial and South Atlantic. Doc. dissertation. Moscow, 2019 (In Russ.).
9. Yarg L.A. Evolution of the Earth's weathering crusts. Geology and exploration. 2014. Vol. 5. P. 53–74 (In Russ.).
10. Guillocheau F., Simon B., Baby G., Bessin P., Robin C., Dauteuil O. Planation surfaces as a record of mantle dynamics: The case example of Africa. Gondwana Research. 2018. Vol. 53. P. 82–98.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ярг Л.А. — разработала концепцию и подготовила текст статьи, осуществляла научное и методическое руководство, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Liudmila A. Yarg — developed the concept and prepared the text of the article, carried out scientific and methodological supervision, finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Камара А.С. — собрал материал, участвовал в разработке методологии и подготовке текста статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Невечеря В.В. — предложил концептуальную идею направления исследований, участвовал в обработке результатов, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Kamara S. Abubakar — collected the material, participated in the development of the methodology and preparation of the text of the article and finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

Vadim V. Nevecherya — proposed the conceptual idea of the direction of research, participated in the processing of the results, finally approved the published version of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / ABOUT THE AUTHORS

Ярг Людмила Александрина — доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе, заслуженный деятель высшего образования РФ.
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: liudmila.yarg@yandex.ru
тел.: +7 (903) 730-35-84
SPIN-код: 6449-9386
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7501-3304>

Liudmila A. Yarg — Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Professor of the Department of Engineering Geology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation.
23, Mikluho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: liudmila.yarg@yandex.ru
tel.: +7 (903) 730-35-84
SPIN-code: 6449-9386
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7501-3304>

Камара Абубакар Сидики — аспирант кафедры инженерной геологии Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: aboubacarsidiki.camara@yandex.ru
тел.: +7 (901) 400-22-06
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1663-4568>

Camara S. Aboubacar — post-graduate researcher of the Department of Engineering Geology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Mikluho-Maklaya St., Moscow 117997, Russia
e-mail: aboubacarsidiki.camara@yandex.ru
tel.: +7 (901) 400-22-06
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1663-4568>

Невечеря Вадим Вадимович — кандидат геолого-минералогических наук, декан гидрогеологического факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе.
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: nevecheryavv@mgi.ru
тел.: +7 (915) 122-09-16
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3250-2016>

Vadim V. Nevecherya — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), head of the Faculty of Hydrogeology of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Mikluho-Maklaya Street, Moscow 117997, Russia
e-mail: nevecheryavv@mgi.ru
tel.: +7 (915) 122-09-16
SPIN-code: 5598-6480
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-3250-2016>



ВОПРОСЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КОЛОНН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН СКВАЖИННОГО ПОДЗЕМНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА

А.Г. ИВАНОВ¹, Ю.А. АРСЕНТЬЕВ^{2,*}, Д.Д. ОРЕХОВ²

¹АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии»
33, Каширское шоссе, г. Москва 11540, Россия

²ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный институт имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117497, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания требует специальных методов сооружения и эксплуатации технологических скважин для обеспечения их безаварийной работы до окончания срока отработки добычных объектов: ячеек, блоков, залежей. Функционирование скважин сопровождается воздействием на полимерные эксплуатационные колонны различных видов нагрузок, среди которых выделяются температурные и гидростатические. Настоящая статья посвящена расчетному обоснованию выбора оснастки и материалов гидроизоляции для предупреждения нарушений целостности эксплуатационных колонн обсадных труб путем применения центраторов-смесителей, устьевых центраторов, вязкоупругих материалов. Приведены методики определения величины интервалов цементирования (интервалов гидроизоляции) и допускаемой высоты обсыпки заколонного пространства сыпучими материалами.

Цель. Обеспечение целостности поверхности полимерных эксплуатационных колонн технологических скважин в условиях, характеризующихся переменным температурным режимом добычи урана методом скважинного подземного выщелачивания.

Материалы и методы. В настоящей работе поставленная задача решается путем анализа сущности физических процессов, происходящих при сооружении и эксплуатации технологических скважин, и сопоставлением эффективности предлагаемых технических решений, в качестве оценочного критерия для которых был выбран срок безаварийной работы полимерных эксплуатационных колонн.

Результаты. Исследования показали, что эффективными из предлагаемых к реализации технических решений для оснащения полимерных эксплуатационных колонн обсадных труб являются средства, обеспечивающие возможность их линейного перемещения в осевом направлении на этапах сооружения и эксплуатации технологических скважин.

Заключение. Применение новых технических средств оснащения эксплуатационных колонн позволяет исключить их аварийность при отработке месторождений методом скважинного подземного выщелачивания урана.

Ключевые слова: технологические скважины, полимерные обсадные трубы, эксплуатационная колонна, температурные напряжения, заколонная гидроизоляция, устье скважины, вязкоупругий материал, центраторы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Орехов Д.Д. Вопросы формирования конструкции эксплуатационных колонн технологических скважин скважинного подземного выщелачивания урана. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2026;68(1):128—138. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-128-138> EDN: [FBYIBP](https://www.edn.ru/)

Статья поступила в редакцию 15.09.2025
Принята к публикации 05.02.2026
Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

ISSUES IN THE DESIGN OF PRODUCTION STRINGS OF PROCESS WELLS FOR *INSITU* URANIUM LEACHING

ALEXANDER G. IVANOV¹, YURI A. ARSENTYEV^{2,*}, DANILA D. OREKHOV²

¹ *Leading Design, Survey and Research Institute of Industrial Technology*
33, Kashirskoye highway, Moscow 11540, Russia

² *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting*
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117497, Russia

ABSTRACT

Background. Uranium mining by in-situ leaching (ISL) requires specialized methods for the construction and operation of process wells to ensure their reliable performance throughout the entire mining period of cells, blocks, and deposits. During operation, polymer production casing strings are subjected to various loads, among which thermal and hydrostatic loads are particularly significant. This article presents a calculation-based justification for the selection of well equipment and waterproofing materials for preventing violations of the integrity of production casing strings through the use of displacement centralizers, wellhead centralizers, and viscoelastic materials. Methods for determining the cementing (waterproofing) intervals and the permissible height for filling the annular space with bulk materials are presented.

Aim. To ensure the integrity of polymer production strings of process wells operated under variable temperature conditions during uranium mining by *insitu* leaching.

Materials and methods. Physical processes occurring during the construction and operation of process wells were analyzed. The effectiveness of available engineering solutions was compared based on the period of accident-free operation of polymer production strings.

Results. Effective engineering solutions proposed for equipping polymer production casing strings are those that provide the possibility of their linear movement in the axial direction at the stages of construction and operation of process wells.

Conclusion. The use of latest engineering solutions for equipping production strings makes it possible to mitigate the risk of accidents during the development of uranium deposits by in-situ leaching.

Keywords: process wells, polymer casing pipes, production string, temperature stress, behind-the-casing waterproofing, wellhead, viscoelastic material, centralizers

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Ivanov A.G., Arsenyev Yu.A., Orekhov D.D. Issues in the design of production strings of process wells for *insitu* uranium leaching. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2026;68(1):128—138. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-128-138> EDN: [FBYIBP](https://www.edn.ru/)

Manuscript received 15 September 2025

Accepted 05 February 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Технологические скважины являются горными выработками, через которые в продуктивный водоносный горизонт попадают выщелачивающие растворы (ВР), а на поверхность извлекаются продуктивные растворы (ПР), содержащие полезный металл. При этом срок безаварийной работы соответственно нагнетательных и откачных скважин, определяющийся состоянием эксплуатационной колонны, должен быть сопоставим с продолжительностью отработки добычной единицы (ячейки, блока, залежи). В связи с этим обстоятельством материалом обсадных труб, из которых формируется эксплуатационная колонна, должен быть прежде всего непластифицированный поливинилхлорид (НПВХ) с различными добавками, повышающими, например, морозостойкость и ударную прочность, тем самым выгодно отличающийся от полиэтилена низкого давления (ПНД), обладающего пониженными прочностными характеристиками, практически не применяемым для скважин, сооружаемых в зоне многолетнемерзлых горных пород (криолитозона).

Однако требование к качеству материала рекомендуемых к использованию обсадных труб является всего лишь одним из обязательных к исполнению критериев работоспособности эксплуатационной колонны наравне с другими, в зависимости от конкретных горно-геологических условий сооружения скважин, таких как, например, совместимость материала обсадных труб с применяемым материалом гидроизоляции заколонного пространства; влиянием изменения температуры рабочих растворов в процессе эксплуатации скважин; температурного фактора при спуске обсадных труб в скважину и других. Настоящая работа представляет собой попытку научно обосновать критерии применения различных элементов оснастки эксплуатационных колонн при сооружении скважин.

К общим основным внешним факторам, влияющим на состояние эксплуатационной колонны в процессе сооружения и эксплуатации скважин, можно отнести:

— применение в качестве материала гидроизоляции заколонного пространства цементного раствора на основе сульфатостойкого цемента;

— линейные изменения длины эксплуатационной колонны при изменении температуры рабочих растворов, прежде всего ВР, в зависимости от сезона эксплуатации скважин;

— потерю осевой устойчивости эксплуатационной колонны как при сооружении, так и при эксплуатации скважин;

— старение материала обсадных труб (начиная отсчет с даты изготовления), приводящее к снижению их прочностных свойств.

Цементирование эксплуатационных колонн независимо от материала обсадных труб приводит к их заземлению в цементном камне по окончании ожидания затвердевания цементного раствора (ОЗЦ). Вопросы качества гидроизоляции в настоящей работе глубоко не рассматриваются ([2, 3, 16] и др.). Подобная ситуация возникает и при заполнении заколонного пространства любым инертным материалом с высокой плотностью, например песчано-гравийной смесью. При этом гидроизоляция заколонного пространства технологических скважин СПВ урана цементным раствором имеет ряд особенностей. Одной из них является разница численных значений коэффициента линейного расширения α , $1/^\circ\text{C}$ материалов контактной пары при изменении температуры транспортируемых растворов. Так, цементирование стальных обсадных колонн не вызывает температурных напряжений в трубах, поскольку для стали и цементного камня величина коэффициента линейного расширения практически одинакова и равна $\alpha = 0,00001 \text{ } 1/^\circ\text{C}$. А для обсадных труб НПВХ этот же коэффициент составляет $\alpha = 0,00006 \text{ } 1/^\circ\text{C}$ (для труб из полиэтилена низкого давления ПНД он еще больше и составляет $\alpha = 0,0002 \text{ } 1/^\circ\text{C}$), что приводит к возникновению значительных нагрузок в теле полимерных труб при изменении температуры транспортируемых по эксплуатационной колонне растворов, прежде всего ВР в нагнетательных скважинах. В таблице 1 приведены данные о температуре пород криолитозоны $T_{\text{кз}}$, обсадных труб при спуске их в скважину $T_{\text{от}}$ и выщелачивающих растворов $T_{\text{вр}}$ по 5 различным залежам группы месторождений, расположенных в криолитозоне.

