

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

2024

Том 66, № 2
Vol. 66, #2

PROCEEDINGS OF HIGHER
EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS
GEOLOGY AND EXPLORATION

2

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

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 66, № 2

2024

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 (MGRI)

PROCEEDINGS OF HIGHER EDUCATIONAL ESTABLISHMENTS

GEOLOGY AND EXPLORATION

Scientific methodological journal

Vol. 66, No. 2

2024

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

Керимов Вагиф Юнус оглы, заслуженный геолог Российской Федерации, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геолого-разведочный университет имени Серго Орджоникидзе, 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

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

Иностранные 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

GEOLOGY

AND

EXPLORATION

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	28.06.2024
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). 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

Vagif Y. Kerimov, Honored Geologist of the Russian Federation, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.), Prof., Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, 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

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

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, Mineralogy 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, Corresponding Member 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. Trubetskoy, 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	28.06.2024
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). Russian Science Citation Index (eLIBRARY.RU), DOAJ, GeoRef, Google Scholar, Chemical Abstracts, Worldcat, Ulrich's Periodicals Directory.

СОДЕРЖАНИЕ

ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ

- 8 ПЕРВООТКРЫВАТЕЛИ СИБИРСКОЙ НЕФТИ И ГАЗА: ОТ Ю.Г. ЭРВЬЕ ДО Ф.К. САЛМАНОВА.
ПЕРВООТКРЫВАТЕЛИ ГАЗА И НЕФТИ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ С.А. ОРУДЖЕВ, И.С. ГРАМБЕРГ И ДРУГИЕ
В.Л. ШУСТЕР

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

- 13 ОЦЕНКА ВТОРИЧНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИСАХАЛИНСКОГО
ШЕЛЬФА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
В.Ю. КЕРИМОВ, Г.Н. ПОТЕМКИН, А.К. ШАТЫРОВ
- 22 УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ЗАМЫКАНИЯ ЕНИСЕЙ-
ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА В СВЯЗИ С ОЦЕНКОЙ ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ
А.М. ВЫСОКОЛЯН, Д.А. ПАВЁЛКИНА, Е.А. ЛАВРЕНОВА, А.К. ШАТЫРОВ
- 35 ОСАДОЧНЫЕ БАСЕЙНЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И СОПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ
СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
Д.А. ПАВЁЛКИНА, А.М. ВЫСОКОЛЯН, Е.А. ЛАВРЕНОВА, А.К. ШАТЫРОВ

ГИДРОГЕОЛОГИЯ И ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

- 49 ПОЛЕВЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЛИНИСТОЙ ТОЛЩИ ЗОНЫ ДИСЛОКАЦИИ
В РАЙОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС «ПАКШ-2», ВЕНГРИЯ
М.В. ВИЛЬКИНА, А.М. НИКУЛЕНКОВ, В.Г. РУМЫНИН, М.М. ЧЕРЕПАНСКИЙ
- 60 ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ БЕРЕГОВ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ
С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
М.В. СТЕПАНОВА, В.Н. ЭКЗАРЬЯН
- 69 ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВСАСЫВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ НЕПОЛНОСТЬЮ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ
НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА
М.А. НОВГОРОВОДА, Д.Н. ГОРОБЦОВ, А.С. УШАКОВ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- 80 ВЕЩЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОССЫПНОГО ЗОЛОТА РУЧЬЯ ВЕТВИСТЫЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ВЫЯВЛЕНИЯ РОССЫПЕЙ С НЕТИПИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ В РАЙОНЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ
р. СЕЛЕННЫХ (МОМСКИЙ, АБЫЙСКИЙ РАЙОН (ЯКУТИЯ))
А.М. ПРАСОЛОВ, О.В. ВЛАДИМИРЦЕВА

ГЕОЛОГИЯ

- 91 ЖИВЕТСКИЕ МЕГАСПОРОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ МИХАЙЛОВСКОГО КАРЬЕРА (КУРСКАЯ ОБЛ.)
Д.И. МАРИНИНА, О.А. ОРЛОВА

МИНЕРАЛОГИЯ, ПЕТРОГРАФИЯ, ЛИТОЛОГИЯ

- 101 ЛИЗАРДИТ-«КОЛЬСКИТ» ИЗ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО МАССИВА ЛЕСНАЯ ВАРАКА
(КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ): НОВЫЕ ДАННЫЕ
М.О. БУЛАХ
- 112 ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, ВКЛЮЧЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СИНИХ КОРУНДОВ
ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СТАЖ-2, ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР
А.К. ЛИТВИНЕНКО, Д.Б. ВАНДАНОВА, О.А. ШИЛОВА, С.Б. ПАХОМОВА

ГЕОЭКОЛОГИЯ

- 124 ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА И НАГРУЗКИ, СВЯЗАННЫЕ
С АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА СРЕДУ
Э.М. АЛИЕВ, В.Ю. КЕРИМОВ, Ю.А. ЛОБАНОВ
- 141 ИСТОРИЯ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ГАЛАПАГОССКИХ ОСТРОВАХ (РЕСПУБЛИКА ЭКВАДОР)
М.Л. РОСЕРО ВАЛЬЕХО, О.А. ХЛЕБОСОЛОВА

ЮБИЛЕЙ

- 150 КЕРИМОВ ВАГИФ ЮНУС ОГЛЫ (К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

- 8** **DISCOVERERS OF SIBERIAN OIL AND GAS: FROM RAUL-YURI G. ERVIER TO FARMAN K. SALMANOV. SABIT A. ORUDZHEV, IGOR S. GRAMBERG AND OTHERS — DISCOVERERS OF GAS AND OIL IN THE ARCTIC SHELF**
VLADIMIR L. SCHUSTER

GEOLOGY AND PROSPECTING FOR HYDROCARBON RESERVES

- 13** **ASSESSMENT OF GEOMECHANICAL PROPERTIES OF SAKHALIN SHELF RESERVOIRS BASED ON MODELING RESULTS**
VAGIF Yu. KERIMOV, GRIGORY N. POTEKIN, ANAR K. SHATYROV
- 22** **DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS OF THE NORTHEASTERN YENISEY-KHATANGA SEDIMENTARY COVER IN RELATION TO ASSESSMENT OF HYDROCARBON PROSPECTS**
ANASTASIA M. VYSOKOLYAN, DIANA A. PAVELKINA, ELENA A. LAVRENOVA, ANAR K. SHATYROV
- 35** **SEDIMENTARY BASINS IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE LAPTEV SEA AND THE ADJACENT AREA OF THE SIBERIAN PLATFORM**
DIANA A. PAVELKINA, ANASTASIA M. VYSOKOLYAN, ELENA A. LAVRENOVA, ANAR K. SHATYROV

HYDROGEOLOGY AND ENGINEERING GEOLOGY

- 49** **FIELD AND MODEL INVESTIGATIONS OF CLAY LAYER PERMEABILITY IN THE AREA OF PAKS II NPP CONSTRUCTION**
MARIA V. VILKINA, ANTON M. NIKULENKOV, VYACHESLAV G. RYMUNIN, MIKHAIL M. CHEREPANSKY
- 60** **STUDY INTO THE RESHAPING PROCESS OF LARGE RESERVOIR BANKS USING REMOTE SENSING**
MARIA V. STEPANOVA, VLADIMIR N. EKZARYAN
- 69** **INFLUENCE OF SUCTION PRESSURE OF CLAY UNSATURATED SOILS ON SLOPE STABILITY**
MARGARITA A. NOVGORODOVA, DENIS N. GOROBTSOV, ANDREY S. USHAKOV

GEOLOGY AND PROSPECTING FOR SOLID MINERAL DEPOSITS

- 80** **MATERIAL CHARACTERISTIC OF VETVISTY CREEK PLACER GOLD AND PROSPECTS FOR ATYPICAL-SOURCE DEPOSITS IN THE MIDDLE COURSE OF THE SELENNYAKH RIVER (MOMSKY AND ABYISKY DISTRICT, YAKUTIA)**
ALEXANDER M. PRASOLOV, OLGA V. VLADIMIRTSEVA

GEOLOGY

- 91** **GIVETIAN MEGASPORE ASSEMBLAGES OF THE MIKHAILOVSKY MINE (KURSK OBLAST)**
DARIA I. MARININA, OLGA A. ORLOVA

MINERALOGY, PETROGRAPHY, LITHOLOGY

- 101** **LIZARDITE “KOLSKITE” FROM THE LESNAYA VARAKA ALKALINE ULTRABASIC MASSIF (KOLA PENINSULA): NEW DATA**
MARIA O. BULAKH
- 112** **OPTICAL PROPERTIES, INCLUSIONS, AND CHEMICAL COMPOSITION OF BLUE CORUNDUM FROM THE STAZH-2 DEPOSIT, SOUTH-WESTERN PAMIR**
ANDREI K. LITVINENKO, DARIMA B. VANDANOVA, OKSANA A. SHILOVA, SVETLANA B. PAKHOMOVA

GEOECOLOGY

- 124** **ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT IN THE CASPIAN REGION**
EMIN M. ALIYEV, VAGIF YU. KERIMOV, YURY A. LOBANOV
- 141** **NATURE MANAGEMENT HISTORY AND PROSPECTS FOR IMPROVING ENVIRONMENTAL MONITORING IN GALAPAGOS ISLANDS (REPUBLIC OF ECUADOR)**
MARY LOURDES ROSERO VALLEJO, OLGA A. KHLBOSOLOVA

ANNIVERSARY

- 150** **KERIMOV VAGIF YUNUS OGLU (ON THE 75th ANNIVERSARY OF HIS BIRTH)**



ПЕРВООТКРЫВАТЕЛИ СИБИРСКОЙ НЕФТИ И ГАЗА: ОТ Ю.Г. ЭРВЬЕ ДО Ф.К. САЛМАНОВА. ПЕРВООТКРЫВАТЕЛИ ГАЗА И НЕФТИ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ С.А. ОРУДЖЕВ, И.С. ГРАМБЕРГ И ДРУГИЕ

В.Л. ШУСТЕР

*Институт проблем нефти и газа РАН
3, Губкина ул., г. Москва 119333, Россия*

АННОТАЦИЯ

В работе увековечены имена ученых, организаторов и первооткрывателей месторождений углеводородов, внесших свой вклад в развитие нефтегазодобывающей промышленности, популяризацию лучших примеров служения Отечеству, обществу и науке. Статья подготовлена по результатам доклада на пленарной секции Международной научной конференции «Становление и развитие нефтегазодобывающей промышленности — вклад российских и азербайджанских ученых и специалистов».

Ключевые слова: тюменская геологоразведка, Арктика, развитие промышленности, первооткрыватели месторождений

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Шустер В.Л. Первооткрыватели сибирской нефти и газа: от Ю.Г. Эрвье до Ф.К. Салманова. Первооткрыватели газа и нефти на арктическом шельфе С.А. Оруджев, И.С. Грамберг и другие. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):8—12. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-8-12>

Статья поступила в редакцию 16.11.2023

Принята к публикации 14.01.2024

Опубликована 28.06.2024

DISCOVERERS OF SIBERIAN OIL AND GAS: FROM RAUL-YURI G. ERVIER TO FARMAN K. SALMANOV. SABIT A. ORUDZHEV, IGOR S. GRAMBERG AND OTHERS — DISCOVERERS OF GAS AND OIL IN THE ARCTIC SHELF

VLADIMIR L. SCHUSTER

*Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences
3, Gubkin str., Moscow 119333, Russia*

ABSTRACT

The work perpetuates the names of scientists and discoverers of hydrocarbon deposits who have contributed to the development of the oil and gas industry. These figures are the finest examples of service to the Motherland, Society, and Science. The article is based on the results of a report at

the plenary section of the international scientific conference entitled “Formation and development of the oil and gas industry — the contribution of Russian and Azerbaijani scientists and specialists”.

Keywords: contribution of Russian scientists, industrial development, Caspian region

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

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

For citation: Schuster V.L. Discoverers of Siberian oil and gas: from Raul-Yuri G. Ervier to Farman K. Salmanov. Sabit A. Orudzhev, Igor S. Gramberg and others — discoverers of gas and oil in the arctic shelf. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):8—12. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-8-12>

Manuscript received 16 November 2023

Accepted 14 January 2024

Published 28 June 2024

Рауль-Юрий Георгиевич Эрвье (1909—1991 гг.) (рис. 1)

Ю.Г. Эрвье — первооткрыватель нефтяных и газовых месторождений и патриарх тюменской геологоразведки. Герой Социалистического Труда. Лауреат Ленинской премии.

Ю.Г. Эрвье родился в Тбилиси, начал трудовую деятельность в 14 лет. В 1933 г. окончил с отличием Высшие инженерные курсы в Киеве, работал на Украине, Северном Кавказе. Участник Великой Отечественной войны. Демобилизован в декабре 1944 г. в звании инженер-майора. С 1945 до 1952 г. работал начальником Южно-Молдавской нефтеразведки треста «Молдавнефтегеология».



Рис. 1. Рауль-Юрий Георгиевич Эрвье
Fig. 1. Raul-Yuri Georgievich Ervier

В августе 1952 г. направлен на работу в Тюменскую нефтеразведочную экспедицию. С 1955 по 1966 г. — управляющий трестом, в 1966—1977 гг. — начальник главка «Главтюменьгеология».

За время его руководства открыто более 250 месторождений нефти и газа, в том числе уникальных (Самотлорское, Уренгойское и др.). Проработал до 1981 г., до ухода на пенсию. С 1977 до 1981 г. работал заместителем министра геологии СССР.

После его ухода такие люди, как А.Г. Быстрицкий, Ф.К. Салманов, А.М. Брехунцов, В.Т. Подшибякин, В.Д. Токарев, Л.И. Ровнин, И.Я. Гиря, А.Г. Юдин, В.А. Абазаров, с честью продолжили его дело.

Одним из соратников Ю.Г. Эрвье и продолжателей сибирской нефтегазразведки был Ф.К. Салманов, с именем которого связано открытие первых нефтяных месторождений Сибири.

Фарман Курбан оглы Салманов (1931—2007 гг.) (рис. 2)

Ф.К. Салманов — один из первооткрывателей сибирской нефти. Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии, член-корреспондент РАН, доктор геолого-минералогических наук, основатель тюменской школы геологии, участник открытия свыше 150 месторождений нефти и газа в Сибири (в том числе крупных и гигантских).

Ф.К. Салманов родился в Шамхорском районе Азербайджанской ССР. Любовь к Сибири привил Фарману его дед Сулейман Нагды оглы, который, находясь в ссылке в Сибири, участвовал в Русско-японской войне и был освобожден за храбрость. Вторым, кто «благословил» его быть нефтяником, был Н.К. Байбаков на встрече в школе.

После окончания Азербайджанского индустриального института работал в Кузбассе,

а с 1958 г. — в Сургуте, в Западной Сибири. В том же году была организована Сургутская нефтеразведочная экспедиция, ее начальником назначили Ф.К. Салманова. Были развернуты широкомасштабные геолого-разведочные работы, и 16 октября 1961 г. на берегу Оби в черте города Нефтеюганска забил первый нефтяной фонтан.

Усть-Балыкское месторождение открыли благодаря упорству и настойчивости Ф.К. Салманова, т.к. Новосибирское управление, которому была подчинена Сургутская экспедиция, настойчиво возражало против продолжения работ, считая их бесперспективными. Ф.К. Салманов направил телеграмму Н.С. Хрущеву: «Я нашел нефть. Вот так. Салманов». С 1970 г. Ф.К. Салманов был назначен заместителем Ю.Г. Эрвье — начальника главного Тюменского производственно-геологического управления, а с 1978 г. — начальником «Главтюменьгеологии».

В 1987—1991 гг. Ф.К. Салманов был первым заместителем министра геологии СССР. В 1992 г. создал ЗАО «Роспан Интернешнл».

Имя Ф.К. Салманова носят пассажирский теплоход и самолет Airbus A321 компании «Аэрофлот».

По результатам народного голосования аэропорту в Сургуте присвоено имя Фармана Салманова.

В 2019 г. президент Азербайджана Ильхам Алиев подписал распоряжение об увековечении памяти Ф.К. Салманова и сооружении памятника в Шамкире, присвоении его имени школе, где он учился.

В 2021 г. в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе состоялось открытие аудитории и памятника Фарману Салманову.