В приведенной таблице 1 температура обсадных труб $T_{\text{от}}$ принята равной среднемесячной температуре по району проведения работ. Температура выщелачивающих растворов $T_{\text{вр}}$ в феврале измерялась при температуре воздуха $T_{\text{в}} = -20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Абсолютное удлинение обсадных колонн из труб НПВХ и ПНД просчитано для различных периодов года и приведено в таблицах 2, 3 и 4 при начальной расчетной длине $L = 50 \text{ м}$. Коэффициент линейного расширения материала для труб НПВХ был принят равным $\alpha = 0,00006 \text{ } 1/^\circ\text{C}$, а для труб ПНД соответственно $\alpha = 0,0002 \text{ } 1/^\circ\text{C}$. Для определения абсолютного удлинения колонны обсадных труб использовалась известная из курса «Сопротивление материалов» зависимость:

$$\Delta L = \alpha \times L \times \Delta T. \quad (1)$$

Таблица 1. Сведения по температурным характеристикам для выполнения расчетов
Table 1. Information on temperature characteristics for calculations

Месяц	Температура, °С			
	Породы криоли-тозоны, $T_{кз}$	Обсадные трубы, $T_{от}$	Перепад температуры $\Delta T = T_{кз} - T_{от}$	Выщелачивающие растворы (в отстойниках), $T_{вр}$
Январь	-2 °С	-20,4 °С	18,4	
Февраль	-2 °С	-16,1 °С	14,1	1 +22; 2 +23; 3 +5; 4 +3, 5 +9
Март	-2 °С	-8,8 °С	6,8	
Апрель	-2 °С	+0,5 °С	2,5	
Май	-2 °С	+10,7 °С	12,7	
Июнь	-2 °С	+20,5 °С	22,5	
Июль	-2 °С	+17,2 °С	19,2	
Август	-2 °С	+18,0 °С	20,0	2 +35; 3 +10; 4 +18; 5 +11; 6 +10
Сентябрь	-2 °С	+12,1 °С	14,1	
Октябрь	-2 °С	+0,5 °С	2,5	
Ноябрь	-2 °С	-11,7 °С	9,7	
Декабрь	-2 °С	-20,8 °С	18,8	

Таблица 2. Абсолютное удлинение обсадной колонны нагнетательных скважин
Table 2. Absolute elongation of the casing string of injection wells

Месяц		Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март
Перепад температуры ΔT , °С		9,7	18,8	18,4	14,1	6,8
Изменение длины труб ΔL , м	ПНД	0,097	0,188	0,184	0,141	0,068
	НПВХ	0,0291	0,0564	0,0552	0,042	0,0204

Таблица 3. Абсолютное удлинение обсадной колонны нагнетательных скважин
Table 3. Absolute elongation of the casing string of injection wells

Месяц		Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Перепад температуры ΔT , °С		2,5	12,7	22,5	19,2	20,0	14,1	2,5
Изменение длины ΔL , м	ПНД	0,025	0,127	0,225	0,19	0,2	0,14	0,025
	НПВХ	0,0075	0,0381	0,0675	0,0576	0,06	0,042	0,0075

Таблица 4. Абсолютное удлинение обсадной колонны нагнетательных скважин
Table 4. Absolute elongation of the casing string of injection wells

Месяц	Залежь	Перепад температуры $T_{вр} - T_{кз}$	Абсолютное удлинение обсадной колонны, ΔL , м	
			ПНД	НПВХ
Февраль	1	24	0,24	0,072
	2	25	0,25	0,075
	3	7	0,07	0,021
	4	9	0,09	0,027
	5	11	0,11	0,033
Август	2	37	0,37	0,111
	3	12	0,12	0,036
	4	20	0,2	0,06
	5	13	0,13	0,039
	6	12	0,12	0,039

Расчетный перепад температуры принят равным $\Delta T = 22^\circ\text{C}$. Расчет напряжения в теле трубы выполнялся по формуле:

$$\sigma_t = \alpha \times E \times \Delta T, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где E — модуль продольной упругости материала труб, МПа (ПНД — $E = 800$ МПа, НПВХ — $E = 2500$ МПа).

Расчет осевой нагрузки P_{oc} в колонне выполнялся по формуле:

$$P_{oc} = \sigma_t \times A, \text{ кг}, \quad (3)$$

где A — площадь поперечного сечения трубы, мм².

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- интервал заземления эксплуатационной колонны в любом материале гидроизоляции (фиксации) должен быть минимальным;

- полимерная обсадная колонна должна иметь одинаковый наружный диаметр по всей длине интервала заземления, а также возможность осевого перемещения для минимизации величины осевой нагрузки P_{oc} ;

- подаваемый в заколонное пространство материал должен создавать минимальное боковое давление на наружную поверхность полимерных обсадных труб;

- применение расширяющихся цементных растворов и сыпучих материалов исключается, поскольку при этом создается дополнительное сопротивление осевому перемещению эксплуатационной колонны.

На основании вышеуказанных выводов можно рекомендовать следующие технологические решения.

Для гидроизоляции заколонного пространства авторами статьи предлагается использовать цементно-золяные растворы, приготовленные на основе золы-уноса с электрофильтров угольных ТЭЦ [8]. Зола-унос является прекрасным нейтрализатором рабочих кислотных растворов и образует экран, препятствующий их распространению в заколонном пространстве. Цементно-золяные растворы имеют более низкую по сравнению с цементными растворами плотность, что позволяет уменьшить боковую нагрузку на колонну (плотность цементно-золяных растворов составляет $1,45\text{--}1,54$ г/см³, цементного раствора — $1,75$ г/см³).

При этом известно, что качество гидроизоляции заколонного пространства достигается

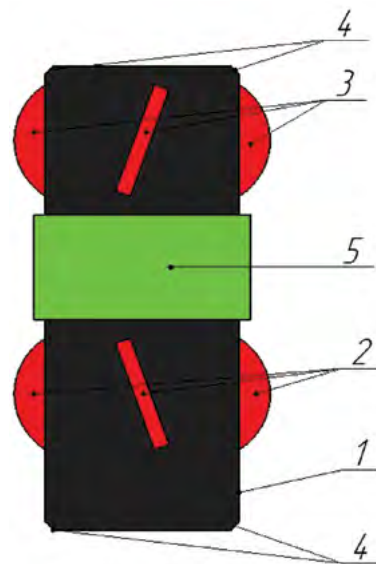


Рис. 1. Принципиальная схема центратора-смесителя для эксплуатационной колонны из полимерных труб: 1 — корпус центратора-смесителя; 2 — лопасти нижнего яруса; 3 — лопасти верхнего яруса; 4 — фаски на торцевой поверхности корпус; 5 — маркер

Fig. 1. Schematic diagram of the centralizer-mixer for a production casing made of polymer pipes: 1 — centralizer-mixer body; 2 — lower tier blades; 3 — upper tier blades; 4 — chamfers on the end surface of the body; 5 — marker

не только маркой применяемого цемента, но прежде всего способом его подачи в заколонное пространство. Для скважин СПВ урана основным способом подачи материала гидроизоляции в заколонное пространство является подача его по спущенным в заколонное пространство трубам малого диаметра (бурильные трубы диаметром 42, 50, 63,5 мм). В процессе подачи важно обеспечить максимальные скорости восходящего потока цементного раствора. Известно, что при турбулентном режиме восходящего потока цементного раствора коэффициент замещения им промывочной жидкости K_3 в заколонном пространстве составляет 98%, а при ламинарном режиме — 42%, поэтому на эксплуатационной колонне должны быть установлены специальные разделительные устройства, выполненные в виде свободно размещаемых центраторов-смесителей, разработанных авторами и показанных на рисунке 1.

На рисунке 2 приведена принципиальная схема положения центратора-смесителя в скважине, эксплуатационной колонны и труб для подачи материала гидроизоляции.

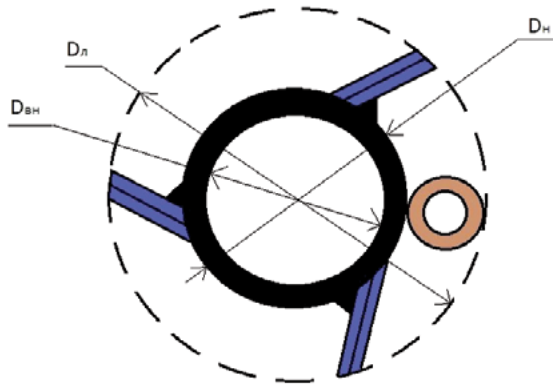


Рис. 2. Принципиальная схема центратора-смесителя эксплуатационной колонны с размещением в за-
колонном пространстве технологического снаряда:
 $D_{л}$ — диаметр по лопастям; $D_{н}$ — наружный диаметр
корпуса; $D_{вн}$ — внутренний диаметр корпуса
Fig. 2. Schematic diagram of a centralizer-mixer
for a production string with a process tool placed in the
annular space: $D_{л}$ — diameter along the blades; $D_{н}$ —
outer diameter of the housing; $D_{вн}$ — inner diameter of
the housing

Внутренний диаметр корпуса центратора-смесителя должен быть больше наружного диаметра обсадных труб на 2–2,5 мм.

Как следует из приведенных рисунков, при установке на эксплуатационной колонне центраторов-смесителей в заколонном пространстве все кольцевое сечение между стенками скважины и обсадными трубами является ядром потока цементного раствора. Зона не вытесненной цементным раствором промывочной жидкости и дробления цементного камня при эрлифтной прокачке с использованием эксплуатационной колонны в качестве водоподъемной отсутствует. Этим обеспечивается высокое качество гидроизоляции заколонного пространства цементным раствором. В качестве маркера может быть использована стальная лента или несколько витков проволоки. Маркер необходим для контроля глубины установки каждого центратора-смесителя на эксплуатационной колонне методом индукционного каротажа.

Кроме того, из вышеизложенного следует, что в интервале защемления эксплуатационная колонна должна иметь постоянный наружный диаметр, поскольку изменение диаметра не позволяет компенсировать линейные изменения в осевом направлении при возникновении в трубах температурных напряжений. Это означает, что трубы НПВХ любого качества с раструбным резьбовым соединением

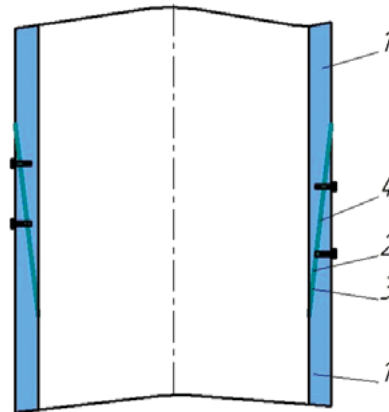


Рис. 3. Конусное соединение с клеем (герметиком) и саморезами: 1 — обсадные трубы; 2 — конусные безрезьбовые поверхности; 3 — клей (герметик); 4 — нержавеющие саморезы (шурупы)
Fig. 3. Conical joint with glue (sealant) and self-tapping screws: 1 — casing pipes; 2 — conical threadless surfaces; 3 — glue (sealant); 4 — stainless steel self-tapping screws

практически не должны применяться в конструкциях скважин СПВ урана. Однако они повсеместно применяются на предприятиях СПВ урана, что отчасти является причиной аварийности скважин в процессе их эксплуатации. Варианты соединения полимерных обсадных труб с указанием их недостатков приведены в работах ([6, 7, 9] и др.). В продолжение этой темы предлагается применять клеевое безрезьбовое безраструбное соединение труб НПВХ с использованием саморезов (рис. 3).

Головки саморезов в указанном соединении выполняют роль ограничителей смещения центраторов-смесителей по длине эксплуатационной колонны. Длина саморезов должна быть меньше толщины стенки трубы. Для их установки в интервале сопрягаемых безрезьбовых поверхностей просверливаются каналы для ввинчивания по винтовой линии. Назначение саморезов — обеспечить осевую прочность соединения до окончания времени склеивания соединения. В течение этого времени в скважине не должны выполняться работы, связанные с нагрузкой на эксплуатационную колонну: эрлифтные прокачки, вибрационно-ударные обработки прифилтровых зон и другие виды работ.

Анализ возможности перемещения в осевом направлении полимерной эксплуатационной колонны, защемленной в цементном камне, показывает следующее. Сцепление цементного камня с полимерными материалами $\tau_{сц}$ составляет 0,001 МПа (результаты получены опытным путем в лабораторных

Таблица 5. Расчетное усилие сдвига в зависимости от высоты контакта поверхности труб НПВХ 140x10 с цементным камнем

Table 5. Calculated shear force depending on the height of contact of the surface of 140x10 PVC pipes with cement stone

Высота контакта, м	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
Усилие сдвига, кг	132	176	220	264	308	352	396	440

условиях, для сравнения сцепление стали с цементным камнем составляет 0,021–0,089 МПа ([14, 15] и др.). В работах ведущих ученых в области крепления нефтяных и газовых скважин отмечается, что «сцепление как фактор обеспечения герметичности крепи скважин является мифом. Колонна просто удерживается в обойме из цементного камня за счет своей непрямолинейности и невертикальности, выступающих муфт, элементов технологической оснастки» [3]. В нашем случае под сцеплением понимается сила трения, возникающая при перемещении разнородных поверхностей относительно друг друга. Усилие сдвига $P_{\text{сц}}$, при котором участок гладкой полимерной колонны, защемленной в цементном камне, начинает перемещаться в осевом направлении, можно определить по формуле

$$P_{\text{сц}} = A_{\text{к}} \times \tau_{\text{сц}}, \text{ кг}, \quad (4)$$

где $A_{\text{к}}$ — площадь контакта наружной поверхности трубы с цементным камнем ($A_{\text{к}} = \pi \times D_{\text{н}} \times h_{\text{к}}$), м²; $h_{\text{к}}$ — высота интервала контакта наружной поверхности трубы с цементным камнем, м.