**Сабит Атаевич Оруджев — легендарный
министр газовой промышленности
(1912—1981 гг.) (рис. 3)**

С.А. Оруджев родился в Баку. В 16 лет начал работать в средней школе по ликвидации неграмотности населения. В 1936 г. окончил с отличием Азербайджанский индустриальный университет по профессии «горный инженер-нефтепромысловик» и был направлен в трест «Орджоникидзе-нефть», где вскоре стал управляющим трестом. Затем работал в Азнефти, Краснодарнефти и в 1949 г. был назначен начальником Главморнефти,



Рис. 2. Фарман Курбан оглы Салманов
Fig. 2. Farman Kurban oglu Salmanov



Рис. 3. Сабит Атаевич Оруджев
Fig. 3. Sabit Ataevich Orudzhev

где за работу по морской нефтедобыче был награжден орденами Ленина и Трудового Красного Знамени и Сталинскими премиями I и III степени.

В 1955 г. С.А. Оруджев стал заместителем министра нефтяной промышленности СССР. На новом этапе трудового пути С.А. Оруджев работал в Совете министров СССР, где с 1965 г. занимал пост заместителя министра нефтедобывающей промышленности СССР. Оруджев защитил кандидатскую, а затем и докторскую диссертацию.

В 1971 г. за заслуги в выполнении заданий пятилетнего плана С.А. Оруджев награжден орденом Октябрьской Революции. В 1972 г. был назначен министром газовой промышленности СССР и сразу приступил к реорганизации. Были созданы союзные промышленные и научно-производственные объединения (ВПО и ВНПО) и производственные объединения — ПО. Структура управления, созданная С.А. Оруджевым, оказалась весьма эффективной и сохранилась без изменений до 1989 г.

И после создания концерна «Газпром» состав центрального аппарата управления и руководства объединений в большинстве своем

остался без изменения. С.А. Оруджев внес значительный вклад в строительство новой системы управления в Оренбургском газодобывающем и перерабатывающем комплексе. Так же как и в освоение сибирских газовых месторождений Уренгойское и др.

Исключительно важной заслугой С.А. Оруджева стало создание Главного управления по разведке и разработке морских месторождений нефти и газа. В 1978 г. все эти работы переданы из Миннефти в Мингазпром. Был организован целый ряд морских объединений, в том числе Союзморгео.

Обеспечение развития морских арктических геолого-разведочных работ материальными ресурсами — исключительная заслуга С.А. Оруджева. По его инициативе Правительство СССР обеспечило финансирование этих работ, строительство морских судов и буровых платформ, организацию производственных и научных учреждений по обеспечению этих работ.

С.А. Оруджев похоронен на Новодевичьем кладбище. Его именем названы Уренгойское производственное управление по добыче газа, пассажирское судно, одна из улиц Баку, установлена мемориальная доска на доме, где он жил в Москве.

Игорь Сергеевич Грамберг — создатель научной основы прогноза и поиска конкретных зон накопления углеводородов в Арктике (1922—2002 гг.) (рис. 4)

И.С. Грамберг, окончив в 1940 г. десятый класс, поступил в Ленинградский институт киноинженеров (ЛИКИ).

В 1941 г. ушел добровольцем на фронт, был дважды ранен. После долгого лечения с лета 1942 г. начал работать в геологической партии. В 1949 г. окончил Ленинградский горный институт с отличием и начал работать на Таймыре. В 1955 г. защитил кандидатскую, в 1971 г. — докторскую диссертацию. В 1972 г. назначен директором НИИГА и одновременно генеральным директором объединения «Севморгео». Директором НИИГА «ВНИИОкеанология» И.С. Грамберг был до конца жизни. И.С. Грамбергом были организованы широкомасштабные исследования дна Мирового океана и поиск новых источников минеральных ресурсов. Они привели к открытию уникальных месторождений нефти и газа в акватории Баренцева и Карского морей.

В 1979 г. И.С. Грамберг был избран членом-корреспондентом, а в 1987 г. — действительным членом Академии наук СССР. В 1983 г. И.С. Грамбергу



Рис. 4. Игорь Сергеевич Грамберг
Fig. 4. Igor Sergeevich Gramberg

ИСТОРИЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ / HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

присуждена Государственная премия СССР, в 1995 г. — Госпремия РФ за открытие крупной сырьевой базы нефтяной и газовой промышленности на шельфе Западной Арктики, в 2002 г. — премия

Правительства РФ за создание карт рельефа Северного Ледовитого океана.

В 2003 г. институту «ВНИИОкеанология» присвоено имя академика И.С. Грамберга.

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Шустер В.Л. — разработал концепцию статьи, провел структуризацию материала, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Vladimir L. Shuster — development of the concept of the article, structuring of the material, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Шустер Владимир Львович — доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института проблем нефти и газа РАН.
3, ул. Губкина, г. Москва 119333, Россия
e-mail: tshuster@mail.ru
SPIN-код: 6887-7740
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6809-0135>

Vladimir L. Shuster — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Chief Researcher Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences.
3, Gubkin str., Moscow 119333, Russia
e-mail: tshuster@mail.ru
SPIN-code: 6887-7740
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6809-0135>



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-13-21>
УДК 504.5+551.24



ОЦЕНКА ВТОРИЧНЫХ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ КОЛЛЕКТОРОВ ПРИСАХАЛИНСКОГО ШЕЛЬФА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В.Ю. КЕРИМОВ¹, Г.Н. ПОТЕМКИН^{1,2}, А.К. ШАТЫРОВ^{1,*}

¹ Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе
23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия

² ООО «ИПНЭ»
13а, ул. Ярославская, г. Москва 129366, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Сложное тектоническое строение шельфа Охотского моря и высокая геодинамическая активность требуют применения специальных технологий для изучения свойств коллекторов. В данной работе была реализована технология оценки вторичной проницаемости на примере Киринского и Аяшского лицензионных блоков. Объектами исследования стали структурные и литологические ловушки различных комплексов. Установлено, что Присахалинский шельф, включая Киринский и Аяшский ЛУ, подвержен влиянию современного сдвигового поля напряжений с осью максимального сжатия, ориентированной по субшироте. Это приводит к формированию локального поля напряжений, изменению степени открытости трещин и определяет вторичную пористость и проницаемость пород. 3D-моделирование позволило провести расчет прогнозной проницаемости для каждого стратиграфического горизонта. Отмечается значительное различие вторичной проницаемости в верхних и нижних стратиграфических горизонтах.

Цель. Применение результатов геомеханической модели для оценки вторичных фильтрационно-емкостных свойств коллекторов.

Материалы и методы. Геомеханическое моделирование для оценки фильтрационно-емкостных свойств коллекторов Присахалинского шельфа было проведено с помощью программного комплекса ROXAR.

Результаты. Данная работа позволила не только предсказать эффективность фильтрации, но и улучшить понимание процессов, происходящих в геологическом разрезе шельфа Охотского моря.

Ключевые слова: Присахалинский шельф, моделирование, геомеханика, проницаемость, сложные коллекторы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Керимов В.Ю., Потемкин Г.Н., Шатыров А.К. Оценка вторичных фильтрационно-емкостных свойств коллекторов Присахалинского шельфа по результатам геомеханического моделирования. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):13—21. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-13-21>

Статья поступила в редакцию 25.05.2024

Принята к публикации 27.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

ASSESSMENT OF GEOMECHANICAL PROPERTIES OF SAKHALIN SHELF RESERVOIRS BASED ON MODELING RESULTS

VAGIF Yu. KERIMOV¹, GRIGORY N. POTEKIN^{1,2}, ANAR K. SHATYROV^{1,*}

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

² IPNE LLC
13a, Yaroslavskaya str., Moscow 129366, Russia

ABSTRACT

Background. Due to the complex tectonic structure of the Sea of Okhotsk shelf and intense geodynamic activity in this area, specialized technologies are required to study reservoir properties. In this work, we implement the technology of secondary permeability estimation using the Kirinskoye and Ayashskoye license blocks as an example. The research objects included structural and lithologic traps of different complexes. It was found that the Prisaakhalin shelf, including the Kirinsky and Ayashsky license areas, is subject to the modern shear stress field with the sublatitude-oriented axis of maximum compression. This initiates the formation of a local stress field, launches changes in the degree of fracture openness, and determines the secondary porosity and permeability of rocks. 3D modeling allowed us to calculate predicted permeability for each stratigraphic horizon. A significant difference of secondary permeability in the upper and lower stratigraphic horizons is noted.

Aim. To evaluate secondary filtration and capacitance properties of reservoirs by geomechanical modeling.

Materials and methods. Geomechanical modeling to assess the filtration and capacitance properties of Sakhalin shelf reservoirs was carried out using the ROXAR software package.

Results. This work allowed not only the filtration efficiency to be predicted, but also the processes occurring in the geological section of the shelf of the Sea of Okhotsk to be elucidated.

Keywords: Sakhalin shelf, modeling, geomechanics, permeability, complex reservoirs

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

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

For citation: Kerimov V.Yu., Potemkin G.N., Shatyrov A.K. Assessment of geomechanical properties of Sakhalin shelf reservoirs based on modeling results. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):13—21. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-13-21>

Manuscript received 25 May 2024

Accepted 27 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Методика исследований

В данной работе была реализована технология оценки вторичной проницаемости на примере Киринского и Аяшского лицензионных блоков. Объектами исследования стали структурные и литологические ловушки различных резервуарных комплексов. Исследованию подлежали структурные ловушки окобыкайско-дагинского, нижненутовского и верхненутовского резервуарных комплексов. Анализ проводился с целью опреде-

ления вторичной проницаемости горных пород и выявления особенностей их структуры.

Результаты исследований

Геомеханическая модель коллекторских свойств в Кириновом лицензионном участке (ЛУ)

Геомеханическая модель Киринского ЛУ базируется на трехмерной структурно-геологической модели, представленной в виде координат X, Y, Z.

Анализ эффекта, возникающего за счет горизонтального сжатия (рис. 1), позволил установить субширотное сжатие азимутальное простирание (Аз. Пр.) 90° как граничное условие при построении модели. В качестве реперных горизонтов использовались следующие структурные поверхности: подошва дахурийского горизонта (P_3^2), кровля дахурийского горизонта (P_3^2), кровля нижнедагинского подгоризонта ($N_1^{1-2}dg_1$), кровля среднедагинского подгоризонта ($N_1^{1-2}dg_{1-2}$), кровля верхнедагинского подгоризонта ($N_1^{1-2}dg_3$), кровля окобыкайского горизонта ($N_1^{2-3}ok$) [12].

Установленные данные о вероятности образования трещин позволили сделать выводы о характере появления новых трещин. Площадь новых трещин значительно меньше стабильных и недеформированных участков. Особенно подверженным деформациям оказалась южная часть лицензионного участка. Исходя из результатов исследований, была разработана модель трещиноватости на месторождениях Киринского ЛУ. Модель была построена на основе шести параметров, учитывающих особенности геологической структуры и вероятности появления трещин. Анализ результатов расчетов вероятности возникновения трещин показал, что новообразованные трещины занимают незначительную площадь по сравнению со стабильными территориями. Отдельные участки, особенно южная часть ЛУ, подвержены значительным деформациям [4, 9].

При моделировании фильтрационных процессов в пласте, особенно при описании сложных коллекторов с большим количеством трещин, часто используется метод двойного пространства. Этот метод включает в себя двойную пористость

и проницаемость. Первичная пористость и проницаемость, связанные с межзерновыми параметрами коллектора, изучаются с помощью традиционных методов. А вторичная пористость учитывается с помощью специальных методов, которые позволяют прогнозировать плотность, апертуру и ориентацию систем трещин. Месторождения Киринского ЛУ являются примером месторождений, где присутствует сложный коллектор. Этот коллектор обладает как первичной, так и вторичной пористостью и проницаемостью. Поэтому эффективные фильтрационно-емкостные свойства этого коллектора можно рассматривать как «сумму» первичной и вторичной пористости и проницаемости. Для более точного моделирования и понимания процессов фильтрации в таких коллекторах необходимо учитывать обе компоненты.

Детальный разрез значений вторичной проницаемости через скважины Южно-Киринского месторождения показал, что есть соответствие между дебитами скважин и величиной вторичной проницаемости [11].

В ходе исследования:

- была использована геомеханическая модель для оценки напряженного состояния пород;
- была создана дискретная модель трещиноватости и проведен расчет вторичной пористости и проницаемости;
- было выявлено, что процесс трещинообразования затрагивает различные участки изучаемого района неравномерно. Сильные максимумы вторичной проницаемости наблюдаются вдоль пологопадающих разломов фундамента. Большинство зон повышенных значений проницаемости

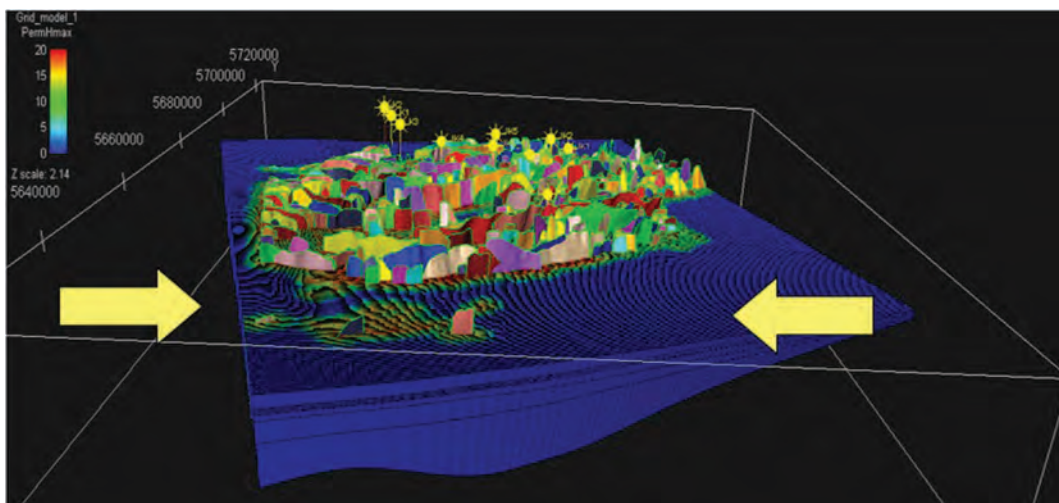


Рис. 1. 3D-сетка и разломы для геомеханической модели месторождений Киринского ЛУ

Fig. 1. 3D grid and faults for the geomechanical model of the Kirinsky license area fields

вытянуты в северо-восточном направлении, что соответствует общему простиранию разрывных нарушений [10].

Важно отметить, что Южно-Кириновское месторождение имеет сложное строение с зонами повышенных значений вторичной проницаемости. Скважины ЮК-4, ЮК-6 и ЮК-3 расположены в областях максимальной вторичной проницаемости, и именно через них получены притоки нефти. Блоки, не затронутые трещинной проницаемостью, имеют более изометричную форму и обычно находятся в областях локальных опусканий [7].

Геомеханическая модель коллекторских свойств в Аяшском ЛУ

С использованием геомеханической модели и ряда геологических параметров, таких как удаленность от разрыва, степень кривизны структурной поверхности, удаленность от конца разрыва и т. д., мы можем рассчитать относительную величину вторичной проницаемости и пористости. Абсолютные значения этих параметров можно будет получить впоследствии, когда будут проведены гидродинамические исследования скважин. Важно отметить, что при моделировании трещиноватости обычно возникает высокий уровень неопределенности, и только комплексный анализ помогает преодолеть эту неоднозначность [1].

Построенная детальная цифровая трехмерная геологическая модель позволила перейти к следующему этапу — построению геомеханической модели (рис. 2).

Для моделирования напряженного состояния коллектора используется упругая конечно-элементная модель в программном модуле RMSFracture. Приложенная нагрузка вызывает смещение по существующим разломам, что приводит к образованию локального поля напряжений. Основная цель моделирования — выявить локальное поле напряжений и оценить его влияние на появление новых трещин или изменение степени раскрытости существующих. Области повышенных значений сжимающих напряжений (σ_3) локализованы в южной части Аяшского ЛУ в верхних частях разреза, в то время как нижние части наиболее деформированы на севере. Максимумы значений вытянуты в субширотном направлении. Кроме того, были построены схемы ориентировок максимального и минимального сжатия. Расчеты появления новых трещин в горных породах основываются на математической модели Мора — Кулона, описывающей зависимость касательных напряжений от величины приложенных нормальных напряжений. Эта теория используется для расчета трендов «вероятность образования трещин» и «местоположение новообразованных трещин» [6].