На основании приведенных рассуждений может быть определена высота интервала цементирования заколонного пространства в соответствии с зависимостью

$$P_{\text{ос}} > P_{\text{сц}} \quad (5)$$

или

$$\alpha \times E \times \Delta T \times A > \tau_{\text{сц}} \times A_{\text{к}}, \quad (6)$$

$$A_{\text{к}} < \alpha \times E \times \Delta T \times A / \tau_{\text{сц}}, \quad (7)$$

$$A = 0,785 \times (D_{\text{н}}^2 - d^2), \quad (8)$$

$$A_{\text{к}} = \pi \times D_{\text{н}} \times h_{\text{к}}. \quad (9)$$

Тогда после подстановки результатов (6)—(9) в выражение (5) получим

$$\pi \times D_{\text{н}} \times h_{\text{к}} < \pi \times \alpha \times E \times \Delta T \times (D_{\text{н}}^2 - d^2) / 4 \times \tau_{\text{сц}}. \quad (10)$$

Отсюда имеем проектную формулу вида:

$$h_{\text{к}} < \alpha \times E \times \Delta T \times (D_{\text{н}}^2 - d^2) / 4 \times \tau_{\text{сц}} \times D_{\text{н}}. \quad (11)$$

Выражение (5) является обязательным условием для выбора высоты интервала гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин, оборудованных полимерными эксплуатационными колоннами, цементным раствором. Выражение (11) определяет максимальную высоту цементного камня в заколонном пространстве (высоту интервала цементирования). Необоснованное увеличение высоты интервала цементирования (гидроизоляции) увеличивает риск возникновения аварий, связанных с разрушением обсадных труб при возникновении температурных нагрузок.

Пример: трубы НПВХ 140x10, при $\alpha = 0,00006$ 1/°С, длина интервала цементирования с учетом выражения (11) составит $h_{\text{к}} = 30,64$ м.

Приведенные рассуждения показывают, что сплошное цементирование эксплуатационных колонн из полимерных материалов при сооружении технологических скважин недопустимо, поскольку ограничивает осевое перемещение обсадных труб в цементном камне при возникновении в них температурных нагрузок. Допустимым является ступенчатое цементирование со свободными между цементными кольцами интервалами. Технология ступенчатого цементирования включает внутриколонную подачу цементного раствора в заколонное пространство с применением внутриколонных паке-ров, спускаемым на бурительных трубах [13]. При этом на эксплуатационной колонне устанавливаются заливочные муфты с разделительными манжетами или другими устройствами, предотвращающими перемещение ниже них цементного раствора [12]. Интервалы между цементными кольцами могут быть заполнены растворами, нейтрализующими кислые (рабочие) растворы при их проникновении в заколонное пространство, например растворами на основе золы-уноса угольных ТЭЦ [18]. Высоту интервалов можно принять равной высоте цементных колец в заколонном пространстве.

Целостность полимерных обсадных труб определяется их стойкостью к воздействию наружного контактного давления $p_{\text{кр}}$. Расчет критического давления для полимерных труб приведен в работах [1, 5, 10]. Для труб НПВХ 140x10 с модулем упругости $E = 2500$ МПа (новые трубы) $p_{\text{кр}} = 2,86$ МПа,

для таких же труб $E = 2000$ МПа (трубы со сроком хранения, близким к окончанию гарантийного, — 2 года) $p_{кр} = 2,28$ МПа. В практике сооружения технологических скважин нередко для фиксации эксплуатационной колонны применяют заполнение заколонного пространства сыпучим инертным материалом: песком, песчано-гравийной смесью и т.п. Такое техническое решение приводит к возникновению бокового давления на обсадные трубы, вызванного весом слоя материала обсыпки. Для скважин глубиной до 1000–2000 м такое давление подчиняется законам гидростатики (гидростатическое давление), для скважин большей глубины возникающее горное давление подчиняется законам геостатики. В рассматриваемом случае для условий скважин СПВ урана боковое давление

на наружную поверхность обсадных труб $p_{бок}$ можно определить по следующей формуле:

$$p_{бок} = 0,1 \times H_{обс} \times \rho_{обс}, \quad (12)$$

где $H_{обс}$ — глубина определения бокового давления, м; $\rho_{обс}$ — плотность материала обсыпки, г/см³.

Исходя из этого выражения, можно определить допускаемую высоту обсыпки заколонного пространства для труб НПВХ:

$$H_{обс} = K_c \times (p_{кр} / 0,1 \times \rho_{обс}), \quad (13)$$

где K_c — коэффициент, учитывающий снижение прочностных характеристик обсадных труб в результате их старения при хранении и в процессе эксплуатации скважин, дополнительного замерзания жидкости в поровом пространстве материала обсыпки и пр.

Для практических расчетов можно принять расчетный срок хранения и эксплуатации равным 10 лет. При этом допустимое кольцевое напряжение в качественных трубах НПВХ, эксплуатируемых при температуре +20 °С, за этот период снижается на 45 % [7, 17]. Исходя из этого авторы статьи рекомендуют применять при выполнении расчетов понижающий коэффициент $K_c = 0,3$.

Пример: $K_c = 0,3$; $p_{кр} = 2,86$ МПа = 28,6 кг/см²; $\rho_{обс} = 2,0$ г/см³; $H_{обс} = 42,9$ м. Таким образом, предельная высота обсыпки эксплуатационной колонны из труб НПВХ 140x10 не должна быть выше 42,9 м. В противном случае в зависимости от качества обсадных труб, срока и условий их хранения увеличение высоты обсыпки приведет к разрушению эксплуатационной колонны.

С учетом вышеизложенного следует иметь в виду, что обсыпка исключает осевое перемещение труб эксплуатационной колонны при возникновении в ней температурных напряжений, что увеличивает вероятность аварийности скважин при их эксплуатации.

Цементирование заколонного пространства может применяться для оборудования устьев технологических скважин при ограничении высоты цементного камня, опираясь на результаты проведенных расчетов. Недостаток такого способа оборудования устьев заключается в длительном периоде ОЗЦ, особенно в периоды с отрицательной температурой окружающего воздуха (более десяти суток) [11]. Эффективным способом устранения причин аварийности является способ оборудования устьев скважин вязкоупругими пробками [4] в комплекте с двухлепестковым подпружиненным центратором.

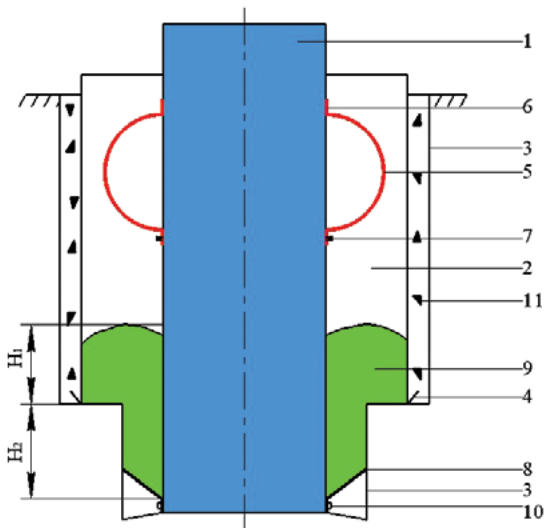


Рис. 4. Принципиальная схема оборудования устьев скважин: 1 — полимерная эксплуатационная колонна; 2 — кондуктор; 3 — стенки скважины; 4 — башмак кондуктора; 5 — подпружиненный центратор; 6 — подвижная опора центратора; 7 — неподвижная опора центратора; 8 — эластичная упругая манжета; 9 — вязкоупругий материал; 10 — хомут; 11 — буровой шлам. H_1 — высота вязкоупругого материала в кондукторе; H_2 — высота вязкоупругого материала под башмаком кондуктора

Fig. 4. Schematic diagram of wellhead equipment: 1 — polymer production casing; 2 — conductor; 3 — wellbore walls; 4 — conductor shoe; 5 — spring-loaded centralizer; 6 — movable support of the centralizer; 7 — fixed support of the centralizer; 8 — elastic resilient cuff; 9 — viscoelastic material; 10 — clamp; 11 — drill cuttings. H_1 — height of viscoelastic material in the conductor; H_2 — height of viscoelastic material under the conductor shoe

Принципиальная схема оборудования устья скважины, предлагаемая авторами, приведена на рисунке 4.

Поставленные авторами статьи задачи могут быть решены с помощью следующего перечня технических средств для дополнительного оборудования технологических скважин.

1. Включение в состав приустьевое оснащения эксплуатационной колонны лепесткового подпружиненного центратора с жестким закреплением нижней опоры и свободным — для верхней опоры, позволяющим ему беспрепятственно перемещаться в пределах кондуктора с компенсацией влияния изменения длины труб. Центратор может быть выполнен из металла или полимерного материала. При этом достаточным средством для фиксации эксплуатационной колонны в кондукторе будет двухлепестковый центратор.

2. Размещение вязкоупругого материала внутри кондуктора позволяет исключить проникновение вод дегазированной среды в интервал криолитозоны. Высоты H_1 и H_2 могут быть приняты равными 2–3 м. В свою очередь, эластичная упругая манжета, которая служит для ограничения перетока первой порции вязкоупругого материала ниже глубины ее размещения на эксплуатационной колонне, может быть изготовлена из резины толщиной 2–3 мм.

Состав и особенности приготовления вязкоупругих материалов приведены в работах [11, 19].

Выводы

1. Эксплуатационная колонна должна иметь одинаковый наружный диаметр по всей длине интервала защемления, что достигается путем применения безраструбных полимерных труб, имеющих клеевое соединение, дополненное саморезами.

2. Высота интервала защемления определяется аналитически с учетом температурных режимов эксплуатации технологических скважин при добыче урана.

3. Сооружение технологических скважин должно предусматривать возможность перемещения эксплуатационной колонны в осевом направлении при их эксплуатации.

4. Высота интервала заполнения заколонного пространства инертным материалом зависит от их насыпной плотности и определяется расчетным путем.

5. Для оборудования устья скважин целесообразно использовать вязкоупругие материалы для компенсации влияния осевых перемещений эксплуатационных колонн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Забайкин Ю.В., Иванов А.Г. О расчете эксплуатационных колонн из полимерных материалов для условий многолетнемерзлых пород. Научное обозрение «Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт». 2019. Вып. 21. С. 27–32.
2. Ашрафьян М.О., Луничкин В.А., Динмухаммедов Д.Х. Совершенствование технологии цементирования скважин. ВНИИОЭНГ. Обзорная информация. Сер. Бурение. 1986. Вып. 7. 44 с.
3. Булатов А.И. Детективная биография герметичности крепи нефтяных и газовых скважин. Краснодар: Просвещение-Юг, 2009. 934 с.
4. Глухов А.В., Ермоленко С.И., Иванов А.Г., Иванов Д.А. Способ гидроизоляции заколонного пространства скважин и состав смеси для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2726086 от 09.07.2020.
5. Железняк И.И., Стетюха В.А. Расчет трубы из полимерного материала под действием внешней нагрузки в скважине в массиве многолетнемерзлых пород. Известия УГГУ. 2018. Вып. 3. С. 121–125.
6. Зубарев А.Б. Условия работы, обоснование конструкции и технология применения полиэтиленовых обсадных колонн для крепления технологических скважин подземного выщелачивания металлов. Автореферат канд. дисс. М.: МГРИ, 1983. 24 с.
7. Иванов А.Г., Иванов Д.А., Арсентьев Ю.А., Назаров А.П., Калиничев В.Н. Особенности применения полимерных обсадных труб при сооружении технологических скважин подземного выщелачивания урана. Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2019. № 4. С. 50–57.
8. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Иванов Д.А., Некоз С.Ю. Особенности гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин подземного выщелачивания урана. Разведка и охрана недр. М.: Российское геологическое общество, 2024. № 4. С. 104–109.
9. Иванов А.Г., Солодов И.Н. Выбор материала обсадных труб для эксплуатационных скважин подземного выщелачивания. Горный журнал. 2018. № 7. С. 81–85.
10. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Орехов Д.Д., Гаврилов РИ. Экономический эффект при применении расчета температуры полимерных обсадных труб при обсадке технологических скважин. Актуальные проблемы и перспективы развития экономики: российский и зарубежный опыт. Научное обозрение. 2024. Вып. 2(49). С. 12–19.
11. Иванов А.Г., Арсентьев Ю.А., Соловьев Н.В., Гладышев А.В., Солодов И.Н., Иванов Д.А. Сооружение и эксплуатация технологических скважин подземного выщелачивания в криолитозоне: монография. М.: МГРИ, 2025. 244 с.