Проведенные вычисления для каждого горизонта от фундамента до кровли помырского горизонта привели к нескольким выводам о появлении новых трещин. Важным фактом является то, что площадь появления новых трещин практически совпадает со стабильными и слабодеформированными районами. Следующим выводом анализа является то, что наиболее

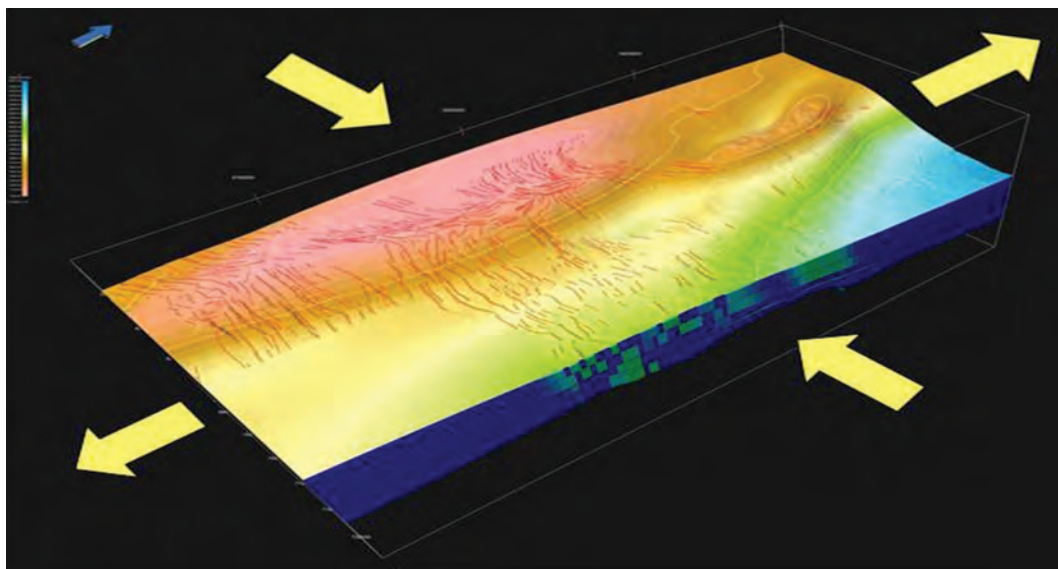


Рис. 2. 3D-сетка и разломы, построенные с помощью программы IrapRMS для геомеханической модели Аяшского ЛУ
Fig. 2. 3D grid and faults constructed using the IrapRMS program for the geomechanical model of the Ayashsky license area

деформированным участком является южная часть Аяшской ЛУ для верхних частей стратиграфического разреза. В то же время отложения, близкие к фундаменту, распределены более равномерно по площади. Эти результаты подтверждают общий характер появления новых трещин. [8].

Следующим шагом в исследовании вторичной проницаемости является создание аналитической дискретной модели трещиноватости Аяшского ЛУ при помощи программы «Create Fracture Mode». Полученные вероятностные дискретные модели трещиноватости для каждого горизонта позволяют прогнозировать степень проницаемости. В верхней части стратиграфического разреза ожидаются структурные ловушки с классическими поровыми коллекторами, такими как окобы-кайско-дагинский, нижненутовский и верхненутовский резервуарные комплексы. В то же время нижние части (миксоцен-олигоценового возраста и даже фундамента) связываются с трещинно-поровыми и кавернозно-трещинными резервуарами. Существующие тектонические нарушения верхних горизонтов, более 400, свидетельствуют о значительном влиянии трещиноватости на фильтрационные свойства коллектора. Эффективная фильтрационно-емкостная система (ФЕС) коллектора должна представлять собой комбинацию первичной и вторичной пористости и проницаемости, что делает актуальным изучение вторичной проницаемости в данном блоке. В качестве примера

приведена схема относительной трещинной проницаемости Perm Khmax Даехуриинского горизонта (рис. 3) [3].

Проведенное исследование проницаемости в Аяшском блоке позволило выявить различия между верхними и нижними стратиграфическими горизонтами. Особое значение имеет окобы-кайская глинистая пачка, которая служит поверхностью раздела между ними. Определена вторичная проницаемость в различных горизонтах блока, что может иметь важное значение для дальнейших исследований и планирования добычи. Необходимо учитывать эти различия при проведении работ и разработке месторождения.

Для более точного определения проницаемости в различных стратиграфических горизонтах Аяшского блока рекомендуется провести дополнительные исследования с учетом установленных особенностей. Это позволит более точно определить границы и характеристики проницаемости, что будет полезно для оптимизации процессов добычи и повышения эффективности работы месторождения [2].

Большинство зон повышенных значений проницаемости вытянуты в субмеридиональном направлении согласно общему простиранию структуры. Наиболее высокопроницаемые участки локализованы на крутых склонах поднятий.

Разные участки изучаемой территории неодинаково затронуты процессом трещинообразования,

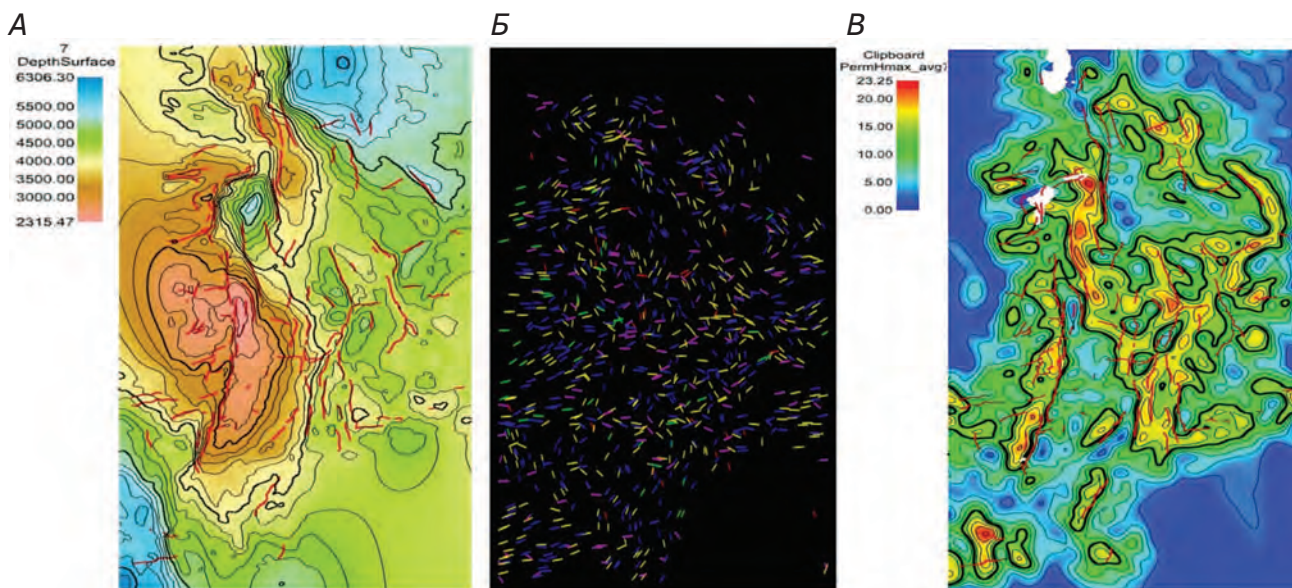


Рис. 3. Схемы структурной поверхности (А), дискретной модели трещиноватости (Б) и вторичной проницаемости (В) даехуриинского горизонта Аяшского ЛУ

Fig. 3. Schemes of the structural surface (A), discrete model of fracturing (B) and secondary permeability (C) of the Daekhuri horizon of the Ayashsky license area

причем с глубиной максимумы вторичной проницаемости локализуются вдоль пологопадающих разломов фундамента.

Вторичная проницаемость верхних горизонтов более проявлена в пределах южной половины Аяшского блока.

Заключение

В ходе исследований было установлено, что Присахалинский шельф, включая Киринский и Аяшский ЛУ (рис. 4А), подвержен влиянию современного сдвигового поля напряжений с осью максимального сжатия, ориентированной по субшироте. Это приводит к формированию локального поля напряжений, изменению степени открытости трещин и определяет вторичную пористость и проницаемость пород. 3D-моделирование позволило провести расчет прогнозной проницаемости для каждого стратиграфического горизонта. Отмечается значительное различие вторичной проницаемости в верхних и нижних стратиграфических горизонтах.

Например, в зонах к югу от Восточно-Одоптинского поднятия наблюдается изменение ориентации и формы высоких значений вторичной проницаемости, особенно это заметно при переходе к Аяшскому и Киринскому ЛУ. На Киринском

ЛУ вторичная проницаемость уменьшается, в то время как на Аяшском ЛУ остается практически неизменной (рис. 4Б). Основные максимумы повышенной проницаемости протягиваются вдоль крупных разрывных нарушений и формируют сеть фильтрационных каналов, которые влияют на миграцию УВ.

Например, в Окобыкайской свите крупные разрывные нарушения выступают в качестве каналов вертикальной миграции УВ, соединяя палеогеновые комплексы с коллекторами верхнего миоцена и плиоцена. Наиболее проницаемой для верхне-миоцен-плиоценовых отложений оказывается южная половина Аяшского ЛУ (рис. 4В) [5].

Стоит отметить, что влияние вторичной проницаемости на общую проницаемость различных стратиграфических подразделений является изменчивым. Например, в случае комплекса пород фундамента предполагается наличие кавернозно-трещинного резервуара, для которого вторичная проницаемость сопоставима с полной проницаемостью. При оценке эффективной проницаемости эоцена — позднеолигоценового машигарско-даехурийского комплекса, обладающего трещинно-поровым резервуаром, влияние вторичной проницаемости преобладает, что делает участки с высокими значениями вторичной

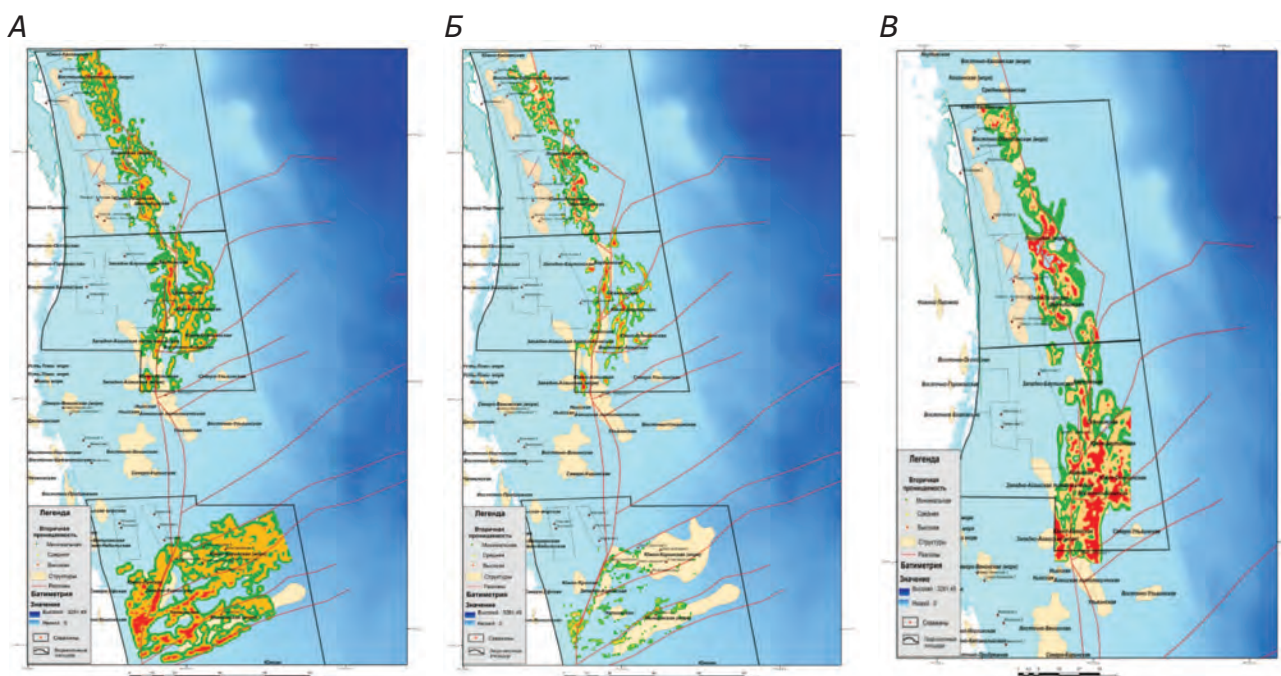


Рис. 4. Схема вторичной проницаемости даехурийского горизонта (А), дагинского комплекса ОГ-6 (Б), верхненутувовского подкомплекса ОГ 2 (В) Аяшского, Киринского ЛУ [7]

Fig. 4. Scheme of secondary permeability of the Daekhurinsky horizon (A), Daginsky complex OG-6 (B), Verkhnenutovsky subcomplex OG 2 (C) of the Ayashsky, Kirinsky and East Odoptinsky license areas [7]

проницаемости перспективными для поиска месторождений углеводородов.

В залегающих выше отложениях ранне-средне-миоценового комплекса, также обладающего трещинно-поровым коллектором, вклад вторичной проницаемости уменьшается. Для преимущественно терригенных отложений верхнего миоцена-плиоцена, обладающих поровым резервуаром,

роль вторичной проницаемости существенно ниже, однако ее все же следует учитывать. Выявленная вторичная проницаемость может значительно дополнить информацию о фильтрационных характеристиках коллектора. Все расчеты проводятся на трехмерной геологической модели, что позволяет использовать полученные данные для гидродинамического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астафьев Д.А., Кабалин М.Ю., Скоробогатов В.А. Оценка и освоение углеводородного потенциала недр Охотоморской провинции // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2021. № 3. С. 161—177.
2. Бакулина Л.П. Фациальный анализ. Построение и анализ стратиграфической карты. Ухта: УГТУ, 2008. 32 с.
3. Гереш Г.М. Роль доразведки в процессе эксплуатационного разбуривания месторождений шельфа о. Сахалин // Научно-технический сборник «Вести газовой науки». 2020. № 3. С. 32—39.
4. Керимов В.Ю., Шилов Г.Я., Серикова У.С. Геологические риски при поисках и разведке месторождений нефти и газа и пути их снижения // Нефть, газ и бизнес. 2014. № 8. С. 44—52.
5. Никитенко О.А., Ершов В.В. Гидрогеохимические критерии поиска и разработки углеводородных месторождений: обзор, анализ и перспективы использования на острове Сахалин // Геосистемы переходных зон. 2021. № 4. С. 361—377.
6. Ступакова А.В., Суслова А.А., Книппер А.А., Карньюшина Е.Е., Крылов О.В., Шелков Е.С., Коротков С.Б., Карнауков С.М., Осипова О.Н. Особенности геологического строения и нефтегазоносности шельфов дальневосточных морей // Георесурсы. 2021. № 2. С. 26—34.
7. Шатыров А.К. Оценка геомеханических свойств коллекторов Присахалинского шельфа по результатам моделирования // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. Т. 65. № 6. С. 53—65.
8. Kerimov V.Yu., Lavrenova E.A., Shcherbina Yu.V., Mamedov R.A. Cretaceous-cenozoic hydrocarbon systems of the eastern arctic seas // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Science and Technology Conference "Earth Science". Great Britain: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 032016.
9. Kerimov V.Yu., Rachinsky M., Mustaev R., Serikova U. Geothermal conditions of hydrocarbon formation in the South Caspian basin // Iranian Journal of Earth Sciences. 2018. No. 10. P. 78—89.
10. Mofei Du, Jianshe Lei, Dapeng Zhao. New seismic constraints on arc magmatism and subduction dynamics beneath the Japan Islands from Sn tomography // Journal of Asian Earth Sciences. 2023. Vol. 256. P. 105802.
11. Shegai V.I., Tolstikov A.V. Upper miocene and pliocene deposits of north-eastern shelf of Sakhalin Island: new seismic data on structure and petroleum potential // Geology of oil and gas. 2022. No. 3. P. 67—83.
12. Volkova P.A., Tikhomirov N.P., Bobrov A.A., Ivanova M.O., Dadykin I.A., Grigoryan M.Y., Kopylov-Guskov Y.O. Unexpected burst of new data on vascular plants flora for the lesser Kuril ridge and the whole Kuril archipelago // Journal of asia-pacific biodiversity. 2020. pp. 738—744.
13. Zhi-Xin Guo, Yuan-Peng Shi, Yong-Tai Yang, Shuan-Qi Jiang, Lin-Bo Li, Zhi-Gang Zhao. Inversion of the Erlian Basin (NE China) in the early Late Cretaceous: Implications for the collision of the Okhotomorsk Block with East Asia // Journal of Asian Earth Sciences. 2018. Vol. 154. P. 49—66.