12. Иванов А.Г. Устройство для разобщения заколонного пространства при цементировании скважин. Авторское свидетельство СССР № 1605612 от 25.01.1991.
13. Иванов А.Г., Ким А.С., Гнеушев В.В., Лебедев Н.Ю. Пакер. Авторское свидетельство СССР № 4733521 от 01.09.1989.
14. Кошкolda К.Н., Пименов М.К., Атакулов Т. и др. Пути интенсификации подземного выщелачивания. М.: Энергоатомиздат, 1988, 224 с.
15. Материалы семинара по геотехнологическому бурению и эксплуатации скважин. Навои: НГМК, 1988. 70 с.
16. Нифадьев А.М., Шашкин А.А., Одинцова Т.И., Жданова Л.В. Тампонажные составы для изоляции технологических скважин при подземном выщелачивании. Технический прогресс в атомной промышленности. Сер. Горнометаллургическое производство. 1983. Вып. 1(278). С. 54–57.
17. Отставнов А.А. О высокоэффективных напорных трубах из ПВХ последнего поколения. Санитарная техника, отопление, канализация. 2019. № 2. С. 16–21.
18. Рысев В.П., Шаталов В.В., Иванов А.Г., Фазлуллин М.И. и др. Способ сооружения эксплуатационных скважин при подземном выщелачивании руд. Авторское свидетельство СССР № 1679821 от 09.11.1989.
19. Сигачев Н.П., Иванов А.Г., Гантимуров Н.И. Способ гидроизоляции заколонного пространства технологических скважин. Патент № 2819860 от 28.05.2025.

REFERENCES

1. Arsenyev Yu.A., Nazarov A.P., Zabaykin Yu.V., Ivanov A.G. On the calculation of production columns from polymeric materials for the conditions of permafrost rocks. Scientific Review «Actual Problems and Prospects for Economic Development: Russian and Foreign Experience». 2019. Iss. 21. P. 27–32 (In Russ.).
2. Ashrafyan M.O., Lunichkin V.A., Dinmukhammedov D. Kh. Improvement of well cementing technology. Overview information. Sir. Drilling. 1986. Iss. 7. 44 p. (In Russ.).
3. Bulatov A.I. Detective biography of tightness of oil and gas well support. Krasnodar: Prosveshchenie-Yug, 2009. 934 p. (In Russ.).
4. Glukhov A.V., Ermolenko S.I., Ivanov A.G., Ivanov D.A. Method of waterproofing the casing space of wells and the composition of the mixture for its implementation. Patent of the Russian Federation for invention No. 2726086 dated 09.07.2020 (In Russ.).
5. Zheleznyak I.I., Stetyukha V.A. Calculation of a pipe made of polymeric material under the action of external loading in a well in a permafrost array. 2018. Iss. 3. P. 121–125 (In Russ.).
6. Zubarev A.B. Conditions of work, justification of design and technology of application of polyethylene casing columns for fastening technological wells of underground leaching of metals. diss. Moscow: MGRI, 1983. 24 p. (In Russ.).
7. Ivanov A.G., Ivanov D.A., Arsenyev Yu.A., Nazarov A.P., Kalinichev V.N. Features of the application of polymer casing pipes in the construction of technological wells of underground uranium leaching. Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 2019. No. 4. P. 50–57 (In Russ.).
8. Ivanov A.G., Arsenyev Yu.A., Ivanov D.A., Nekoz S.Y. Features of waterproofing of the casing space of technological wells of uranium underground leaching. Russian Geological Society, 2024. No. 4. P. 104–109 (In Russ.).
9. Ivanov A.G., Solodov I.N. Choice of casing pipe material for operational wells of underground leaching. 2018. No. 7, P. 81–85 (In Russ.).
10. Ivanov A.G., Arsenyev Yu.A., Orekhov D.D., Gavrilov R.I. Economic effect when applying the calculation of the temperature of polymer casing pipes during casing of technological wells. Actual problems and prospects for economic development: Russian and foreign experience. Scientific Review. 2024. Iss. 2(49). P. 12–19 (In Russ.).
11. Ivanov A.G., Arsenyev Yu.A., Soloviev N.V., Gladyshev A.V., Solodov I.N., Ivanov D.A. Construction and Operation of Technological Wells of Underground Leaching in Cryolithozone: Monograph. Moscow: MGRI, 2025. 244 p. (In Russ.).
12. Ivanov A.G. Device for disconnection of casing space during well cementing. Author's Certificate of the USSR No. 1605612 dated 25.01.1991 (In Russ.).
13. Ivanov A.G., Kim A.S., Gneushev V.V., Lebedev N. Yu. Author's Certificate of the USSR No. 4733521 dated 01.09.1989 (In Russ.).
14. Koshkolda K.N., Pimenov M.K., Atakulov T., et al. Ed. Chesnokov N.I. Puti intensifikatsii podzemnogo vyshchelanivaniya [Ways of intensification of underground leaching]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 224 p. (In Russ.).
15. Materials of the seminar on geotechnological drilling and well operation. Navoi: NMMC Publ., 1988. 70 p. (In Russ.).
16. Nifadyev A.M., Shashkin A.A., Odintsova T.I., Zhdanova L.V. Plugging compounds for isolation of technological wells in underground leaching. Technical progress in the nuclear industry. Sir. Mining and metallurgical production. 1983. Iss. 1(278). P. 54–57 (In Russ.).
17. Otstavnov A.A. O highly effective pressure pipes made of PVC of the last generation. 2019. No. 2. P. 16–21 (In Russ.).
18. Rysev V.P., Shatalov V.V., Ivanov A.G., Fazlullin M.I., et al. Method of Construction of Production Wells in Underground Leaching of Ores. Author's Certificate of the USSR No. 1679821 dated 09.11.1989 (In Russ.).
19. Sigachev N.P., Ivanov A.G., Gantimurov N.I. Method of waterproofing the behind-the-casing space of technological wells. Patent No. 2819860 dated 28.05.2025 (In Russ.).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

И.Г. Иванов — разработал концепцию статьи, подготовил текст, окончательно утвердил публикуемую версию статьи, согласен принять на себя ответственность за все аспекты статьи.

Ю.А. Арсентьев — согласовал результаты аналитических исследований с процессами сооружения и эксплуатации технологических скважин, принимал участие в разработке концепции статьи, согласен принять на себя ответственность за все аспекты статьи.

Д.Д. Орехов — подготовил графические материалы статьи, отвечал за качество перевода на английский язык разделов статьи, согласен принять на себя ответственность за все аспекты статьи.

Alexander G. Ivanov — developed the concept of the article, prepared the text, finally approved the published version of the article, agrees to take responsibility for all aspects of the article.

Yuri A. Arsenyev — agreed the results of analytical studies with the processes of construction and operation of technological wells, took part in the development of the concept of the article, agrees to take responsibility for all aspects of the article.

Danila D. Orekhov — prepared the graphic materials of the article, was responsible for the quality of the translation of the sections of the article into English, agrees to take responsibility for all aspects of the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Иванов Александр Георгиевич — кандидат технических наук, академик РАЕН, главный специалист АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии».

33, Каширское шоссе, г. Москва 115409, Россия

e-mail: Ivanov_ag@mail.ru

тел.: +7 (914) 804-18-53

SPIN-код: 6602-3910

ORCID: <https://orcid.org/000-0004-7275-903X>

Alexander G. Ivanov — Cand. Sci. (Tech.), Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Chief Specialist of Leading Design, Survey and Research Institute of Industrial Technology.

33, Kashirskoye highway, Moscow 115409, Russia

e-mail: Ivanov_ag@mail.ru

tel.: +7 (914) 804-18-53

SPIN code: 6602-3910

ORCID: <https://orcid.org/000-0004-7275-903X>

Арсентьев Юрий Александрович — кандидат технических наук, член-корреспондент РАЕН доцент ФГБУ «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

e-mail: arsentev1956@yandex.ru

тел.: +7 (985) 145-62-07

SPIN-код: 6602-3910

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1578-7632>

Yuri A. Arsenyev — Cand. Sci. (Tech.), Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences Associate Professor of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: arsentev1956@yandex.ru

tel.: +7 (985) 145-62-07

SPIN code: 6602-3910

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1578-7632>

Орехов Данила Дмитриевич — студент ФГБУ «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

e-mail: danilaohv@yandex.ru

тел.: +7 (920) 088-56-88

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6593-8315>

Danila D. Orekhov — Student, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

e-mail: danilaohv@yandex.ru

tel.: +7 (920) 088-56-88

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6593-8315>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ (InSAR) В ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОБЪЕКТОВ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ: МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, ОГРАНИЧЕНИЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

А.А. АНЖЕНКО^{1,*}, А.В. АНЖЕНКО¹, С.В. СЕРЕБРЯКОВ^{2,3}

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² АО «Оператор пространственных данных и сервисов»
16а, ул. Лефортовский Вал, г. Москва 11250, Россия

³ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
4, Гороховский пер., г. Москва 105064, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обеспечение промышленной и экологической безопасности горнодобывающих предприятий требует внедрения современных методов мониторинга деформаций земной поверхности. Классические геодезические методы имеют ограниченную эффективность для сплошного контроля обширных горных отводов, в то время как технологии дистанционного зондирования, в частности применение технологий интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR), открывают новые возможности для создания систем проактивного мониторинга.

Цель. Проведение комплексного анализа методических основ, возможностей, ограничений и перспектив применения технологии InSAR, в особенности метода малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), для решения задач геодинамического и геотехнического мониторинга на объектах горнодобывающей промышленности.

Материалы и методы. В основу работы положены системный анализ научных публикаций и обобщение практического опыта применения InSAR на горнодобывающих предприятиях России (Кузбасс), Казахстана, Австралии и Китая. Использованы методы сравнительного анализа методик DInSAR, PS-InSAR и SBAS-InSAR, математического моделирования деформационных процессов и экономической оценки эффективности.

Результаты. Установлено, что метод SBAS-InSAR демонстрирует наилучший баланс точности (1–3 мм/год), площадного охвата и устойчивости к декорреляции в специфических условиях горных ландшафтов. Определены ключевые области эффективного применения: мониторинг устойчивости бортов карьеров, контроль целостности дамб хвостохранилищ, наблюдение за просадками на подработанных территориях. Экономический анализ подтвердил, что внедрение InSAR позволяет снизить капитальные и эксплуатационные затраты на 60–75 % при одновременном увеличении охвата территории и оперативности получения данных.

Заключение. Технология InSAR/SBAS-InSAR является высокоэффективным инструментом для перехода от точечного к сплошному мониторингу геотехнических рисков. Ее успешная интеграция в системы управления горнодобывающих предприятий, особенно в условиях Российской Федерации, требует адаптации методик, развития нормативной базы и подготовки кадров. Перспективными представляются исследования, связанные с созданием гибридных систем, объединяющих данные InSAR с наземными сенсорными сетями и применением технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: интерферометрический радиолокационный синтез апертуры (InSAR), SBAS-InSAR, геодинамический мониторинг, горнодобывающая промышленность, деформация земной поверхности, геотехнические риски, дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Анженко А.А., Анженко А.В., Серебряков С.В. Применение технологий интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR) в геодинамическом мониторинге объектов горнодобывающей промышленности: методические основы, ограничения и практическая эффективность. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2026;68(1):139—152. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-139-152> EDN: MDLAWZ

Статья поступила в редакцию 22.12.25

Принята к публикации 29.01.2026

Опубликована 30.04.2026

* Автор, ответственный за переписку

APPLICATION OF INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR (InSAR) IN GEODYNAMIC MONITORING OF MINING INDUSTRY FACILITIES: METHODOLOGICAL FOUNDATIONS, INHERENT LIMITATIONS, AND PRACTICAL EFFICIENCY

ARTEM A. ANZHENKO^{1,*}, ALEXANDER V. ANZHENKO¹, SERGEY V. SEREBRYAKOV^{2,3}

¹ *Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI)
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia*

² *Operator of Spatial Data and Services JSC
16A, Lefortovsky Val str., Moscow 111250, Russia*

³ *Moscow State University of Geodesy and Cartography
4, Gorokhovskiy Lane, Moscow 105064, Russia*

ABSTRACT

Background. Ensuring industrial and environmental safety at mining enterprises requires the implementation of modern methods for monitoring ground surface deformation. Classical geodetic methods demonstrate limited effectiveness for continuous monitoring of extensive mining allotments, while remote sensing technologies, in particular Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), offer opportunities for creating proactive monitoring systems.