REFERENCES

1. Astafyev D.A., Kabalin M.Yu., Skorobogatov V.A. Assessment and development of the hydrocarbon potential of the subsoil of the Okhotsk province // Scientific and technical collection of gas science news. 2021. No3. P. 161—177 (In Russian).
2. Bakulina L.P. Facial analysis. Construction and analysis of a stratigraphic map. Ukhta: UGTU, 2008. 32 p. (In Russian).
3. Geresh G.M. The role of additional exploration in the process of operational drilling of offshore fields Sakhalin // Scientific and technical collection of the news of gas science. 2020. No3. P. 32—39 (In Russian).
4. Kerimov V.Yu., Shilov G.Yu., Serikova U.S. Geological risks in the search and exploration of oil and gas fields and ways to reduce them // Oil, Gas and Business. 2014. No. 8. P. 44—52 (In Russian).
5. Nikitenko O.A., Ershov V.V. Hydrogeochemical criteria for the search and development of hydrocarbon deposits: review, analysis and prospects for use on Sakhalin Island // Geosystems of transition zones. 2021. No. 4. P. 361—377 (In Russian).
6. Stupakova A.V., Suslova A.A., Knipper A.A., Karnyushina E.E., Krylov O.V., Shelkov E.S., Korotkov S.B., Karnaukhov S.M., Osipova O.N. Features of the

- geological structure and oil and gas potential of the shelves of the Far Eastern seas // *Georesources*. 2021. No. 2. P. 26—34 (In Russian).
7. Shatyrov A.K. Assessment of the geomechanical properties of reservoirs of the Prisakhly shelf based on the results of modeling // *News of higher educational institutions. Geology and exploration*. 2023. Vol. 65. No. 6. P. 53—65 (In Russian).
 8. Kerimov V.Yu., Lavrenova E.A., Shcherbina Yu.V., Mamadov R.A. Cretaceous-cenozoic hydrocarbon systems of the seas of the eastern arctic // *IOP conference series: Earth and Environment Science. International Scientific and Technical Conference "Earth Science"*. Great Britain: IOP Publishing Ltd, 2022. P. 032016.
 9. Kerimov V.Yu., Rachinsky M., Mustaev R., Serikova U. Geothermal conditions of hydrocarbon formation in the South Caspian basin // *Iranian Journal of Earth Sciences*. 2018. No. 10. P. 78—89.
 10. Mofei Du, Jianshe Lei, Dapeng Zhao. New seismic constraints on arc magmatism and subduction dynamics beneath the Japan Islands from Sn tomography // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2023. Vol. 256. P. 105802.
 11. Shegai V.I., Tolstikov A.V. Upper miocene and pliocene deposits of north-eastern shelf of Sakhalin Island: new seismic data on structure and petroleum potential // *Geology of oil and gas*. 2022. No. 3. P. 67—83.
 12. Volkova P.A., Tikhomirov N.P., Bobrov A.A., Ivanova M.O., Dadykin I.A., Grigoryan M.Y., Kopylov-Guskov Y.O. Unexpected burst of new data on vascular plants flora for the lesser Kuril ridge and the whole Kuril archipelago // *Journal of asia-pacific biodiversity*. 2020. pp. 738—744.
 13. Zhi-Xin Guo, Yuan-Peng Shi, Yong-Tai Yang, Shuan-Qi Jiang, Lin-Bo Li, Zhi-Gang Zhao. Inversion of the Erlian Basin (NE China) in the early Late Cretaceous: Implications for the collision of the Okhotomorsk Block with East Asia // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2018. Vol. 154. P. 49—66.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Керимов В.Ю. — разработал концепцию статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Потемкин Г.Н. — внес вклад в работу при построении геомеханической модели Киринского лицензионного участка и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Шатыров А.К. — внес вклад в работу при построении и моделировании распространения зон трещиноватости и вторичной проницаемости горизонтов и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Vagif Y. Kerimov — developed the concept of the article, 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.

Grigory N. Potemkin — contributed to the work in building the geomechanical model of the Kirinskiy license area and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Anar K. Shatyrov — contributed to the work in the construction and modeling of fracture zone propagation and secondary permeability of horizons and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Керимов Вагиф Юнусович — доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный геолог РФ, заведующий кафедрой геологии и разведки месторождений углеводородов ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: kerimovvy@mgri.ru
тел.: +7 (495) 461-37-77, доб. 21-12
SPIN-код: 9696-1364
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-8208>

Vagif Y. Kerimov — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Professor, Honored Geologist of the Russian Federation, Head of the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: kerimovvy@mgri.ru
tel.: +7 (495) 461-37-77, ext. 21-12
SPIN code: 9696-1364
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-8208>

Потемкин Григорий Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, заместитель генерального директора по геологии ООО «ИПНЭ»; доцент ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

13а, ул. Ярославская, г. Москва 129366, Россия

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

тел.: +7 (926) 612-37-77

SPIN-код: 4229-0832

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7178-1286>

Шатыров Анар Камандарович* — инженер лаборатории «Моделирование углеводородных систем» ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: anar.shatyrov@mail.ru

тел.: +7 (926) 142-77-63

SPIN-код: 5794-0287

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-5325>

Grigory N. Potemkin — Cand.Sci. (Geol.-Min.), Deputy General Director for Geology at IPNE LLC, Associate Professor at Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

13a, Yaroslavskaya str., Moscow 129366; Russia

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

tel.: +7 (926) 612-37-77

SPIN-code: 4229-0832

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7178-1286>

Anar K. Shatyrov* — engineer of the Laboratory “Modeling of Hydrocarbon Systems” of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: anar.shatyrov@mail.ru

tel.: +7 (926) 142-77-63

SPIN-code: 5794-0287

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-5325>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОСАДОЧНОГО ЧЕХЛА СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ЗАМЫКАНИЯ ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА В СВЯЗИ С ОЦЕНКОЙ ПЕРСПЕКТИВ НЕФТЕГАЗОНОСНОСТИ

А.М. ВЫСОКОЛЯН*, Д.А. ПАВЁЛКИНА, Е.А. ЛАВРЕНОВА, А.К. ШАТЫРОВ

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Несмотря на существенный в последнее время прирост геолого-геофизических данных, а также на установленную нефтегазоносность осадочного разреза, значительных открытий углеводородов в пределах северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба пока нет. Это обусловлено слабым пониманием истории развития бассейна, а также протекающих в нем процессов нефтегазообразования и нефтегазонакопления. В связи с этим возникает необходимость обобщения и анализа накопленной геолого-геофизической и геохимической информации в рамках комплексного бассейнового анализа и пересмотра текущих геологических моделей.

Цель. Изучение эволюции осадочных бассейнов северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины, актуализация геологической модели осадочного чехла как основы для анализа генерационно-аккумуляционных углеводородных систем.

Материалы и методы. Сбор, приведение к единым форматам опубликованной и содержащейся в фондовых материалах информации с последующим формированием геоинформационной основы для проведения бассейнового анализа. Создание структурной цифровой модели Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины. Реконструкция условий формирования осадочного чехла, включая палеогеографические реконструкции основных осадочных комплексов.

Результаты. Реконструирована эволюция осадочных бассейнов и выделены ключевые стратиграфические интервалы развития углеводородных систем. Дан прогноз развития основных элементов углеводородных систем и сформирована основа для их дальнейшего численного моделирования и анализа геологических рисков.

Ключевые слова: Енисей-Хатангский прогиб, Анабаро-Хатангская седловина, осадочные бассейны, обстановки осадконакопления, элементы углеводородных систем

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № AAAA-A20-120092590017-4.

Для цитирования: Высоколян А.М., Павёлкина Д.А., Лавренова Е.А., Шатыров А.К. Условия формирования осадочного чехла северо-восточного замыкания Енисей-Хатангского прогиба в связи с оценкой перспектив нефтегазоносности. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):22—34. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-22-34>

Статья поступила в редакцию 13.05.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

DEPOSITIONAL ENVIRONMENTS OF THE NORTHEASTERN YENISEY-KHATANGA SEDIMENTARY COVER IN RELATION TO ASSESSMENT OF HYDROCARBON PROSPECTS

ANASTASIA M. VYSOKOLYAN*, DIANA A. PAVELKINA, ELENA A. LAVRENOVA, ANAR K. SHATYROV

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

ABSTRACT

Background. Although the recent years have seen a significant increase in the amount of geological and geophysical data on the oil and gas potential of the Yenisei-Khatanga trough, no notable hydrocarbon discoveries have been made within its northeastern part. This is primarily related to a lack of understanding of the development of sedimentary basins, along with the processes of oil and gas generation, migration, and accumulation. This determines the need to generalize and analyze the accumulated geological, geophysical, and geochemical data within the framework of a comprehensive basin analysis and revision of the existing geological models.

Aim. Elucidation of the evolution of sedimentary basins in the northeastern part of the Yenisei-Khatanga trough and the adjoining Anabar-Khatanga saddle; updating the geological model of the sedimentary cover for further assessment of hydrocarbon systems.

Materials and methods. Development of a numerical geologic model of the Yenisei-Khatanga trough and the adjoining Anabar-Khatanga saddle based on available publications and engineering reports. A basin analysis and paleogeographic reconstructions for the main time steps of sedimentary cover evolution.

Results. The evolution of the sedimentary basins under study has been reconstructed, and the main stratigraphic units in the development of hydrocarbon systems have been identified. Depositional environments supporting the development of the essential hydrocarbon system elements have been delineated for further hydrocarbon system modeling and geological risk assessment.

Keywords: Yenisei-Khatanga trough, Anabar-Khatanga saddle, sedimentary basins, sedimentation environments, hydrocarbon system elements

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.AAAA-A20-120092590017-4.

For citation: Vysokolyan A.M., Pavelkina D.A., Lavrenova E.A., Shatyrov A.K. Depositional environments of the northeastern Yenisey-Khatanga sedimentary cover in relation to assessment of hydrocarbon prospects. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):22—34. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-22-34>

Manuscript received 13 May 2024

Accepted 11 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Введение

Признаки нефтегазоносности разреза в пределах северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба и сопредельной Анабаро-Хатангской седловины установлены в широком стратиграфическом диапазоне от верхов палеозоя

до подошвы кайнозоя, что указывает на хорошие перспективы для поисков углеводородов. По оценке ГНЦ ФГУП «Южморгеология» в 2014 г., прогнозные ресурсы углеводородов этой территории составляют 5,5 млрд тонн УТ. При этом к настоящему времени в пределах этой территории

открыто 5 небольших месторождений с доказанной продуктивностью в пермских и среднеюрских отложениях: Балахнинское газовое месторождение, открытое в 1975 г., а также Южно-Тигянское, Кожевниковское, Ильинское и Нордвикское нефтяные месторождения, открытые в 1930—1940-е годы.

В период 50—90-х гг. прошлого столетия в пределах исследуемой территории проводились геолого-геофизические работы, по результатам которых установлены основные особенности ее геологического и тектонического строения и выполнены первые оценки перспектив нефтегазоносности. В последующие годы исследования проводились на отдельных участках, не затрагивая всю территорию, при этом комплексный анализ и обобщение накопившейся информации не проводились. В последние годы геолого-геофизическое изучение арктических районов Сибири, включая Енисей-Хатангский прогиб и Анабаро-Хатангскую седловину, возобновлено. Однако значительный прирост геолого-геофизической информации не обеспечил существенного увеличения запасов.

Текущие скромные успехи в поисках и разведке углеводородов обусловлены слабым пониманием условий формирования нефтегазоносности, включая функционирование генерационно-аккумуляционных систем, а также геологических рисков, связанных с сохранностью скоплений нефти и газа. Преодоление существующих проблем возможно за счет проведения комплексного системного анализа накопленной геолого-геофизической и геохимической информации с позиций концепции генерационно-аккумуляционных углеводородных систем (ГАУС).

Вопросы формирования отдельных комплексов осадочного чехла и развития осадочных бассейнов, включая тектонические аспекты их эволюции, рассматривались в рамках исследований А.Э. Конторовича (ИНГГ СО РАН, 2014), Т.А. Кирюхиной (ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2014), В.А. Конторовича [7—9], А.П. Афанасенкова [2, 3] и др. [4, 10, 12, 13]. Изучению геохимических свойств осадочных пород посвящены работы В.Б. Арчегова (ВНИГРИ, 1982), В.И. Петровой («ВНИИОкеанология им. И.С. Грамберга», 2000), Л.Б. Мейснера (ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2010), В.И. Савченко (ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2014), А.Э. Конторовича (ИНГГ СО РАН, 2014) и др. Однако системный анализ, фокусированный на анализе ГАУС, не выполнялся.

Целью настоящего исследования является обобщение накопленной геолого-геофизической

и геохимической информации, характеризующей северо-восточную часть Енисей-Хатангского прогиба и прилегающих территорий, в рамках комплексного бассейнового анализа, направленного на реконструкцию развития осадочных бассейнов и входящих в его состав углеводородных систем.

Характеристика объекта исследования

Объектом изучения является область, включающая северо-восточное замыкание Енисей-Хатангского регионального прогиба и Анабаро-Хатангскую седловину, которые расположены в пределах Северо-Сибирской низменности и входят в состав Красноярского края и Республики Саха (рис. 1). Граница административных районов проходит через Хатангский залив.

В геологическом строении изучаемой территории принимают участие породы различного возраста: предполагаются или установлены все системы фанерозоя. Фундаментом служат метаморфизованные комплексы архей-раннепротерозойского возраста, выходящие на дневную поверхность в районе Анабарского щита. Осадочный чехол и фундамент в различной степени изучены в разрезах глубоких скважин на правом берегу Хатангского залива, а также в северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба.

В тектоническом отношении Енисей-Хатангский региональный прогиб является крупной надпорядковой структурой, а Анабаро-Хатангская седловина — структурой первого порядка, отделяющей Енисей-Хатангский от Лено-Анабарского прогиба и структур моря Лаптевых. Прогиб расположен между Таймырской складчатой областью и Сибирской древней платформой. Его северная и южная границы проводятся по линии распространения юрско-меловых отложений, западная — определяется условно, по смене простираения структур Западно-Сибирской плиты, восточная — по резкому сокращению мощностей мезозойского комплекса отложений.

С точки зрения нефтегазогеологического районирования изучаемая территория располагается в пределах Пясинско-Балахнинской газонефтеносной и Анабаро-Хатангской нефтегазоносной областей, входящих в состав Енисейско-Анабарской газонефтеносной провинции.

Материалы и методы исследований

Фактическую основу для настоящего исследования составили опубликованные и фондовые геологические материалы, в результате

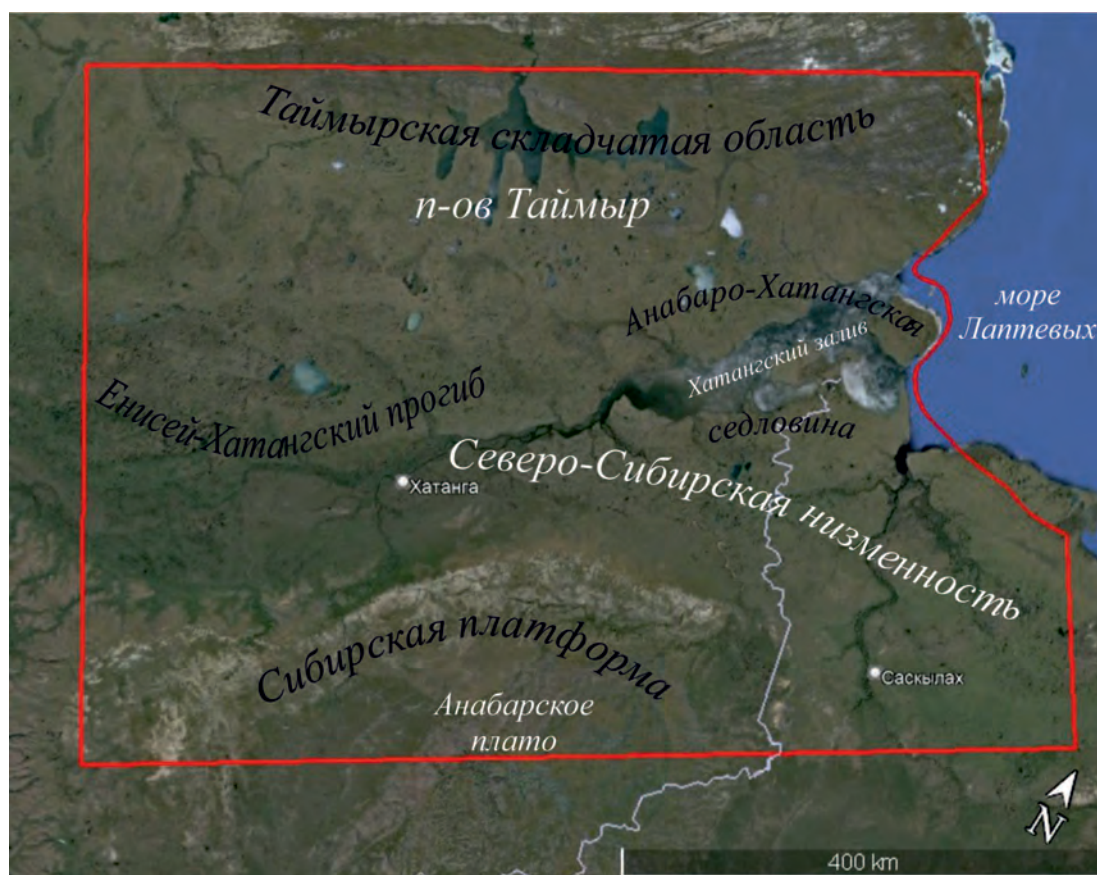


Рис. 1. Обзорная схема области исследования

Fig. 1. Geographic setting of the studied area

анализа и обобщения которых подготовлены базы данных: буровой изученности, стратиграфических отбивок, признаков нефтегазоносности и геохимических исследований. В состав баз данных включена информация о названии и географической привязке пунктов изучения осадочного разреза (скважин, обнажений), возрасте изученных отложений, наличии и типе флюида, геохимической характеристике осадочных пород и др.

В процессе подготовки структурных поверхностей основных несогласий выполнен сбор, анализ, приведение к единым форматам опубликованных и содержащихся в фондовых материалах структурных карт, их привязка и оцифровка. Контроль качества структурных построений осуществлялся с учетом данных государственной геологической карты: выходов на поверхность пород соответствующего возраста, областей отсутствия отложений, а также стратиграфических отбивок в скважинах.

Результаты структурных построений, а также собранные фактические данные о признаках нефтегазоносности, буровой изученности, геохимических характеристиках осадочных пород

и стратиграфических отбивках интегрированы в единую геоинформационную систему в составе проекта ПО QGIS.

Палеогеографические реконструкции выполнялись на основании анализа карт мощностей, результатов изучения пород в скважинах, включая РИГИС, с учетом опубликованных палеогеографических построений [1, 5, 11].

Результаты и обсуждение

Результаты выполненного обобщения показали, что признаки нефтегазоносности установлены в отложениях девона, перми, мезозоя в скважинах и обнажениях, а также в поверхностных осадках и природных источниках (рис. 2).

Стратиграфический диапазон нефтегазоносности расширяется в восточном направлении (рис. 2б и 3). Так, на территории северо-восточного замыкания Енисей-Хатангского прогиба проявления УВ зафиксированы в нижнем и среднем отделах юрской системы (ИНГГ СО РАН, 2014; ФГБУ «ВНИГНИ», 2022). В Анабаро-Хатангской седловине углеводороды обнаружены в отложениях

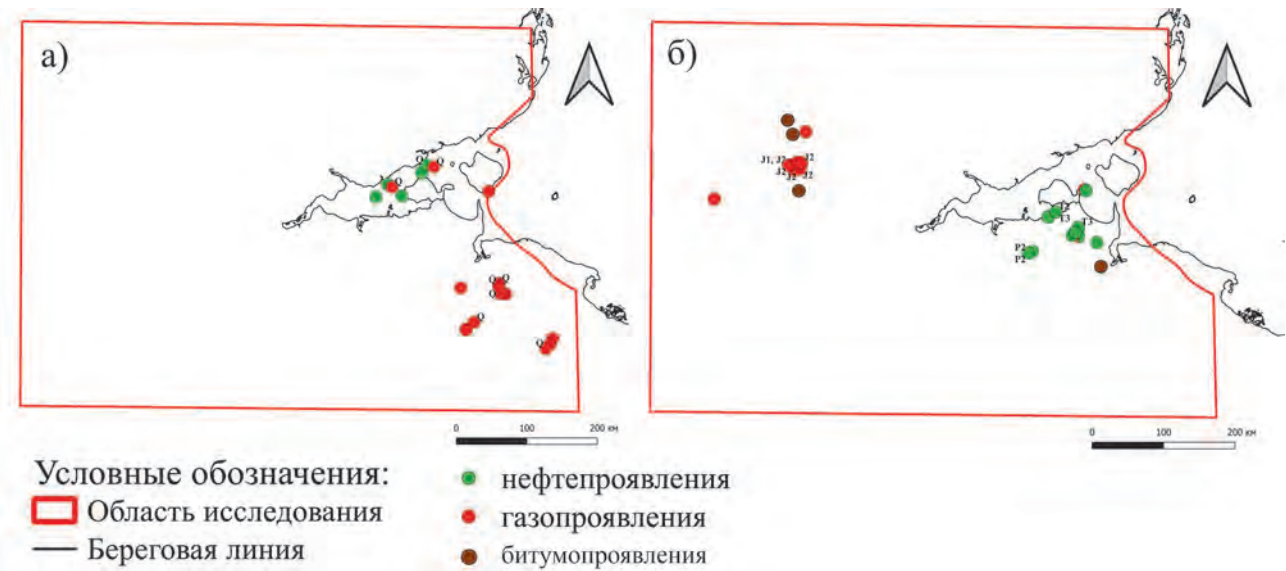


Рис. 2. Признаки нефтегазоносности осадочного разреза: а — в поверхностных осадках; б — в коренных отложениях. Буквами указан возраст вмещающих пород
Fig. 2. Signs of oil and gas potential of the sedimentary section: а — in surface sediments; б — in bedrock deposits. The letters indicate the age of the host rocks

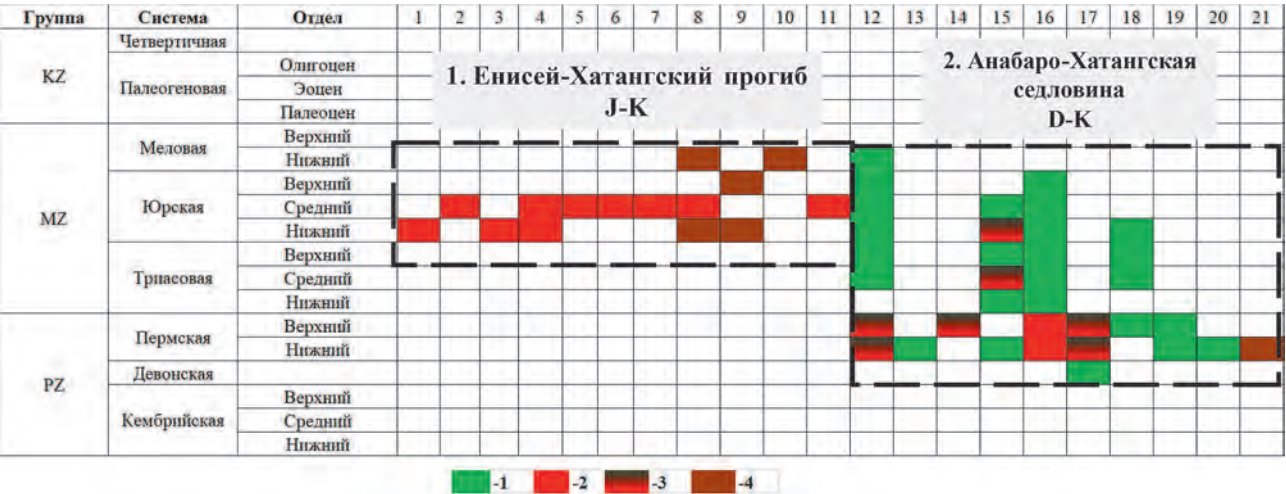


Рис. 3. Распределение углеводородов различного типа в коренных отложениях северо-восточного замыкания Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины
Тип флюида: 1 — нефть, 2 — газ, 3 — нефтегаз, 4 — битумы. Цифрами обозначены месторождения и нефтегазопроявления 1 — Балахинская 1, 2 — Балахинская 2, 3 — Балахинская 3, 4 — Балахинская 4, 5 — Балахинская 5, 6 — Балахинская 6, 7 — Восточно-Кубалахская 357, 8 — Кубалахская 1, 9 — Логатская 361, 10 — Массоновская 363, 11 — Новая 2, 12 — Южно-Тигянское, 13 — Южно-Тигянская-105-Р, 14 — Южно-Тигянская-1, 15 — Нордвикское, 16 — Чайдахская, 17 — Ильинская, 18 — Кожевниковская, 19 — Северо-Сулемская, 20 — Гуримисская, 21 — Восточная 1

Fig. 3. Distribution of hydrocarbons of various types in the bedrock deposits of the northeastern closure of the Yenisei-Khatanga trough and the Anabaro-Khatanga saddle
Fluid type: 1 — oil, 2 — gas, 3 — oil and gas, 4 — bitumen. The figures indicate deposits and oil and gas occurrences 1 — Balakhinskaya 1, 2 — Balakhinskaya 2, 3 — Balakhinskaya 3, 4 — Balakhinskaya 4, 5 — Balakhinskaya 5, 6 — Balakhinskaya 6, 7 — Vostochno-Kubalakhskaya 357, 8 — Kubalakhskaya 1, 9 — Logatskaya 361, 10 — Massonovskaya 363, 11 — New 2, 12 — Yuzhno-Tigyanskoye, 13 — Yuzhno-Tigyanskaya -105-R, 14 — Yuzhno-Tigyanskaya-1, 15 — Nordvikskoye, 16 — Chaidakhskaya, 17 — Ilyinskaya, 18 — Kozhevnikovskaya, 19 — Severo-Suolemskaya, 20 — Gurimisskaya, 21 — Vostochnaya 1

палеозоя (девон, пермь) и мезозоя (от триаса до нижнего мела) (ОАО «Севморнефтегеофизика», 2015; ИНГГ СО РАН, 2014).

В западной части изучаемой территории в составе флюида преобладает газ, в восточной — нефть. Битумопроявления установлены в северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба (скважины Логатская 361, Кубалахская 1 и Массоновская 363) [6], а также в юго-восточной части Анабаро-Хатангской седловины недалеко от Анабарской губы (скважина Восточная 1) (ОАО «МАГЭ», 2010).

Особенности вертикального и латерального распределения признаков нефтегазоносности позволяют предполагать в составе осадочного разреза изучаемой территории как минимум две ГАУС: в юрских отложениях северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба и в девонско-меловых Анабаро-Хатангской седловины. Проявления битума северо-восточной окраины Енисей-Хатангского прогиба, возможно, принадлежат самостоятельной ГАУС.

В соответствии с выполненными реконструкциями в процессе формирования осадочного чехла изучаемой территории выделены 7 крупных этапов: рифейский, вендско-кембрийский, ордовикско-каменноугольный, пермско-триасовый, юрский, раннемеловой и позднемеловой-кайнозойский.

Рифейские отложения распространены повсеместно за исключением Анабарского щита и представлены двумя толщами: терригенной и карбонатной. Основным источником сноса обломочного материала в бассейн являлись растущие поднятия Сибирской платформы. На большей части области исследования мощность отложений варьирует в пределах от 3 до 6 км, постепенно уменьшаясь в сторону Анабарского плато. Повышенными мощностями (от 6 до 13 км) характеризуются небольшие депоцентры, расположенные в пределах Анабаро-Хатангской седловины и северо-восточной части Таймырской складчатой области. Для рифейского этапа развития характерны в целом низкие (до 6 м/млн лет) скорости осадконакопления. В выделенных депоцентрах они достигают 12,5 м/млн лет (рис. 4а). На большей части территории в рифейское время существовали мелководно-морские условия осадконакопления. В пределах Анабаро-Хатангской седловины во впадинах были развиты относительно глубоководные обстановки (рис. 5а). Условия осадконакопления были благоприятны для формирования нефтегазоматеринских толщ (НГМТ).

Геохимические свойства пород изучены в скважинах Костроминская 1, Южно-Суолемская 10, Северо-Суолемская 1 и Хорудалахская 1 (ИНГГ СО РАН, 2014). Содержания $C_{орг}$ в отложениях рифея в основном не превышают 2,3%, однако в известковистом аргиллите билляхской свиты скважины Хорудалахская 1 на глубине 2867,5 м оно достигает 4,27%. Органическое вещество преобразовано до стадии $МК_4$ — $МК_5$, что определяет невысокие современные значения водородного индекса и генетического потенциала — до 51 мг УВ/г $C_{орг}$ и до 1,71 мг УВ/г породы соответственно. Учитывая, что изученные отложения формировались в мелководных условиях (рис. 5а), можно предполагать улучшение геохимических характеристик пород в более глубоководных обстановках. Отложения, обладающие коллекторскими свойствами, развивались на южном борту палеобассейна, что подтверждается результатами испытаний в скважинах Костроминская 1 и Северо-Суолемская 1, где из рифейских интервалов были получены притоки пластовой воды (ИНГГ СО РАН, 2014).

Вендско-кембрийские отложения выходят на поверхность на севере Сибирской платформы и представлены доломитами, известняками, аргиллитами, реже ангидритами. Мощность пород по сравнению с рифейскими существенно ниже — в основном до 3 км. Несколько небольших депоцентров с толщами отложений от 3 до 7 км расположены в северо-восточной части изучаемой территории — в районе Хатангского залива и Таймырской складчатой области. Скорости седиментации в основном не превышают 30 м/млн лет. В депоцентрах скорость осадконакопления изменяется от 27 до 50 м/млн лет, а в районе п-ова Юрюнг-Тумус она достигает 61 м/млн лет (рис. 4б). В венде-кембрии происходит обмеление бассейна, однако положение депоцентров в целом наследуется от рифейского этапа развития.

Обстановки осадконакопления способствовали формированию отложений с удовлетворительными нефтегазоматеринскими свойствами. В большинстве образцов содержание органического углерода не превышает 1,91%, за исключением вендского образца из обнажения р. Хорбусуонка и нижнекембрийского образца скважины Костроминская 1, где значения $C_{орг}$ составляют 4,19 и 3,14% соответственно. При современной зрелости пород на уровне $МК_4$ генетический потенциал составляет 1,76 мг УВ/г породы, а водородный индекс не превышает 200 мг УВ/г $C_{орг}$ (ИНГГ СО РАН, 2014).

Изученные геохимическими исследованиями интервалы вендско-кембрийских отложений развивались в литоральной обстановке (рис. 56). В сублиторальных условиях можно прогнозировать улучшение генерационных свойств, однако площадь распространения таких отложений ограничена несколькими впадинами, расположенными в пределах Хатангского залива. Отложения с хорошими коллекторскими свойствами могли формироваться в континентальных условиях на южной окраине бассейна. Так, в ходе испытаний скважин Северо-Суолемская 1 и Южно-Суолемская 10 в отложениях кембрия были получены притоки пластовой воды, при испытании скважины Хорудалахская 1 притоки были получены в венде (ИНГГ СО РАН, 2014).

Ордовикско-каменноугольные отложения вскрыты глубокими скважинами на правом берегу Хатангского залива и представлены терригенными и карбонатными отложениями в разных соотношениях. По сравнению с предыдущими этапами развития в ордовике происходит структурная перестройка территории и положение депоцентров меняется. На большей части области исследования мощность отложений изменяется от 1 до 2 км, уменьшаясь по направлению к Анабарскому плато. Повышенными мощностями характеризуются участки Южно-Таймырской складчатой зоны (от 3,5 до 7 км) и восточной части Енисей-Хатангского прогиба, где мощность достигает 11 км. Скорости осадконакопления сохраняются невысокими. В обособившихся депоцентрах в пределах Таймыра они достигают 40 м/млн лет, в Енисей-Хатангском прогибе — 59 м/млн лет (рис. 4в).