Aim. To carry out a comprehensive analysis of the methodological foundations, capabilities, limitations, and prospects of InSAR technology, the method of Small Baseline Subset (SBAS-InSAR) in particular, for solving problems of geodynamic and geotechnical monitoring at mining facilities.

Materials and methods. A systematic review of scientific publications and practical experience of applying InSAR at mining enterprises in Russia (Kuzbass), Kazakhstan, Australia, and China was carried out. A comparative analysis of DInSAR, PS-InSAR, and SBAS-InSAR technologies was conducted. The methods of mathematical modeling of deformation processes and economic efficiency assessment were used.

Results. The SBAS-InSAR method demonstrates the best balance of accuracy (1–3 mm/year), areal coverage, and resistance to decorrelation under conditions of mining landscapes. Key areas of application include monitoring of open-pit slope stability, controlling tailings dam integrity, and observing subsidence in undermined areas. The economic analysis confirmed that the implementation of InSAR can reduce capital and operational costs by 60–75 % while simultaneously increasing coverage area and data acquisition efficiency.

Conclusion. InSAR/SBAS-InSAR technology is a highly effective tool for transitioning from point-based to continuous monitoring of geotechnical risks. Its successful integration into the management systems of mining enterprises, especially in the Russian Federation, requires the adaptation of methodologies, development of a regulatory framework, and personnel training. Prospects are

associated with the creation of hybrid systems that integrate InSAR data with ground-based sensor networks and artificial intelligence technologies.

Keywords: Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), SBAS-InSAR, geodynamic monitoring, mining industry, ground deformation, geotechnical risks, Earth remote sensing (ERS)

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Financial disclosures: no financial support was provided for this study.

For citation: Anzhenko A.A., Anzhenko A.V., Serebryakov S.V. Application of interferometric synthetic aperture radar (InSAR) in geodynamic monitoring of mining industry facilities: methodological foundations, inherent limitations, and practical efficiency. Proceedings of higher educational establishments. *Geology and Exploration*. 2026;68(1):139—152. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-139-152> EDN: [MDLAWZ](https://doi.org/10.32454/0016-7762-2026-68-1-139-152)

Manuscript received 22 December 2025

Accepted 29 January 2026

Published 30 April 2026

* Corresponding author

Введение

Мониторинг современных движений земной коры (СДЗК), индуцированных как природными, так и техногенными факторами, представляет собой одну из ключевых задач современной геодинамики и инженерной геологии [18, 23]. Для горнодобывающей промышленности, являющейся мощным источником техногенного воздействия на геологическую среду, обеспечение контроля за деформационными процессами является критически важным фактором обеспечения промышленной и экологической безопасности [3, 4, 9]. Традиционные геодезические методы мониторинга (высокоточное нивелирование, GNSS-наблюдения), несмотря на высокую локальную точность, обладают существенными ограничениями: они требуют создания разветвленной и дорогостоящей наземной измерительной инфраструктуры, обеспечивают лишь точечную информацию и неэффективны для оперативного контроля обширных площадей горных отводов [1, 18].

В этих условиях технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), и в особенности радарная спутниковая интерферометрия (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR), открывают новые возможности для создания систем сплошного мониторинга деформаций [2, 5, 25, 28]. Принцип метода InSAR основан на анализе разности фаз радарных снимков одной территории, полученных в разное время, что позволяет детектировать смещения земной поверхности с точностью до миллиметрового диапазона на значительных площадях без необходимости доступа на объект. Современное развитие космических SAR-систем характеризуется экспоненциальным ростом количества запускаемых

спутников: если до 2006 года было запущено 16 SAR-аппаратов, то в период с 2022 по 2025 год — уже 109, что обеспечивает высокую частоту съемки и доступность радиолокационных данных для оперативного мониторинга [11]. Это создает благоприятные условия для внедрения непрерывных систем геодинамического контроля на основе InSAR. Это делает технологию незаменимым инструментом для решения таких задач, как контроль устойчивости бортов карьеров и отвалов, оценка целостности дамб хвостохранилищ, мониторинг оседаний на подработанных территориях [17, 19, 21, 27].

Среди различных методик InSAR наибольший практический интерес для горнодобывающей отрасли представляет технология малых базовых подмножеств (Small Baseline Subset, SBAS-InSAR). Данная методика, основанная на обработке плотных временных серий радиолокационных изображений, позволяет преодолеть ограничения классических дифференциальных методов, связанные с потерей когерентности сигнала в условиях сложного рельефа или растительного покрова, характерных для большинства горнодобывающих регионов [6, 16]. SBAS-InSAR обеспечивает получение высоконадежных временных рядов смещений, что критически важно для анализа динамики деформационных процессов [2, 6].

Несмотря на очевидные преимущества и растущее количество успешных практических примеров (кейсов) применения в мире [1, 8, 27], широкое внедрение технологии InSAR в практику ответственных горнодобывающих предприятий сталкивается с рядом проблем. К ним относятся: необходимость в подготовке высококвалифицированных

специалистов для интерпретации сложных пространственных данных, наличие возможных погрешностей измерений, обусловленных атмосферными и ионосферными помехами, а также методические сложности интеграции и интерпретации данных InSAR с результатами наземных измерений в единую систему геотехнического мониторинга [18, 20, 22]. Кроме того, точность и надежность результатов остаются в высокой степени зависимыми от качества исходных спутниковых данных и соблюдения оптимальных пространственно-временных параметров съемки [12, 21].

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является комплексный анализ, систематизация опыта и определение ключевых направлений эффективного применения технологии интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR), в особенности метода малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), для решения актуальных задач геотехнического мониторинга и управления рисками на горнодобывающих предприятиях. Работа направлена на преодоление разрыва между высоким технологическим потенциалом InSAR и барьерами, затрудняющими его широкое практическое внедрение, такими как сложность интерпретации данных, влияние атмосферных помех и проблемы интеграции с существующими системами контроля [20–22].

Для достижения поставленной цели в исследовании решались следующие задачи.

1. Проведение сравнительного анализа возможностей различных методик InSAR (DInSAR, PS-InSAR, SBAS-InSAR) для мониторинга деформаций в специфических условиях горнодобывающих ландшафтов, включая районы с развитой растительностью и активными техногенными изменениями [6, 10, 18].

2. Систематизация основных областей практического применения технологии InSAR в горнодобывающей промышленности, уделив особое внимание мониторингу устойчивости бортов карьеров и отвалов, контролю целостности дамб хвостохранилищ, а также выявлению и анализу просадочных деформаций земной поверхности [3, 4, 17, 27].

3. Обобщение и анализ практического международного и отечественного опыта применения InSAR на основе конкретных практических примеров (кейсов) (на примере Кузбасса, Карагандинского бассейна, Дуглас-Парка, Шэньдунского бассейна и др.) для оценки реальной точности, надежности и экономической эффективности метода [2, 5, 8, 16, 21].

4. Выявление и классификация ключевых технических и методических ограничений технологии

InSAR, включая требования к квалификации персонала, зависимость от атмосферных условий, сложности интеграции данных с другими геодезическими и геофизическими методами мониторинга [18, 20, 22].

5. Определение стратегических направлений и перспектив развития технологии InSAR для ее глубокой интеграции в системы управления геотехническими рисками горнодобывающих предприятий, включая синергию с технологиями интернета вещей (IoT), технологиями искусственного интеллекта (ИИ), геопространственными данными с БПЛА и создание гибридных мониторинговых систем [1, 14, 30].

6. Разработка рекомендаций по адаптации и внедрению технологий InSAR-мониторинга на территории Российской Федерации с учетом особенностей региональной геодинамической специфики, нормативных требований и задач цифровой трансформации горнодобывающего комплекса.

Решение этих задач позволяет создать целостное представление о современном состоянии, потенциале и траекториях развития технологии InSAR как основы для создания проактивных систем обеспечения промышленной и экологической безопасности в горнодобывающей отрасли.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Методологической основой исследования выступили системный анализ, синтез и обобщение данных. Работа базируется на трех ключевых компонентах: 1) теоретических основах радарной интерферометрии; 2) анализе массива научных публикаций и технических отчетов; 3) обобщении данных конкретных практических примеров (кейсов) применения технологии InSAR на отраслевых объектах горнодобывающей промышленности.

Теоретические основы и математический аппарат

Физической основой измерений InSAR является анализ интерферометрической фазы, описываемой следующим выражением [5]:

$$\varphi_{\text{полн}} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \Delta R + \varphi_{\text{топ}} + \varphi_{\text{атм}} + \varphi_{\text{шум}} + 2\pi n, \quad (1)$$

где $\varphi_{\text{полн}}$ — полная измеренная фаза, рад;
 λ — длина волны радиолокационного сигнала, м;
 ΔR — разность расстояний, м;
 $\varphi_{\text{топ}}$ — фазовая составляющая от рельефа, рад;
 $\varphi_{\text{атм}}$ — атмосферная задержка, рад;
 $\varphi_{\text{шум}}$ — шум измерений, рад;
 n — целое число (неоднозначность фазы).

Связь между измеренной фазой и вертикальным смещением поверхности описывается уравнением:

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \Delta\varphi_{деф}, \quad (2)$$

где $\Delta\varphi_{полн}$ — фазовая разность, обусловленная деформацией, рад.

Приведенные фундаментальные выражения (1) и (2) позволяют количественно оценивать деформации земной поверхности с миллиметровой точностью, что является критически важным для мониторинга геотехнической безопасности горнодобывающих предприятий.

Основное внимание уделено методу малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), при котором временной ряд смещений $h(t)$ восстанавливается по серии интерферограмм [6, 10, 24]. Ключевое уравнение для временного ряда смещений имеет вид:

$$h(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \sum_{i=1}^N w_i \cdot \Delta\varphi_i(t), \quad (3)$$

где $\Delta h(t)$ — смещение во времени t , м;

w_i — весовые коэффициенты интерферометрических пар;

$\Delta\varphi_i(t)$ — разность фаз для i -й пары в момент времени t , рад;

N — количество интерферометрических пар.

Надежность измерений оценивалась через когерентность сигнала по выражению:

$$\gamma = \left| \langle s_1 s_2^* \rangle \right| / \sqrt{\left(\langle |s_1|^2 \rangle \langle |s_2|^2 \rangle \right)}, \quad (4)$$

где γ — когерентность (0–1);

s_1, s_2 — комплексные отклики радара.

Для количественной оценки деформационных процессов в массиве горных пород разработаны специализированные математические модели. Модель экспоненциального затухания деформаций описывает распределение смещений вокруг горных выработок:

$$\Delta h(r, t) = \Delta h_0 \cdot \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (5)$$

где $\Delta h(r, t)$ — деформация на расстоянии r от центра выработки в момент времени t , м;

Δh_0 — максимальная деформация в центре зоны влияния, м;

r_0 — радиус влияния горных работ, м;

r — расстояние до центра выработки, м;

t — время с момента подработки, сут.;

τ — постоянная времени процесса деформации, сут.

Для оценки рисков и интеграции данных использовались вероятностная модель и модель взвешенного усреднения [4, 17]:

$$P(\Delta h > \Delta h_{крит}) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\Delta h_{крит} - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \right], \quad (6)$$

где $P(\Delta h > \Delta h_{крит})$ — вероятность превышения критической деформации;

μ — среднее значение деформации, м;

σ — стандартное отклонение, м;

$\Delta h_{крит}$ — критическое значение деформации для конкретного типа сооружения.