В палеогеографическом отношении осадочный бассейн на этом этапе развития становится более дифференцированным и углубленным (рис. 5в). Геохимические свойства пород, формировавшихся в мелководных условиях, изучены в глубоких скважинах на правом берегу Хатангского залива и в обнажении п-ова Юрунг-Тумус. Высокопреобразованные ($T_{\max} = 573\text{ }^{\circ}\text{C}$) девонские отложения характеризуются высокими значениями $C_{\text{орг}}$, достигающими 3,93%, и относительно низкими значениями генетического потенциала и водородного индекса, до 0,27 мг УВ/г породы и до 85 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$. Каменноугольные отложения, представленные аргиллитом, характеризуются невысокими значениями $C_{\text{орг}}$ — 0,62%, генетическим потенциалом до 0,25 мг УВ/г породы и водородным индексом до 31 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$, за исключением скважины Рыбинская 1, где за счет

прослоев угля содержание $C_{\text{орг}}$ достигает 11,92%. Органическое вещество незрелое: $T_{\max}$ составляет 365 $^{\circ}\text{C}$ (ИНГГ СО РАН, 2014).

По результатам интерпретации ГИС (РИГИС) наличие отложений с высоким содержанием органического вещества установлено в позднекаменноугольных отложениях скважин Гуримисская и Южно-Тигянская. Наличие коллекторов в описываемом интервале разреза подтверждается испытаниями в скважинах на площади Ильинская, где в девонских отложениях были получены притоки нефти (ОАО «Севморнефтегеофизика», 2015). В позднекаменноугольных отложениях скважин Южно-Тигянская, Улаханская и Восточная по данным РИГИС были установлено насыщение разреза углеводородами.

Пермско-триасовые породы, представленные терригенными и вулканогенными образованиями, присутствуют на большей части изучаемой территории, за исключением поднятий Сибирской платформы и Таймырского орогена. На рубеже перми и триаса в регионе происходят крупные тектонические события, сопровождаемые вулканической активностью и структурной перестройкой. Развивавшийся до этого времени обширный мелководный бассейн перестает существовать и трансформируется в узкий пролив между растущим горно-складчатым сооружением Таймыра и Сибирской платформой (рис. 5г). Следует отметить, что в это время северо-восточное замыкание Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангская седловина развивались как единый бассейн седиментации. Мощности осадков, формирующихся преимущественно в континентальных и прибрежно-морских условиях, не превышают 1 км. Увеличение мощностей отложений отмечается в северо-западной части изучаемой территории. В Енисей-Хатангском прогибе мощности превышают 3 км, достигая в самых погруженных частях 9,5 км. По сравнению с предыдущим этапом развития Енисей-Хатангский депоцентр, характеризующийся высокими (99 м/млн лет) скоростями осадконакопления, смещается в северо-восточном направлении. На остальной территории скорости осадконакопления не превышают 30 м/млн лет (рис. 4г).

Пермско-триасовые отложения, в которых проводились геохимические исследования, формировались в континентальных прибрежных и литоральных обстановках. По результатам анализа значения $C_{\text{орг}}$ в изученных образцах варьируют от 0,1 до 6,64%. При наличии углистых прослоев содержание органического углерода возрастает:

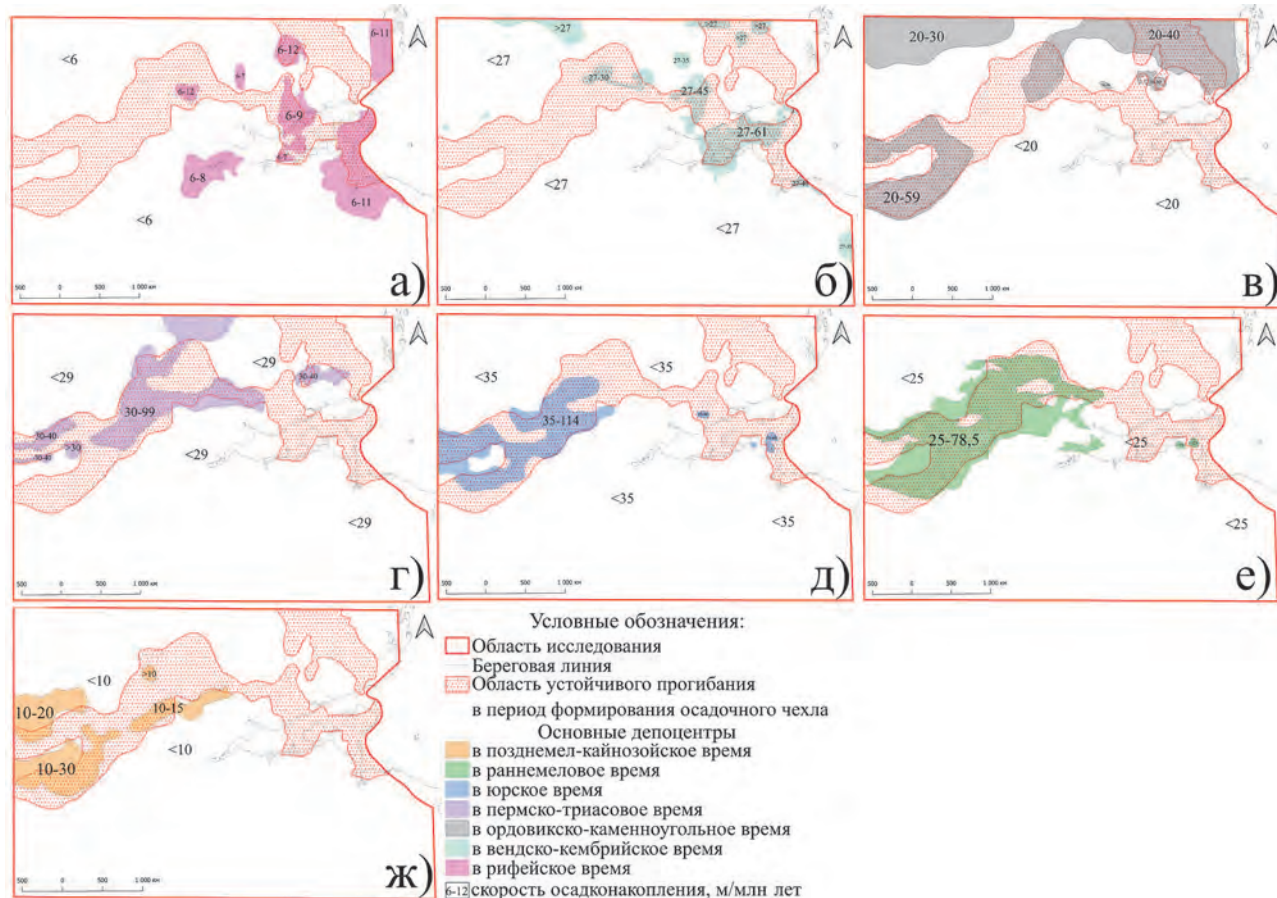


Рис. 4. Осадочные бассейны северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины: а — в рифее; б — в венде-кембри; в — в ордовике-карбоне; г — в перми-триасе; д — в юре; е — в раннем меле; ж — в позднем меле — кайнозое

Fig. 4. Sedimentary basins of the northeastern part of the Yenisei-Khatanga trough and the Anabaro-Khatanga saddle for the periods: а — Riphean; б — Vendian-Cambrian; в — Ordovician-Carboniferous; г — Permian-Triassic; д — Jurassic; е — Cretaceous; ж — Late Cretaceous-Cenozoic

углистый аргиллит с алевролитом нижнекожевниковской свиты в скважине Южно-Тиганская 10 содержит 9,42% C_{org} . Водородный индекс пород достаточно высокий — до 298 мг УВ/г C_{org} , генетический потенциал — до 5 мг УВ/г породы. Степень зрелости варьирует в пределах $МК_1$ — $МК_5$ (ИНГГ СО РАН, 2014).

Таким образом, пермские отложения, формировавшиеся в не очень благоприятных прибрежно-морских и мелководных условиях, характеризуются хорошим генерационным потенциалом. Породы, обладающие коллекторскими свойствами, установлены в отложениях нижней, средней перми, а также в триасе. В частности, при испытании глубоких скважин по всему пермско-триасовому разрезу были получены притоки нефти, газа и пластовой воды. В нижнепермских отложениях скважины Восточная 1 были

обнаружены битумопроявления (рис. 3). В нижне- и среднепермских отложениях скважин Южно-Тиганская, Улаханская и Гуримисская были установлены признаки нефти и газа по данным РИГИС. Промышленная нефтеносность установлена в скважинах Южно-Тиганская, Ильинская и Кожевниковская в нижней (нижнекожевниковская свита) и средней (верхнекожевниковская свита) перми, в скважине Нордвикская нефтеносность установлена как в нижней перми (тустахская и нижнекожевниковская свиты), так и в среднем триасе (ОАО «Севморнефтегеофизика», 2015; ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2016; ИНГГ СО РАН, 2014).

Юрские терригенные образования изучены в разрезах глубоких скважин на правобережье Хатангского залива и в восточной части Енисей-Хатангского прогиба. Относительно

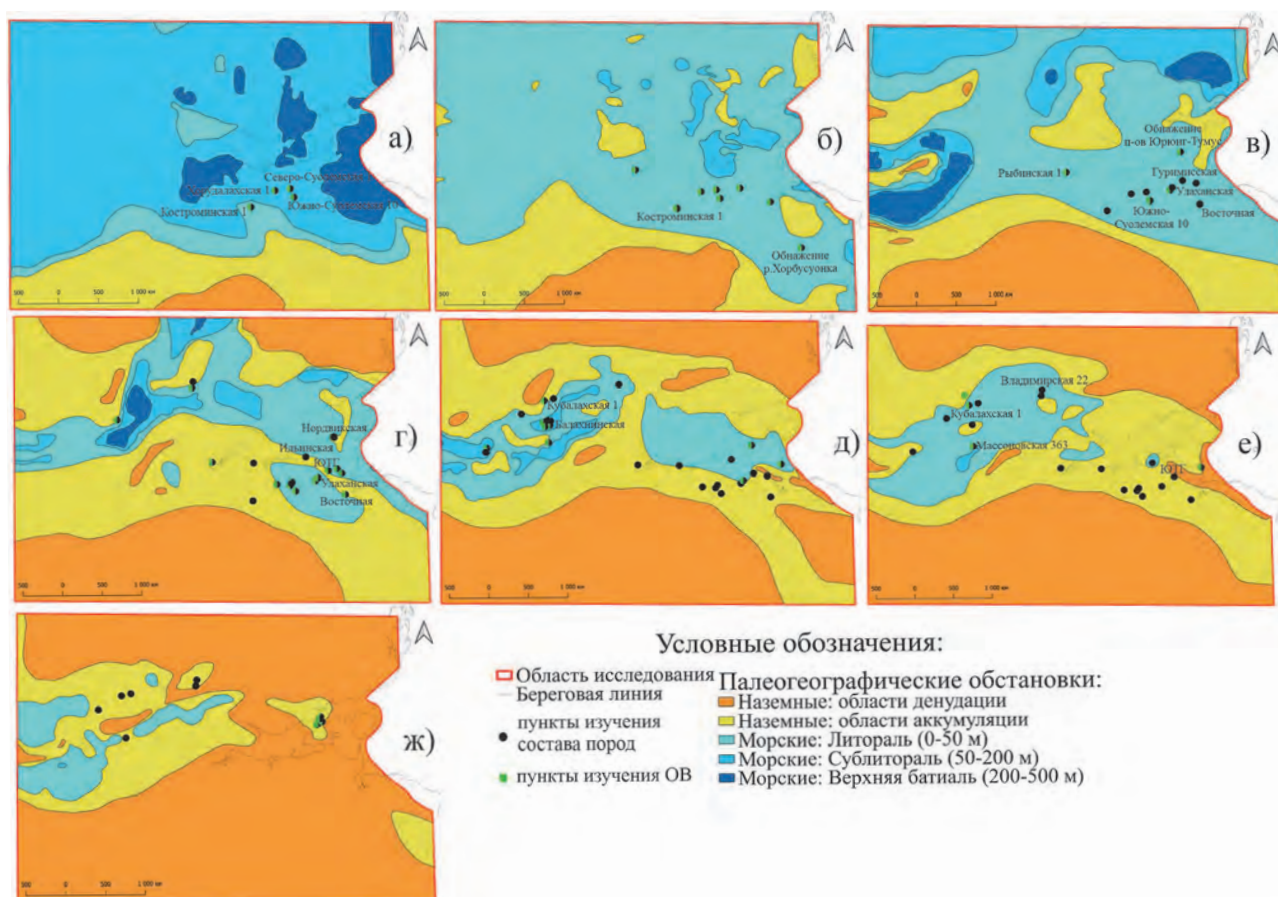


Рис. 5. Палеогеографические обстановки северо-восточной части Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины на периоды: а — рифея; б — венда-кембрия; в — ордовика-карбона; г — перми-триаса; д — юры; е — раннего мела; ж — позднего мела — кайнозоя

Fig. 5. Paleogeographic environments of the northeastern part of the Yenisei-Khatanga trough and the Anabaro-Khatanga saddle for the periods: а — Riphean; б — Vendian-Cambrian; в — Ordovician-Carboniferous; г — Permian-Triassic; д — Jurassic; е — Early Cretaceous; ж — Late Cretaceous-Cenozoic

повышенными мощностями (от 2 до 6,4 км) юрских отложений характеризуется северо-восточная часть Енисей-Хатангского прогиба. В пределах Анабаро-Хатангской седловины мощность осадков не превышает 1,5 км (рис. 4д). На территории Анабарского плато и Южно-Таймырской складчатой области юрские отложения не накапливались. В юре бассейн-пролив, существовавший на предыдущем этапе развития, разделяется на две впадины: Енисей-Хатангскую и Анабаро-Хатангскую, в которых сохраняются морские условия осадконакопления. Однако в последней погружение существенно замедляется, формирующееся аккомодационное пространство заполняется осадками, и в конце мезозоя и кайнозое бассейн прекращает свое существование. В Енисей-Хатангском бассейне (впадине) погружение и, как следствие, скорости седиментации

возрастают, достигая в самых погруженных частях 114 м/млн лет (рис. 4д).

В восточной части Енисей-Хатангского прогиба в относительно глубоководных обстановках существовали условия, благоприятные для развития НГМТ (рис. 5д). Юрские отложения характеризуются высокими значениями $S_{орг.}$, достигающими 5,65%, водородного индекса до 230 мг УВ/г $S_{орг.}$ и генетическим потенциалом до 11 мг УВ/г породы. Органическое вещество пород преобразовано до стадии ПК—МК₂ (ВНИГРИ, 1982; ИНГГ СО РАН, 2014). Наличие резервуарных толщ в составе юрских отложений подтверждается результатами испытаний глубоких скважин: притоки нефти, газа и пластовой воды зафиксированы по всему разрезу, а в скважинах на Балахнинской площади установлена промышленная газоносность в среднем отделе юрской системы (вымская

свита) (ОАО «Севморнефтегеофизика», 2015; ИНГГ СО РАН, 2014; ФГБУ «ВНИГНИ», 2022). В скважинах Логатская 361 и Кубалахская 1 были обнаружены битумопроявления [6] (рис. 3).

Раннемеловые терригенные отложения распространены в центральной части исследуемой территории; в Южно-Таймырской складчатой области и на территории Анабарского плато они отсутствуют. В начале мела Енисей-Хатангский бассейн продолжает существовать, однако скорости осадконакопления, по сравнению с юрским периодом развития, снижаются до 78,5 м/млн лет (рис. 4е). Мощность нижнемеловых образований не превышает 1 км на большей части территории, увеличиваясь до 3,5 км в Енисей-Хатангском депозентре. Области морского осадконакопления, благоприятные для формирования НГМТ, приурочены к Енисей-Хатангскому прогибу.