Прогнозная модель для проактивного управления геотехническими рисками:

$$\Delta h_{интегр} = \sum_{i=1}^M w_i \cdot \Delta h_i, \quad (7)$$

где:

$\Delta h_{интегр}$ — интегральная оценка смещения, м;

w_i — весовые коэффициенты методов ($\sum w_i = 1$);

Δh_i — оценка смещения i -м методом, м;

M — количество методов мониторинга.

Для алгоритмов машинного обучения, таких как XGBoost, прогнозируемое значение определялось выражением:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in \mathcal{F}, \quad (8)$$

где:

\hat{y}_i — прогноз для i -го объекта;

f_k — k -е дерево решений;

\mathcal{F} — пространство деревьев решений.

Экономическая эффективность оценивалась по моделям ROI и годового экономического эффекта. Для количественной оценки экономической эффективности внедрения InSAR использована следующую модель:

$$ROI = \frac{C_{трад} - C_{InSAR}}{C_{InSAR}} \times 100, \quad (9)$$

где: $C_{трад} = N_{точ} \times C_{точ} \times F + C_{инфр}$,
 $C_{InSAR} = C_{дан} \times H + C_{обр} + C_{интерпр}$.

Общий экономический эффект от внедрения системы мониторинга оценен по выражению:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta S \cdot V + \Delta A \cdot C_A - I}{T}, \quad (10)$$

где:

\mathcal{E} — годовой экономический эффект, руб./год;
 ΔS — снижение площади аварийных зон, га;
 V — стоимость земли, руб./га;
 ΔA — снижение количества аварий, ед./год;
 C_A — средняя стоимость одной аварии, руб.;
 I — инвестиции в систему, руб.;
 T — срок окупаемости, лет.

Внедрение технологии InSAR в систему управления геотехническими рисками горнодобывающих предприятий предлагается формализовать через критерий оптимальной частоты мониторинга:

$$f_{опт} = \max \left(f_{мин}, \frac{v_{ср} \cdot k_{риск}}{\Delta h_{доп}} \right), \quad (11)$$

где:

$f_{опт}$ — оптимальная частота мониторинга, раз/мес.;
 $f_{мин}$ — минимальная технически возможная частота;
 $v_{ср}$ — средняя скорость деформации на объекте, мм/мес.;
 $k_{риск}$ — коэффициент риска объекта (1–5);
 $\Delta h_{доп}$ — допустимое смещение между измерениями, мм.

Предложенные математические модели и критерии позволяют оптимизировать использование технологии InSAR, обеспечивая баланс между точностью мониторинга, оперативностью получения данных и экономической эффективностью.

Для условий РФ предлагается при разработке специализированных моделей учитывать поправки на климатические условия и вечную мерзлоту [18].

Поправка на климатические условия определяется выражением:

$$\Delta \varphi_{клим} = \alpha \cdot (T - T_0) + \beta \cdot (P - P_0), \quad (12)$$

где:

$\Delta \varphi_{клим}$ — климатическая поправка, рад;
 α, β — коэффициенты, определенные для конкретного региона России;
 T, P — текущие температура и давление;
 T_0, P_0 — стандартные условия.

Для районов вечной мерзлоты полная деформация складывается из техногенной составляющей и изменений, вызванных температурными колебаниями:

$$\Delta h_{мерзл} = \Delta h_{техн} + k_{мерз} \cdot \Delta T \cdot t, \quad (13)$$

где:

$\Delta h_{мерзл}$ — полная деформация в условиях мерзлоты, м;
 $\Delta h_{техн}$ — техногенная деформация, м;
 $k_{мерз}$ — коэффициент влияния температуры мерзлоты;
 ΔT — изменение температуры мерзлоты, °С;
 t — время, лет.

Разработка регионально адаптированных математических моделей является ключевым условием успешного внедрения технологии InSAR на предприятиях российской горнодобывающей промышленности.

Материалы и источники данных

Проанализирован корпус научных публикаций и отчетов за 2000–2025 гг., посвященных применению InSAR (DInSAR, PS-InSAR, SBAS-InSAR) в горном деле. Особый акцент сделан на практические примеры (кейсы), данные по которым получены из открытых научных статей и технической документации:

- Дуглас-Парк (Австралия) — мониторинг подработки от подземной добычи угля [1, 8];
- Шэньдунский угольный бассейн (Китай) — анализ оседаний с использованием временных рядов InSAR [3, 21];
- рудник Сукари (Египет) — применение PSI для мониторинга устойчивости [7, 26];
- Карагандинский угольный бассейн (Казахстан) — оценка долгосрочных деформаций [16, 29];
- отечественный опыт (Кузбасс, Хибинь, Урал) — обобщение по данным публикаций [18, 23] и производственных отчетов.

Анализ современных тенденций развития космических SAR-миссий показал, что средняя масса гражданских спутников снизилась до 1025 кг, а военных — до 3697 кг, при этом значительную долю составляют микроспутники массой менее 200 кг [11]. Это позволяет прогнозировать дальнейшее снижение стоимости и увеличение доступности InSAR-данных для отраслевого применения.

Методы анализа

Применен комплекс методов.

1. **Сравнительный анализ:** возможностей и ограничений различных методик InSAR (на основе таблицы 1).

Таблица 1. Сравнительные характеристики методов InSAR для геотехнического мониторинга
Table 1. Comparative characteristics of InSAR methods for geotechnical monitoring

Параметр/ Parameter	DInSAR	PS-InSAR	SBAS-InSAR
Точность, мм/год / Accuracy, mm/yr	10–30	1–5	1–3
Требуемое кол-во снимков/ Number of images	2–3	>20	>15
Оптимальные условия/ Optimal conditions	Слабая растительность/ Low vegetation	Урбанизированные территории, скальные породы / Urban areas, bedrock	Обширные территории, включая участки с растительностью / Large areas, including vegetation
Временное разрешение/ Temporal resolution	Низкое / Low	Высокое / High	Среднее-высокое / Medium-High
Реком. перпенд. база, м / Rec. perp. baseline, m	<200	<300	<400

2. Систематизация и обобщение: практического опыта по выделенным географическим кейсам и типам объектов (борта карьеров, хвостохранилища, подработанные территории).

3. Математическое моделирование: для количественной оценки деформационных процессов, экономической эффективности и оптимальных параметров мониторинга (формулы (5)–(9), (14)).

4. Критический анализ проблем: выявление и классификация технических, методических и организационных барьеров на основе обобщения данных литературы [18, 20, 21, 27].

5. Синтез рекомендаций: определение стратегических направлений развития и адаптации технологии для интеграции в системы управления рисками горнодобывающих предприятий РФ.

Такой комплексный подход позволяет не только описать состояние технологии, но и дать количественную оценку ее возможностей, сформировать методическую основу для ее практического внедрения.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Сравнительная эффективность методов InSAR для горнодобывающей отрасли

Проведенный сравнительный анализ позволил ранжировать основные методы интерферометрической обработки данных SAR по их пригодности для задач геотехнического мониторинга в специфических условиях горнодобывающих предприятий (табл. 1).

Установлено, что метод малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR) демонстрирует

наилучший баланс между точностью (1–3 мм/год), площадным охватом (способность работать на территориях с изменчивым ландшафтом и растительностью) и устойчивостью к временной и пространственной декорреляции сигнала. Это делает SBAS-InSAR предпочтительной методикой для долгосрочного мониторинга большинства объектов горнодобывающего комплекса [6, 10].

2. Критерии и нормативы для мониторинга различных объектов

На основе анализа отечественного и международного опыта [3, 4, 17, 21, 27] сформулированы количественные критерии для оценки деформационной опасности на различных типах объектов (табл. 2). Определены как допустимые годовые скорости смещений ($\Delta h_{дон}$, год), так и критические интегральные величины ($\Delta h_{крит}$), превышение которых требует немедленных мероприятий по обеспечению безопасности.

3. Модель интеграции данных и верификация точности

Для создания отказоустойчивых систем мониторинга предложена и количественно обоснована модель взвешенного усреднения данных от различных технологий (табл. 3). Модель позволяет оптимально комбинировать преимущества площадного охвата InSAR с высочайшей точностью точечных наземных методов.

Применение данной модели на практике, как показал анализ практических примеров (кейсов), позволяет достигать интегральной точности оценки смещений на уровне 1–2 мм/год при обеспечении сплошного покрытия контролируемой территории.

Таблица 2. Критические параметры деформаций для объектов горнодобывающей промышленности
Table 2. Critical deformation parameters for mining industry facilities

Объект мониторинга/ Monitoring facility	$\Delta h_{\text{доп}}$, год, мм/год / Annual threshold	$\Delta h_{\text{крит}}$, мм / Critical displacement	Реком. частота мониторинга / Recommended frequency
Борта карьеров глубиной < 100 м / Pit walls depth < 100 m	20–30	200	Еженедельно / Weekly
Борта карьеров глубиной > 100 м / Pit walls depth > 100 m	30–50	300	Ежедневно-еженедельно / Daily-Weekly
Дамбы хвостохранилищ I класса / Tailings dams Class I	5–10	50	Ежедневно / Daily
Дамбы хвостохранилищ II класса / Tailings dams Class II	10–20	100	Еженедельно / Weekly
Подработанная территория с застройкой/ Undermined area with buildings	5–15	100	Ежемесячно / Monthly
Отвалы вскрышных пород/ Overburden dumps	30–100	500	Ежемесячно / Monthly

Таблица 3. Параметры методов для комплексного мониторинга (вес и точность)
Table 3. Parameters of methods for integrated monitoring (weight and accuracy)

Метод мониторинга/ Monitoring method	Вес, w_i / Weight	Погрешность, σ_i , мм/ Error	Частота измерений/ Measurement frequency	Площадь покрытия/ Coverage area
InSAR (SBAS)	0,40	1–3	6–12 дней / days	100% территории / of area
ГНСС/ГЛОНАСС станции / GNSS stations	0,30	0,5–1,5	Непрерывно / Continuous	Точечно / Point-based
БПЛА с лидаром / UAV with LiDAR	0,20	2–5	По необходимости / As needed	Выборочно / Selective
Наземные IoT-сенсоры/ Ground IoT sensors	0,10	0,1–0,5	Непрерывно / Continuous	Точечно / Point-based

4. Анализ практической эффективности на основе практических примеров (кейсов)

Обобщение результатов конкретных проектов подтвердило высокую практическую эффективность и точность технологии InSAR:

- **Дуглас-Парк (Австралия):** при мониторинге подработки от подземной добычи угля система InSAR обеспечила полное покрытие территории. Сравнение с высокоточными наземными геодезическими измерениями показало расхождение в пределах ± 15 мм, что подтвердило достоверность спутниковых данных [1, 8];
- **Шэньдунский угольный бассейн (Китай):** комплексное использование временных рядов SBAS-InSAR и регрессионного моделирования позволило не только картировать воронки оседания, но и количественно оценить динамику их развития с высокой детализацией, что стало основой для корректировки планов горных работ [2, 21];
- **Карагандинский бассейн (Казахстан):** долгосрочный мониторинг (более 5 лет) выявил устойчивые тенденции к проседанию над законтурными участками отработанных шахтных полей со скоростями до 20–25 мм/год. Эти данные имеют критическое значение для оценки рисков при новом промышленном и гражданском строительстве в данных районах [13, 15, 16, 29];
- **рудник Сукари (Египет):** применение метода устойчивых отражателей (PSI) на основе 23 снимков позволило выделить локальные зоны нестабильности в районе отвалов и инфраструктуры рудника, что невозможно было сделать традиционными методами в условиях сложного рельефа и отсутствия развитой геодезической сети [7, 26].

Таблица 4. Сравнительный анализ затрат на мониторинг участка 100 км²
Table 4. Comparative cost analysis for monitoring a 100 km² site

Статья затрат/ Cost item	Традиционные методы (геодез. сети)/ Traditional methods	InSAR-мониторинг/ InSAR monitoring	Экономия/ Saving
Капитальные затраты, млн руб./ Capital cost, mln RUB	15–20	5–8	60–67 %
Эксплуатационные затраты, млн руб./год/ Operational cost, mln RUB/yr	8–12	2–3	70–75 %
Персонал, чел./ Personnel, persons	8–12	2–3	70–75 %
Покрытие территории, %/ Area coverage, %	10–15	90–100	Увеличение в 6–10 раз/ Increase by 6–10x
Время получения данных/ Data acquisition time	1–3 месяца / months	1–3 дня / days	Ускорение в 30–90 раз/ Acceleration by 30–90x

5. Оценка экономической эффективности

Расчеты, выполненные для типового участка площадью 100 км², демонстрируют значительное преимущество системы мониторинга на основе InSAR (табл. 4).

Таким образом, внедрение InSAR обеспечивает не только качественный скачок в полноте и оперативности информации, но и приводит к существенному (в 2,5–3 раза) снижению совокупной стоимости владения системой мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность и практическую значимость технологии интерферометрического радиолокационного синтезирования апертуры (InSAR), в особенности метода малых базовых подмножеств (SBAS-InSAR), для решения актуальных задач геодинамического и геотехнического мониторинга в горнодобывающей промышленности. На основе системного анализа теоретических основ, методических подходов и практических примеров (кейсов) применения сформулированы следующие основные выводы.

1. Технология InSAR/SBAS-InSAR является не заменой, а мощным развитием и дополнением классических геодезических методов в эпоху дистанционного зондирования [18]. Она обеспечивает переход от локальных точечных измерений к сплошному, площадному мониторингу деформаций земной поверхности с точностью 1–3 мм/год, формируя принципиально новую основу для проактивного управления геотехническими рисками.

2. Установлены ключевые, наиболее эффективные области применения InSAR на отраслевых

объектах горнодобывающей промышленности: мониторинг устойчивости бортов карьеров и отвалов; контроль целостности тел дамб хвостохранилищ I и II классов; выявление, картирование и анализ динамики просадочных деформаций на подработанных территориях [3, 4, 12, 17, 21, 27]. Для каждого типа объектов определены количественные критерии допустимых и критических смещений, а также рекомендуемая частота мониторинга.

3. Доказана высокая достоверность данных InSAR. Сравнение с результатами прецизионных наземных геодезических измерений в рамках реализованных проектов (на примере Дуглас-Парка, Шэньдунского бассейна) показывает согласованность в пределах ± 15 мм, что достаточно для решения большинства практических задач по оценке устойчивости [1, 2, 8]. Метод SBAS-InSAR демонстрирует наилучший баланс точности, площади охвата и устойчивости к декорреляции в сложных горнопромышленных ландшафтах [6, 16].

4. Экономический анализ подтверждает не только технологическое, но и финансовое преимущество систем мониторинга на базе InSAR. Для типового участка внедрение технологии позволяет снизить капитальные затраты на 60–67 %, а эксплуатационные — на 70–75 %, одновременно увеличивая охват территории в 6–10 раз и ускоряя получение данных в 30–90 раз по сравнению с разрыванием традиционных геодезических сетей.

5. Максимальная эффективность достигается при интеграции InSAR в гибридные (отказоустойчивые) системы мониторинга, где спутниковые данные выступают как базовый площадной источник информации, а прецизионные наземные методы (ГНСС, роботизированное тахеометрирование,

IoT-сенсоры) используются для верификации и детального контроля критических зон [1, 18]. Оптимальный режим работы таких систем может быть формализован через критерий частоты мониторинга, учитывающий скорость деформаций и уровень риска объекта.

6. Для успешного широкого внедрения технологии InSAR в практику горнодобывающих предприятий Российской Федерации необходима адаптация методик к региональным условиям, включая разработку специализированных математических моделей, учитывающих влияние сурового климата и вечной мерзлоты на измеренные сигналы. Ключевыми задачами являются развитие нормативной базы, подготовка квалифицированных кадров и интеграция InSAR-мониторинга в концепции «Цифрового карьера/шахты» как элемента единого информационного пространства предприятия.

7. Перспективы развития технологии связаны с углублением синергии с интернетом вещей (IoT), алгоритмами искусственного интеллекта для автоматического анализа данных и расширением использования группировок малых спутников (CubeSat) для повышения частоты съемки.

Перспективы развития InSAR-мониторинга тесно связаны с распространением микроспутниковых группировок (Capella, ICEYE, QPS, Umbra, StriX), которые обеспечивают время повторного полета вплоть до нескольких часов и позволяют реализовать квазинепрерывный контроль деформаций [11]. Интеграция данных таких созвездий с классическими SAR-миссиями (Sentinel-1, ALOS, RADARSAT) открывает новые возможности для создания гибридных систем прогнозного геотехнического мониторинга.

Реализация этих направлений позволит перейти к созданию интеллектуальных систем прогнозного геотехнического мониторинга, что станет новым этапом в обеспечении промышленной и экологической безопасности горнодобывающей отрасли.

Научные исследования по данному направлению ведутся в ООО «НПП «ТехАргос».

В перспективе планируется на базе одного из ведущих вузов Российской Федерации создать учебно-научную лабораторию и задействовать ее в учебном процессе подготовки высококвалифицированных специалистов для обеспечения потребности отрасли в квалифицированных кадрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акматов Д.Ж., Николайчук В.В., Тихонов А.А., Шевчук Р.В. Радарная интерферометрия как дополнение к классическим методам наблюдений за сдвижением земной поверхности. Горная промышленность. 2020. № 1. С. 144–147. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147
2. Дубров М.Н., Алешин В.А. Высокоточные лазерные интерферометры в многокомпонентных измерительных системах. Журнал радиоэлектроники. 2000. № 10. С. 7–13. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html>
3. Милуков В.К., Кравчук В.К. Наблюдения спектра деформаций земли лазерным интерферометром-деформографом. Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 1996. № 2. С. 73–78. Режим доступа: <http://vnu.phys.msu.ru/ru/abstract/1996/2/96-2-073/>
4. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа. Геофизические исследования. 2012;13(3):5–17.
5. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Радарная спутниковая интерферометрия: новые технологии спутникового мониторинга областей разработки полезных ископаемых, смещений природных и техногенных объектов. Наука и технологические разработки. 2016. № 95(3). С. 5–11.
6. Мясников А.В. О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере баксанского большебазового лазерного интерферометра. Сейсмические приборы. 2019/ № 55(2). С. 27–38. DOI: 10.21455/si2019.2-2
7. Advanced AI Model Predicts Ground Subsidence in Mining Areas. AZoMining, 2024. Режим доступа: <https://www.azomining.com/News.aspx?news-ID=18502> (дата обращения: 17.11.2025).
8. Application of InSAR Technology in Monitoring of Ground Deformation in Mining Areas. SPIE Proceedings, 2011. Режим доступа: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8286/82861W/Application-of-InSAR-technology-in-monitoring-of-ground-deformation-in/10.1117/12.912730.short> (дата обращения: 17.11.2025).
9. Braitenberg C. The deforming and rotating Earth — A review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. Geodesy and Geodynamics. 2018. No. 9(3). P. 187–196. DOI: 10.1016/j.geog.2018.03.003
10. Decision-making fusion of InSAR technology and offset tracking to monitor mining subsidence. Frontiers in Earth Science, 2022. Режим доступа: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/>

- articles/10.3389/feart.2022.962362/full (дата обращения: 20.10.2025).
11. D'Errico M. Evolution of Spaceborne SAR Missions in Earth Orbit. *Remote Sensing*. 2025. Vol. 17. P. 32–40. DOI: 10.3390/rs17223773
 12. InSAR Applications for Mining. SkyGeo. Режим доступа: <https://skygeo.com/mining/> (дата обращения: 10.11.2025).
 13. InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining. *Geotechnics*, 2023. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2673-7418/5/4/55> (дата обращения: 02.12.2025).
 14. InSAR Monitoring for Geotechnical Risk Management in Mining. SkyGeo. Режим доступа: <https://skygeo.com/insar-monitoring-for-geotechnical-risk-management-in-mining/> (дата обращения: 10.11.2025).
 15. InSAR Monitoring of Subsidence Induced by Underground Mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379> (дата обращения: 02.12.2025).
 16. InSAR Monitoring Surface Deformation Induced by Underground Mining Activities. *IAHS Proceedings*, 2020. Режим доступа: <https://piahs.copernicus.org/articles/382/237/2020/piahs-382-237-2020.pdf> (дата обращения: 01.12.2025).
 17. InSAR Revolutionizing Mine Site Safety Monitoring 2025 — Farmonaut. Режим доступа: <https://farmonaut.com/mining/insar-revolutionizing-mine-site-safety-monitoring-2025> (дата обращения: 20.10.2025).
 18. InSAR Technology Case Studies: Preventing Water Failures. Farmonaut, 2024. Режим доступа: <https://farmonaut.com/case-study/insar-technology-case-studies-preventing-water-failures> (дата обращения: 02.12.2025).
 19. InSAR Technology for Enhanced Tailings Dam Safety Monitoring. *Geofem*, 2023. Режим доступа: <https://www.geofem.com/post/insar-geotechnical-engineering-for-tailings-dam-safety> (дата обращения: 03.12.2025).
 20. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Market Size, Trends and Forecast 2023–2033. *Future Market Insights*, 2024. Режим доступа: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/interferometric-synthetic-aperture-radar-market> (дата обращения: 21.10.2025).
 21. Interferometric Synthetic Aperture Radar Market Size Report 2023–2032. *Global Market Insights*, 2023. Режим доступа: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/interferometric-synthetic-aperture-radar-market> (дата обращения: 23.10.2025).
 22. Leveraging InSAR Technology to Optimize Lidar Data Collection. *LiDAR Magazine*, 2025. Режим доступа: <https://lidarmag.com/2025/08/30/leveraging-insar-technology-to-optimize-lidar-data-collection/> (дата обращения: 23.10.2025).
 23. Life Cycle Mining Deformation Monitoring and Analysis Using InSAR. *Remote Sensing*, 2024. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2335> (дата обращения: 02.12.2025).
 24. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A laser interferometer-deformograph for monitoring the crust movement. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005. No/ 48(6). P. 780–795. DOI: 10.1007/s10786-005-0140-9
 25. Monitoring Mining Activity with InSAR Technology. *Geofem*, 2023. Режим доступа: <https://www.geofem.com/post/monitoring-mining-activity-with-insar-technology> (дата обращения: 02.12.2025).
 26. Operational Mine Monitoring with InSAR. Australian Centre for Geomechanics, 2016. Режим доступа: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1604_48_Taylor/ (дата обращения: 01.12.2025).
 27. Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271603000212> (дата обращения: 21.10.2025).
 28. Practical Application of InSAR for Slope Performance Monitoring. *Engineering Geology*, 2021. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379> (дата обращения: 02.02.2025).
 29. Using Advanced InSAR Techniques as a Remote Tool for Mine Site Monitoring. *Tre Altamira*, 2015. Режим доступа: https://site.tre-altamira.com/wp-content/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf (дата обращения: 01.12.2025).
 30. Utilizing InSAR for Surface Stability Monitoring in Mining Sites. *ISPRS Archives*, 2024. Режим доступа: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVIII-1-2024/523/2024/isprs-archives-XLVIII-1-2024-523-2024.pdf> (дата обращения: 02.12.2025).