Изученные геохимическими исследованиями раннемеловые отложения формировались в переходной и литоральной обстановках. Они характеризуются хорошими геохимическими показателями: содержанием органического углерода до 4,1%, водородного индекса до 190 мг УВ/г $C_{орг}$, генетическим потенциалом до 6,21 мг УВ/г породы. Органическое вещество преобразовано до стадии $ПК-MK_1^1$ (рис. 5е) (ИНГГ СО РАН, 2014; ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2014). Резервуарные толщи могли формироваться на всей области распространения нижнемеловых отложений: коллекторы высокого качества — в континентальных условиях, низкого качества — в морских обстановках. При испытании глубоких скважин на площади Южно-Тигянская в нижнемеловых отложениях были получены притоки нефти, в скважинах Кубалахская 1 и Массоновская 363 были установлены битумопроявления (рис. 3) (ОАО «Севморнефтегеофизика», 2015) [6]. Также признаки нефтегазоносности были установлены по РИГИС в скважине Владимирская 22.

Позднемеловые-кайнозойские отложения в основном распространены в Енисей-Хатангском прогибе и представлены терригенными породами. Они характеризуются небольшими мощностями (до 3 км) и относительно низкими скоростями осадконакопления, достигающими в самых погруженных частях 30 м/млн лет (рис. 4ж). В конце мезозоя и в кайнозое Енисей-Хатангский бассейн постепенно заполняется осадками и перестает существовать как область погружения (рис. 4ж, 5ж). Осадконакопление происходило преимущественно в континентальных условиях, в центральной

части Енисей-Хатангского прогиба — в прибрежно-морских и мелководных (рис. 5ж). По результатам геохимических исследований поверхностных (четвертичных) отложений содержание органического углерода составляет 1—2% (ГНЦ ФГУП «Южморгеология», 2010; «ВНИИОкеанология им. И.С. Грамберга», 2000).

Заключение

Анализ карт мощностей основных стратиграфических комплексов позволил выделить депозентры осадконакопления на каждом этапе развития и установить две крупные области устойчивого прогибания в пределах изучаемой территории. Первая расположена в пределах восточной части Южно-Таймырской зоны складчатости и представлена в основном рифейским, вендско-кембрийским и ордовикско-каменноугольным осадочными комплексами. Вторая, наиболее протяженная, располагается в центральной части территории и включает территорию Енисей-Хатангского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины (Хатангский залив). При этом в силу различий формирования осадочного чехла в ней выделяются две области — Енисей-Хатангская и Анабаро-Хатангская. Погружение Анабаро-Хатангской области сопряжено с домезозойским периодом развития осадочного чехла, который представлен здесь преимущественно отложениями рифейского, вендско-кембрийского, ордовикско-каменноугольного и частично пермско-триасового комплексов. Енисей-Хатангская область испытала интенсивное погружение в конце палеозоя и в мезозое, поэтому осадочный чехол сложен преимущественно отложениями ордовикско-каменноугольного, пермско-триасового и юрского комплексов, а также включает образования раннемелового и позднемелового-кайнозойского возраста.

По результатам комплексного анализа признаков нефтегазоносности, результатов геохимических исследований, проведенных РИГИС, и палеогеографических реконструкций НГМТ прогнозируются в отложениях рифея кембрия, девона, нижнего отдела пермской системы, юры и нижнего мела. Хорошим генерационным потенциалом характеризуются потенциальные НГМТ перми, юры и мела. Резервуарные толщи прогнозируются в составе билляхской и муксунской свит рифейской системы, венда, среднего отдела кембрия, девона, верхнего отдела каменноугольной системы, нижнего и среднего отдела перми, средних отделов триаса и юры, нижнего отдела меловой системы.

Таким образом, в пределах изучаемой территории по количеству потенциальных НГМТ самостоятельные генерационно-аккумуляционные углеводородные системы прогнозируются на 6 стратиграфических уровнях: в рифейской, кембрийской, девонской, пермской, юрской и нижнемеловой частях осадочного разреза.

Полученные в рамках настоящего исследования результаты и сформированная геологическая модель являются основой для дальнейшего более углубленного изучения прогнозируемых углеводородных систем и оценки перспектив нефтегазоносности изучаемой территории методом численного бассейнового моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасенков А.П., Бордюг А.В., Никишин А.М., Танинская Н.В., Шиманский В.В., Бордунов С.И. Уточнение палеогеографии севера Сибирской платформы с учетом новых данных // Геология нефти и газа. 2018. №2. С. 5—23. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2018-2-5-23>
2. Афанасенков А.П., Никишин А.М., Унгер А.В., Бордунов С.И., Луговая О.В., Чикишев А.А., Яковичина Е.В. Тектоника и этапы геологической истории Енисей-Хатангского бассейна и сопряженного Таймырского орогена // Геотектоника. 2016. № 2. С. 23—42. <https://doi.org/10.7868/S0016853X16020028>
3. Афанасенков А.П., Обухов А.Н., Чикишев А.А., Шайдаков В.А., Бордюг А.В., Каламбаров С.Л. Тектоника северного обрамления Сибирской платформы по результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных // Геология нефти и газа. 2018. № 1. С. 7—27.
4. Бордюг А.В. Геологическое строение, этапы формирования и модель углеводородных систем в зоне сочленения Таймырского орогена, Западно-Сибирского и Енисей-Хатангского бассейнов: автореф. ... дис. канд. геол.-мин. наук. М., 2019. 23 с.
5. Захаров В.А., Ким Б.И., Рогов М.А. О возможном распространении верхнеюрских и нижнемеловых отложений на шельфе моря Лаптевых и перспективах их нефтегазоносности // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2013. № 5. С. 36—55. <https://doi.org/10.7868/S0869592X13050062>
6. Ким Н.С. Природа аллохтонных битумоидов из юрско-меловых отложений восточной части Енисей-Хатангского регионального прогиба // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2017. № 1. С. 116—119.
7. Конторович В.А., Калинина Л.М., Калинин А.Ю., Соловьёв М.В. Структурно-тектоническая характеристика и перспективы нефтегазоносности Анабаро-Хатангской седловины (Хатангский залив моря Лаптевых и прилегающие территории) // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2019. № 3. С. 1—18. https://doi.org/10.17353/2070-5379/24_2019
8. Конторович В.А., Конторович А.Э., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Лапковский В.В., Лунев Б.В., Моисеев С.А., Соловьёв С.А. Сейсмогеологическая и структурно-тектоническая характеристика континентальной окраины Сибирской платформы (Хатангско-Ленское междуречье) // Геология и геофизика. 2021. № 8. С. 1153—1171. <https://doi.org/10.15372/GiG2021122>
9. Конторович В.А., Филиппов Ю.Ф. Условия формирования и геологическое строение Енисей-Хатангского регионального прогиба // Геофизические технологии. 2021. № 4. С. 16—25. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2021-4-16>
10. Кусов А.В., Ступакова А.В. Коллекторские толщи Анабаро-Хатангской седловины: условия формирования и фильтрационно-емкостные свойства // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2013. № 3. С. 47—52.
11. Прокопьев А.В., Ершова В.Б., Миллер Э.Л., Худoley А.К. Раннекаменноугольная палеогеография северной части верховьянской пассивной окраины по данным U-Pb датирования обломочных цирконов: роль продуктов размыва Центрально-Азиатского и Таймыро-Североземельского складчатых поясов // Геология и геофизика. 2013. № 10. С. 1530—1542.
12. Сивкова Е.Д., Бабина Е.О., Ступакова А.В., Большакова М.А., Сауткин Р.С., Комков И.К., Мордасова А.В. Влияние структурных перестроек на нефтегазоносность восточной части Енисей-Хатангского прогиба // Георесурсы. 2022. № 2. С. 93—112. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.11>
13. Ушаков А.В. Строение и эволюция мезозойского осадочного бассейна восточной части Енисей-Хатангского и Лено-Анабарского прогибов: дис. магистр. СПб., 2016. 129 с.

REFERENCES

1. Afanasenkov A.P., Bordjug A.V., Nikishin A.M., Taninskaja N.V., Shimanskiy V.V., Bordunov S.I. Update of paleogeography of Siberian platform North accounting for new data // Geology of oil and gas. 2018. No.2. P. 5—23 (In Russian). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2018-2-5-23>
2. Afanasenkov A.P., Nikishin A.M., Unger A.V., Bordunov S.I., Lugovaja O.V., Chikishev A.A., Jakovichina E.V. The Tectonics and Stages of the Geological History of and Yenisei-Khatanga Basin and Conjugate Taimyr Orogen // Geotectonics. 2016. No. 2. P. 23—42 (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0016853X16020028>
3. Afanasenkov A.P., Obuhov A.N., Chikishev A.A.,

- Shajdakov V.A., Bordjug A.V., Kalamkarov S.L. Tectonic setting of the northern surroundings of the Siberian platform based on the integrated study of geological and geophysical data // *Geology of oil and gas*. 2018. No. 1. P. 7—27 (In Russian).
4. Bordjug A.V. Geological structure, stages of formation and model of hydrocarbon systems in the junction zone of the Taimyr orogen, West Siberian and Yenisei-Khatanga basins. Abstract of the dissertation of the Candidate of Geological Sciences. Moscow, 2019. 23 p. (In Russian).
 5. Zaharov V.A., Kim B.I., Rogov M.A. On the possible distribution of Upper Jurassic and Lower Cretaceous deposits on the Laptev Sea shelf and the prospects of their oil and gas potential // *Stratigraphy. Geological correlation*. 2013. No. 5. P. 36—55 (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0869592X13050062>
 6. Kim N.S. Nature of allochthonous bitumens from jurassic-cretaceous deposits in the eastern part of the Yenisei-Khatanga regional through // *Interexpo Geo-Siberia*. 2017. No. 1. P. 116—119 (In Russian).
 7. Kontorovich V.A., Kalinina L.M., Kalinin A.Ju., Solov'jov M.V. Structural features of petroleum bearing prospects belonging to Anabar-Khatanga saddle (Khatanga bay of the Laptev sea and adjacent territories) — eastern siberia // *Oil and gas geology. Theory and practice*. 2019. No. 3. P. 1—18 (In Russian). https://doi.org/10.17353/2070-5379/24_2019
 8. Kontorovich V.A., Kontorovich A.Je., Kalinin A.Ju., Kalinina L.M., Lapkovskij V.V., Lunev B.V., Moiseev S.A., Solov'ev S.A. Seismogeological and structural-tectonic characteristics of the continental margin of the Siberian platform (Khatanga-Lena interfluvium) // *Geology and Geophysics*. 2021. No. 8. P. 1153—1171 (In Russian). <https://doi.org/10.15372/GiG2021122>
 9. Kontorovich V.A., Filippov Yu.F. Formation conditions and geological structure of the Yenisei-Khatanga regional through // *Geophysical technologies*. 2021. No. 4. P. 16—25 (In Russian). <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2021-4-16>
 10. Kusov A.V., Stupakova A.V. Reservoir strata of the Anabar-Khatanga saddle: conditions of formation and filtration-capacitance properties // *Bulletin of the Moscow University. Series 4. Geology*. 2013. No.3. P. 47—52 (In Russian).
 11. Prokop'ev A.V., Ershova V.B., Miller Je.L., Hudolej A.K. Early carboniferous paleogeography of the northern Verkhoyansk passive margin as derived from U-Pb dating of detrital zircons: role of erosion products of the Central Asian and Taimyr-Severnaya zemlya fold belts // *Geology and Geophysics*. 2013. No. 10. P. 1530—1542 (In Russian).
 12. Sivkova E.D., Babina E.O., Stupakova A.V., Bol'shakova M.A., Sautkin R.S., Komkov I.K., Mordasova A.V. Structural reconstructions effect on oil and gas formation of the Yenisei-Khatanga trough eastern part // *Georesources*. 2022. No. 2. P. 93—112 (In Russian). <https://doi.org/10.18599/grs.2022.2.11>
 13. Ushakov A.V. Structure and evolution of the Mesozoic sedimentary basin of the eastern part of the Yenisei-Khatanga and Leno-Anabar bends. Dis. magister. St. Petersburg, 2016. 129 p. (In Russian).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Высоколян А.М. — внесла основной вклад при выполнении исследования (сбор материалов, формирование и анализ базы данных признаков нефтегазоносности, анализ базы данных геохимических исследований, создание структурной цифровой геологической модели, реконструкция условий формирования осадочного чехла, включая палеогеографические реконструкции, подготовка входных данных для моделирования), подготовила текст статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Павёлкина Д.А. — сформировала геоинформационную базу данных геохимических исследований и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Лавренова Е.А. — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Шатыров А.К. — занимался интерпретацией геофизических исследований в скважинах и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Anastasia M. Vysokolyan — made the main contribution to the research (collection of materials, formation and analysis of the database of signs of oil and gas potential, analysis of the database of geochemical studies, creation of a structural digital geological model, reconstruction of the conditions of sedimentary cover formation, including paleogeographic reconstructions, preparation of input data for modeling), prepared the text of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Diana A. Pavelkina — has formed a geoinformation database of geochemical research and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Elena A. Lavrenova — developed the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Anar K. Shatyrov — has been engaged in the interpretation of geophysical research in wells and accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Высоколян Анастасия Михайловна* — студентка 5-го курса 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: visokolyan09@mail.ru
тел.: +7 (988) 679-90-25
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4707-4439>

Anastasia M. Vysokolyan* — student of the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: visokolyan09@mail.ru
tel.: +7 (988) 679-90-25
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4707-4439>

Павёлкина Диана Андреевна — студентка 5-го курса 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: dianapavyolkina@yandex.ru
тел.: +7 (902) 987-64-04
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6934-0785>

Diana A. Pavelkina — student of the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: dianapavyolkina@yandex.ru
tel.: +7 (902) 987-64-04
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6934-0785>

Лавренова Елена Александровна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент 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: lavrenovaelena@mail.ru
тел.: +7 (903) 452-45-94
SPIN-код: 1859-8634
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3329-7424>

Elena A. Lavrenova — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Lecturer at the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: lavrenovaelena@mail.ru
tel.: +7 (903) 452-45-94
SPIN-code: 1859-8634
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3329-7424>

Шатыров Анар Камандарович — инженер лаборатории «Моделирование углеводородных систем» ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: anar.shatyrov@mail.ru
тел.: +7 (926) 142-77-63
SPIN-код: 5794-0287
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-5325>

Anar K. Shatyrov — engineer of the Laboratory “Modeling of Hydrocarbon Systems” of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: anar.shatyrov@mail.ru
tel.: +7 (926) 142-77-63
SPIN-code: 5794-0287
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-5325>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-35-48>
УДК 550.8.05, 550.849, 550.4.01



ОСАДОЧНЫЕ БАСЕЙНЫ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ ЛАПТЕВЫХ И СОПРЕДЕЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Д.А. ПАВЕЛКИНА*, А.М. ВЫСОКОЛЯН, Е.А. ЛАВРЕНОВА, А.К. ШАТЫРОВ

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

АННОТАЦИЯ

Введение. В разрезе осадочного чехла Лено-Анабарского прогиба и сопряженной с ним Анабаро-Хатангской седловины установлены признаки нефтегазоносности, что указывает на присутствие активных генерационно-аккумуляционных углеводородных систем (ГАУС). При этом интерес с позиции оценки перспектив нефтегазоносности представляет также акваториальная часть зоны сочленения Лаптевоморской плиты и Сибирской платформы, так как бассейны осадконакопления, включающие ГАУС, характеризуются трансграничным (суша/море) положением. До сих пор изучение перспектив нефтегазоносности территории проводилось отдельно для ее акваториальной и континентальной областей. Такой подход существенно снижает качество оценки углеводородного потенциала и определяет актуальность разработки единой региональной геологической модели зоны сочленения, которая послужит основой для проведения дальнейших нефтегазогеологических исследований.

Цель. Создание геологической модели, характеризующей развитие осадочных бассейнов зоны сочленения Лаптевоморской плиты и Сибирской платформы.

Материалы и методы. Сбор и анализ опубликованной и фондовой информации в рамках формирования геоинформационной базы данных геолого-геофизической и геохимической изученности осадочного разреза, разработка структурного каркаса геологической модели, выполнение палеогеографических реконструкций, выделение основных депоцентров осадконакопления и областей устойчивого прогибания, расчет скоростей осадконакопления основных осадочных комплексов.

Результаты. Сформирована единая геологическая модель зоны сочленения Лаптевоморской плиты и Сибирской платформы, изучено развитие осадочных бассейнов, подготовлена основа для выделения и картирования необходимых элементов ГАУС в разрезе осадочного чехла.