REFERENCES

1. Advanced AI Model Predicts Ground Subsidence in Mining Areas. *AZoMining*, 2024. Retrieved November 17, 2025, from <https://www.azomining.com/News.aspx?newsID=18502>.
2. Akmatov D.Z., Nikolaychuk V.V., Tikhonov A.A., Shevchuk R.V. Radar Interferometry as a Supplement to Classical Methods of Ground Surface Movement Monitoring. *Gornaya Promyshlennost*. 2020. No. 1. P. 144–147 (In Russ.). DOI: 10.30686/1609-9192-2020-1-144-147
3. Application of InSAR Technology in Monitoring of Ground Deformation in Mining Areas. *SPIE*

- Proceedings*, 2011. Retrieved November 17, 2025, from <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/8286/82861W/Application-of-InSAR-technology-in-monitoring-of-ground-deformation-in/10.1117/12.912730.short>.
4. Braitenberg C. The Deforming and Rotating Earth — A Review of the 18th International Symposium on Geodynamics and Earth Tide, Trieste 2016. *Geodesy and Geodynamics*. 2018. No. 9(3). P. 187–196. DOI: 10.1016/j.geog.2018.03.003
 5. Decision-making fusion of InSAR technology and offset tracking to monitor mining subsidence. *Frontiers in Earth Science*, 2022. Retrieved October 20, 2025, from <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.962362/full>.
 6. D'Errico M. Evolution of Spaceborne SAR Missions in Earth Orbit. *Remote Sensing*. 2025. No. 17. P. 32–40. DOI: 10.3390/rs17223773
 7. Dubrov M.N., Aleshin V.A. High-Precision Laser Interferometers in Multicomponent Measurement Systems. *Zhurnal Radioelektroniki*. 2000. No. 10. P. 7–13 (In Russ.). Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/oct00/4/text.html> (accessed: 20.10.2025).
 8. InSAR Applications for Mining. *SkyGeo*. Retrieved November 10, 2025, from <https://skygeo.com/mining/>.
 9. InSAR-Based Assessment of Land Subsidence Induced by Coal Mining. *Geotechnics*, 2023. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.mdpi.com/2673-7418/5/4/55>.
 10. InSAR Monitoring for Geotechnical Risk Management in Mining. *SkyGeo*. Retrieved November 10, 2025, from <https://skygeo.com/insar-monitoring-for-geotechnical-risk-management-in-mining/>.
 11. InSAR Monitoring of Subsidence Induced by Underground Mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2022. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379>.
 12. InSAR Monitoring Surface Deformation Induced by Underground Mining Activities. *IAHS Proceedings*, 2020. Retrieved December 01, 2025, from <https://piahs.copernicus.org/articles/382/237/2020/piahs-382-237-2020.pdf>.
 13. InSAR Revolutionizing Mine Site Safety Monitoring 2025 — Farmonaut. Retrieved October 20, 2025, from <https://farmonaut.com/mining/insar-revolutionizing-mine-site-safety-monitoring-2025>.
 14. InSAR Technology Case Studies: Preventing Water Failures. *Farmonaut*, 2024. Retrieved December 02, 2025, from <https://farmonaut.com/case-study/insar-technology-case-studies-preventing-water-failures>.
 15. InSAR Technology for Enhanced Tailings Dam Safety Monitoring. *Geofem*, 2023. Retrieved December 03, 2025, from <https://www.geofem.com/post/insar-geotechnical-engineering-for-tailings-dam-safety>.
 16. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Market Size, Trends and Forecast 2023–2033. *Future Market Insights*, 2024. Retrieved October 21, 2025, from <https://www.futuremarketinsights.com/reports/interferometric-synthetic-aperture-radar-market>.
 17. Interferometric Synthetic Aperture Radar Market Size Report 2023–2032. *Global Market Insights*, 2023. Retrieved October 23, 2025, from <https://www.gminsights.com/industry-analysis/interferometric-synthetic-aperture-radar-market>.
 18. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Smolyaninova E.I., Timoshkina E.P. Estimation of the Full Displacement Vector of the Earth's Surface and Man-Made Objects Using Radar Satellite Interferometry for Oil and Gas Field Development Areas. *Geofizicheskije Issledovaniya*. 2012. No. 13(3). P. 5–17 (In Russ.).
 19. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smolyaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Timoshkina E.P., Khayretdinov S.A. Radar Satellite Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas, Displacements of Natural and Man-Made Objects. *Nauka i Tekhnologicheskie Razrabotki*. 2016. No. 95(3). P. 5–11 (In Russ.).
 20. Milyukov V.K., Klyachko B.S., Myasnikov A.V., Striganov P.S., Yanin A.F., Vlasov A.N. A Laser Interferometer-Deformograph for Monitoring the Crust Movement. *Instruments and Experimental Techniques*. 2005. No. 48(6). P. 780–795. DOI: 10.1007/s10786-005-0140-9
 21. Milyukov V.K., Kravchuk V.K. Observations of Earth Deformation Spectrum by Laser Interferometer-Deformograph. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 3: Fizika. Astronomiya*. 1996. No. 2. P. 73–78 (In Russ.). Available at: <http://vmu.phys.msu.ru/ru/abstract/1996/2/96-2-073/> (accessed: 20.10.2025).
 22. Monitoring Mining Activity with InSAR Technology. *Geofem*, 2023. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.geofem.com/post/monitoring-mining-activity-with-insar-technology>.
 23. Myasnikov A.V. On the Problem of Accounting for the Influence of Meteorological Factors on Large Precision Systems Using the Example of the Baksan Large-Base Laser Interferometer. *Seismic Instruments*. 2019. No. 55(2). P. 27–38 (In Russ.). DOI: 10.21455/si2019.2-2
 24. Leveraging InSAR Technology to Optimize Lidar Data Collection. *LiDAR Magazine*, 2025. Retrieved October 23, 2025, from <https://lidarmag.com/2025/08/30/leveraging-insar-technology-to-optimize-lidar-data-collection/>.
 25. Life Cycle Mining Deformation Monitoring and Analysis Using InSAR. *Remote Sensing*, 2024. Retrieved December 02, 2025, from <https://www.mdpi.com/2072-4292/16/13/2335>.
 26. Operational Mine Monitoring with InSAR. *Australian Centre for Geomechanics*, 2016. Retrieved December 01, 2025, from https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1604_48_Taylor/.

27. Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built-up areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2003. Retrieved October 21, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0924271603000212>.
28. Practical Application of InSAR for Slope Performance Monitoring. *Engineering Geology*, 2021. Retrieved February 02, 2025, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795221003379>.
29. Using Advanced InSAR Techniques as a Remote Tool for Mine Site Monitoring. *Tre Altamira*, 2015. Retrieved December 01, 2025, from https://site.tre-altamira.com/wp-content/uploads/2015_InSAR_mine-site_monitoring.pdf.
30. Utilizing InSAR for Surface Stability Monitoring in Mining Sites. *ISPRS Archives*, 2024. Retrieved December 02, 2025, from <https://isprs-archives.com/papers/XLVIII-1-2024/523/2024/isprs-archives-XLVIII-1-2024-523-2024.pdf>.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

А.А. Анженко — концепция и дизайн исследования; теоретическое обоснование применения технологии InSAR, в особенности метода SBAS-InSAR, для геодинамического мониторинга объектов горнодобывающей промышленности; разработка математических моделей для оценки деформационных процессов (выражения (1)–(7), (14), включая модель экспоненциального затухания деформаций (5) и интегральную модель взвешенного усреднения (6); проведение сравнительного анализа методов DInSAR, PS-InSAR и SBAS-InSAR; систематизация практического опыта применения InSAR на международных и отечественных объектах (Кузбасс, Казахстан, Австралия, Китай); формулировка ключевых областей применения и критериев деформационной опасности (табл. 1, 2); анализ экономической эффективности внедрения InSAR (выражения (8), (9), табл. 4); разработка рекомендаций по адаптации технологии к условиям Российской Федерации, включая поправки на климатические условия и вечную мерзлоту (выражения (9), (10)); написание и редактирование основного текста статьи; общее руководство проектом.

А.В. Анженко — методологическая поддержка исследования; анализ и систематизация нормативной базы и требований к геотехническому мониторингу в горнодобывающей отрасли; разработка рекомендаций по созданию гибридных систем мониторинга, интегрирующих данные InSAR с наземными сенсорными сетями (IoT) и технологиями искусственного интеллекта (ИИ); формулировка перспективных направлений развития технологии, включая использование группировок малых спутников (CubeSat); участие в анализе организационных барьеров внедрения InSAR на предприятиях РФ и разработке предложений по подготовке квалифицированных кадров; редакторская правка и согласование окончательного варианта текста статьи.

Artem A. Anzhenko — research conception and design; theoretical justification for the application of InSAR technology, especially the SBAS-InSAR method, for geodynamic monitoring of mining facilities; development of mathematical models for assessing deformation processes (Formulas (1)–(7), (14)), including the exponential decay model of deformations (5) and the integrated weighted averaging model (6); conducting a comparative analysis of DInSAR, PS-InSAR, and SBAS-InSAR methods; systematization of practical experience in applying InSAR at international and domestic sites (Kuzbass, Kazakhstan, Australia, China); formulation of key application areas and deformation hazard criteria (Tables 1, 2); analysis of the economic efficiency of InSAR implementation (Formulas (8), (9), Table 4); development of recommendations for adapting the technology to the conditions of the Russian Federation, including adjustments for climatic conditions and permafrost (Formulas (9), (10)); writing and editing the main text of the article; overall project supervision.

Alexander V. Anzhenko — methodological support for the research; analysis and systematization of the regulatory framework and requirements for geotechnical monitoring in the mining industry; development of recommendations for creating hybrid monitoring systems integrating InSAR data with ground-based sensor networks (IoT) and artificial intelligence (AI) technologies; formulation of promising directions for technology development, including the use of small satellite constellations (CubeSat); participation in the analysis of organizational barriers to InSAR implementation at Russian enterprises and development of proposals for training qualified personnel; editorial revision and approval of the final version of the article text.

ТЕХНИКА ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ / GEOLOGICAL EXPLORATION TECHNIQUES

С.В. Серебряков — сбор и анализ эмпирических данных по практическим кейсам применения InSAR; верификация точности данных InSAR путем сопоставления с результатами наземных геодезических измерений (раздел «Анализ практической эффективности на основе практических примеров (кейсов)»); участие в разработке модели интеграции данных (табл. 3) и оценке весовых коэффициентов для гибридных систем мониторинга; анализ технических и методических ограничений технологии, включая влияние атмосферных помех и проблем интеграции с существующими системами контроля; подготовка графических материалов и таблиц; критический анализ литературных источников; участие в написании разделов «Материалы и методы» и «Результаты».

Sergey V. Serebryakov — collection and analysis of empirical data on practical case studies of InSAR application; verification of InSAR data accuracy by comparison with results from ground-based geodetic measurements (section «Analysis of practical effectiveness based on case studies»); participation in the development of the data integration model (Table 3) and assessment of weighting coefficients for hybrid monitoring systems; analysis of technical and methodological limitations of the technology, including the impact of atmospheric interference and problems of integration with existing control systems; preparation of graphical materials and tables; critical analysis of literature sources; participation in writing the «Materials and Methods» and «Results» sections.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Анженко Артем Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной кибербезопасности и защиты геоданных (ПКИЗГ) ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия e-mail: anzhenkoaa@mgri.ru тел.: +7 (915) 488-97-33 SPIN-код: 5532-6386 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6872-8021>

Artem A. Anzhenko — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Industrial Cybersecurity and Geodata Protection, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI). 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia e-mail: anzhenkoaa@mgri.ru tel.: +7 (915) 488-97-33 SPIN-code: 5532-6386 ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6872-8021>

Анженко Александр Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры экономики минерально-сырьевого комплекса (ЭМСК) ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия e-mail: anzhenkoav@mgri.ru тел.: +7 (926) 882-98-99 SPIN-код: 3969-6144 ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1862-4629>

Alexander V. Anzhenko — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Economics of the Mineral Resource Complex, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting (MGRI). 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia e-mail: anzhenkoav@mgri.ru tel.: +7 (926) 882-98-99 SPIN-code: 3969-6144 ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1862-4629>

Серебряков Сергей Владимирович — кандидат технических наук, доцент кафедры управления недвижимостью и развитием территорий ФГБОУ ВО «Московского государственного университета геодезии и картографии»; генеральный директор АО «Оператор пространственных данных сервисов». Лауреат премии им. Ф.Н. Красовского (2005 г.). Почетный геодезист. 16а, ул. Лефортовский Вал, г. Москва 111250, Россия e-mail: serebryakovsv@mgri.ru тел.: +7 (985) 303-50-90 Author ID: 148768 ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1387-6478>

Sergey V. Serebryakov — Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof. of the Department of Real Estate Management and Territory Development at Moscow State University of Geodesy and Cartography (MIIGAIK); General Director of Operator of Spatial Data and Services JSC. Laureate of the F.N. Krasovsky Prize (2005). Honorary Surveyor. 16A, Lefortovsky Val str., Moscow 111250, Russia e-mail: serebryakovsv@mgri.ru tel.: +7 (985) 303-50-90 Author ID: 148768 ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1387-6478>