Ключевые слова: Лено-Анабарский прогиб, Анабаро-Хатангская седловина, Лаптевоморская плита, осадочные бассейны, углеводородные системы, нефтегазоматеринские толщи

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № АААА-А20-120092590017-4.

Для цитирования: Павёлкина Д.А., Высоколян А.М., Лавренова Е.А., Шатыров А.К. Осадочные бассейны юго-восточной части моря Лаптевых и сопредельной территории Сибирской платформы. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.* 2024;66(2):35—48.
<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-35-48>

Статья поступила в редакцию 13.05.2024

Принята к публикации 11.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

SEDIMENTARY BASINS IN THE SOUTHEASTERN PART OF THE LAPTEV SEA AND THE ADJACENT AREA OF THE SIBERIAN PLATFORM

DIANA A. PAVELKINA*, ANASTASIA M. VYSOKOLYAN, ELENA A. LAVRENOVA, ANAR K. SHATYROV

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

ABSTRACT

Background. The sedimentary cover of the Leno-Anabar trough and the adjacent Anabar-Khatanga saddle show signs of oil and gas bearing capacity, which indicates the presence of generation and accumulation hydrocarbon systems. In addition, the offshore area of the Laptev plate and the adjacent Siberian platform is promising in terms of oil and gas potential, since the sedimentary basins, including hydrocarbon systems, are characterized by a transboundary (onshore/offshore) position. Until now, the offshore and onshore parts of this area have been investigated separately. Such an approach significantly reduces the estimation accuracy of hydrocarbon potential. This determines the relevance of developing a unified regional geological model of the junction zone, which may serve as the basis for further oil and gas geological studies.

Aim. Construction of a geological model to trace the development of sedimentary basins within the junction area of the Laptev plate and the Siberian platform.

Materials and methods. Collection and analysis of published materials, as well as data from geological repositories related to geological, geophysical, and geochemical investigations of the sedimentary cover in the construction of a geoinformation database; development of a numerical geological model of the studied area; carrying out paleogeographic reconstructions with identification of the main depocenters and domains of consistent subsidence delineation; assessment of sedimentation rates of the main sedimentary complexes.

Results. A unified geological model of the junction area of the Laptev plate and the Siberian Platform was created, enabling investigation of the sedimentary basins and delineation of the essential hydrocarbon system elements.

Keywords: Leno-Anabar trough, Anabar-Khatanga saddle, Laptev plate, sedimentary basins, hydrocarbon systems, source rock

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. AAAA-A20-120092590017-4.

For citation: Pavelkina D.A., Vysokolyan A.M., Lavrenova E.A., Shatyrov A.K. Sedimentary basins in the southeastern part of the Laptev sea and the adjacent area of the Siberian platform. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):35—48. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-35-48>

Manuscript received 13 May 2024

Accepted 11 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Введение

Геологическое строение зоны сочленения Лаптевоморской плиты и Сибирской платформы в связи с вопросами нефтегазоносности изучалось многими исследователями: И.С. Грам-

бергом (1976), В.А. Виноградовым (1976), Н.К. Евдокимовой (2008), Н.М. Ивановой, С.Б. Секретовым (1989), В.И. Кимом (2007—2016), Д.В. Лазуркиным (2002), К.Б. Мокшанцевым, Ю.Е. Погребницким, А.Ф. Сафроновым (2013),

Н.В. Черским, Н.А. Малышевым (2009), Т.А. Андиевой, С.С. Драчевым (1999, 2000), Г.А. Заварзиной, С.И. Шкарубо (2011), Е.А. Васильевой (2015), И.Д. Поляковой, Г.Ч. Борукаевым (2016), М.Б. Скворцовым (2020) и др. На начальных этапах изучения широкое распространение получила гипотеза о существовании в западной и центральной областях шельфа моря Лаптевых блока Сибирской платформы, отделенной от нее инверсионной Оленекской зоной [2, 3]. По мере получения новой сейсмической информации возникло предположение о повсеместном, за исключением Хатангского залива, развитии складчатого фундамента, образованного в позднемезозойское время [4, 14]. При этом у авторов, поддерживающих эту гипотезу, представления о возрасте пород основания осадочного чехла существенно различаются и варьируют: от раннего мела (Ю.В. Горячев 1999) до верхов палеоцена по мнению Д. Франке и других [15]. До настоящего времени многие вопросы геологического строения зоны сочленения Сибирской платформы и моря Лаптевых остаются нерешенными.

Оценку перспектив нефтегазоносности Лено-Анабарского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины выполняли В.Б. Арчegov (1982), О.В. Ушакова (1996), Э.В. Шипилов (1999), В.С. Старосельцев (2012), А.С. Горшков (2012), В.И. Савченко (2012, 2014), А.Э. Конторович (2013, 2014), В.А. Конторович (2013, 2019), С.В. Прокопцева (2014), А.М. Фомин (2014), И.Д. Полякова, Г.Ч. Борукаев (2016), С.В. Фролов (2017), Е.А. Бакай (2017), П.Н. Соболев (2019, 2021), Д.С. Лежнин (2019, 2021), А.П. Афанасенков (2021) и др. В качестве перспективных для поисков углеводородов (УВ) на территории Лено-Анабарского прогиба рассматриваются рифейские, вендские, кембрийские и пермские отложения. Эти же комплексы отнесены к нефтегазоносным в Анабаро-Хатангской седловине, где значительный углеводородный потенциал прогнозируется также в девонских, каменноугольных и триасовых комплексах [6—10]. При этом И.Д. Полякова и Г.Ч. Борукаев (2016) прогнозируют высокий риск сохранности залежей в Анабаро-Ленском районе в связи с длительным перерывом в осадконакоплении в ордовикско-каменноугольное время [10].

Трудности, возникающие при формировании представлений о геологическом строении Лаптевоморской плиты, в основном обусловлены ее недостаточной изученностью и, в частности, отсутствием бурения на акватории, что в итоге не позволяет выполнить надежный прогноз неф-

тегазоносности Лаптевоморского шельфа [11]. Учитывая тесную связь истории геологического развития тектонических структур акватории и сопредельных территорий Сибирской платформы, эффективную оценку перспектив южной части моря Лаптевых возможно провести путем вовлечения в анализ данных по прилегающей континентальной области. При этом, как показали результаты проведенного обобщения, исследований, базирующихся на одновременной глубокой проработке геологических материалов по акватории и сопредельной суше, практически нет, что определяет актуальность создания единой региональной геологической модели зоны сочленения, которая послужит основой для проведения дальнейших нефтегазогеологических исследований. При этом в последние годы получен большой объем сейсмических данных как в пределах южной части акватории, так и на сопредельной суше (Хатангско-Ленский регион), где в период с 2008 по 2015 г. было отработано 7060 пог. км сейсморазведки 2D [8]. Подготовка единой модели с привлечением новой геологической информации улучшит понимание особенностей эволюции осадочных бассейнов и ГАУС, а также обеспечит проведение нефтегазогеологического прогноза области исследования на качественно новом уровне.

Характеристика объекта исследования

Объектом изучения является зона сочленения юго-западной части Лаптевоморской плиты с Лено-Анабарским прогибом и восточной частью Анабаро-Хатангской седловины, принадлежащими Сибирской древней платформе (рис. 1). Район работ включает юго-западную часть моря Лаптевых и сопредельную область суши, административно относящуюся к территории Республики Саха (Якутия).

Примыкающий к акватории участок суши является северо-восточным окончанием Северо-Сибирской низменности, протягивающейся от Енисея до Лены. Рельеф суши образуют невысокие плосковерхние гряды, возвышающиеся над широкими, сильно заболоченными понижениями рельефа, с большим количеством термокарстовых озер. Повсеместно распространены многолетнемерзлые породы.

Тектонические элементы континентальной области района исследований представлены Сибирской платформой (в составе Лено-Анабарского прогиба, примыкающего к восточному окончанию Анабаро-Хатангской седловины), которая отделена от шельфовых структур моря Лаптевых

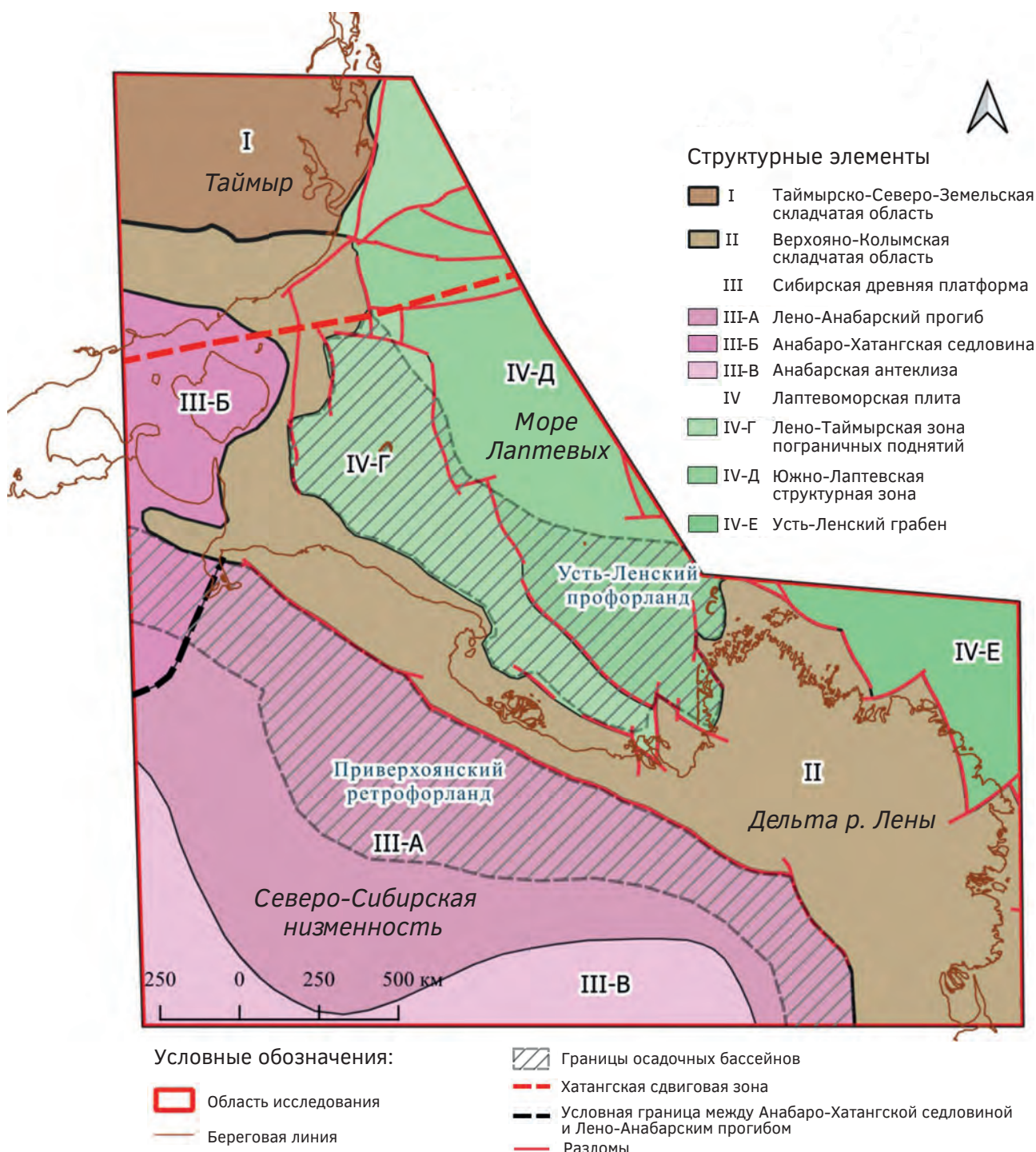


Рис. 1. Обзорная схема района работ (по Г.А. Заварзиной, 2023 г., с изменениями)

Fig. 1. Regional setting of the studied area (according to G.A. Zavarzina, 2023, with changes)

Верхояно-Колымской складчатой областью, а также Лено-Таймырской областью пограничных поднятий, протягивающейся от дельты р. Лены до Хатангского разлома и сопредельной с ней Южно-Лаптевской структурной зоной (рис. 1).

На материковом обрамлении фундамент сложен архейско-нижнепротерозойскими метаморфизованными стратифицированными и плутоническими комплексами. В строении осадочного чехла принимают участие отложения широкого

стратиграфического диапазона — от рифея до кайнозоя. На территории Лено-Анабарского прогиба почти полностью отсутствуют ордовикско-силурийские отложения (за исключением Усть-Оленекской структуры), а также, вследствие длительного перерыва и сопровождающего его размыва, девонские и каменноугольные отложения. В Анабаро-Хатангской седловине отсутствуют ордовикско-силурийские отложения. Осадочный чехол Лено-Таймырской области пограничных поднятий предположительно включает отложения аптско-верхнемелового возраста мощностью до 2,5 км и осадочные образования кайнозоя — до 1,5—3 км. В грабенах подошва осадочного чехла опускается до глубин 5 км. На поднятиях породы апта, верхнего мела и палеоцена последовательно выклиниваются, налегая на поверхность складчатого основания, а палеоцена и миоцена — срезаются доплиоценовым несогласием. В составе складчатого основания предполагается присутствие дислоцированных верхнепалеозойских, триасовых и юрско-нижнемеловых (доаптских) толщ. Южно-Лаптевская структурная зона характеризуется контрастным резко расчлененным рельефом складчатого основания с глубинами от 3 до 14 км, значительной мощностью аптско-верхнемеловых отложений, достигающих 5,5 км (по материалам работ В.Ю. Керимова, Р.Н. Мустаева, Е.А. Лавреновой, Г.А. Заварзиной и др., 2023 г.).

С точки зрения нефтегазогеологического районирования Хатангско-Ленский регион входит в состав Енисейско-Анабарской нефтегазоносной провинции (в составе Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области и Лено-Анабарской перспективно нефтегазоносной области), а рассматриваемый участок моря Лаптевых выделяется в качестве Лаптевоморской самостоятельной перспективно нефтегазоносной области.

Материалы и методы исследования

Исходными данными для настоящего исследования послужили опубликованные и фондовые геологические материалы, а также геологические карты и разрезы, предоставляемые электронным ресурсом ФГБУ «ВСЕГЕИ».

В рамках выполнения бассейнового анализа сформирована геоинформационная база данных, включающая данные о признаках нефтегазоносности разреза, возрасте отложений, интервалах залегания, литологическом составе отложений, а также результаты геофизических исследований в скважинах и геохимических исследований образцов пород.

При подготовке единых структурных поверхностей в пределах исследуемой территории опубликованные и содержащиеся в фондовых источниках карты анализировались, приводились к единым форматам и согласовывались с имеющимися скважинными отбивками. В результате были построены структурные карты по следующим отражающим горизонтам: R (в подошве рифейских отложений), VIII (в кровле кембрийских отложений), VII (в подошве пермских отложений), III (в подошве юрских отложений) — для прибрежной части рассматриваемой территории; A (в подошве аптского яруса нижнемеловых отложений), mBU (в подошве палеогеновых отложений), UB (в подошве олигоценных отложений), RU (в подошве неогеновых отложений) — для акваториальной части. При формировании гридов структурного каркаса цифровой модели учитывались области отсутствия отложений и выходы на дневную поверхность, согласованные с геологическими картами листов S-49, S-50, S-51, S-52.

При проведении палеогеографических реконструкций выполнялся анализ карт мощностей основных стратиграфических комплексов, а также согласование их с результатами изучения кернового и шламового материалов, интерпретация геофизических исследований в скважинах по специальной методике, позволяющей проследить смену осадочных трендов в процессе формирования осадочного чехла.

На основании анализа карт мощностей были выделены депоцентры осадконакопления для прослеживания эволюции осадочных бассейнов, установлены области устойчивого прогибания и рассчитаны скорости осадконакопления основных осадочных комплексов, что в совокупности с выполненными палеогеографическими реконструкциями, анализом признаков нефтегазоносности и результатов геохимических исследований дает основание прогнозировать элементы углеводородных систем в разрезе осадочного чехла территории.

Результаты и обсуждение

Структурный каркас разработанной региональной модели включает 9 слоев (осадочных комплексов), ограниченных основными поверхностями несогласий: протерозойский (F-R), рифейско-кембрийский (R-VIII), ордовикско-каменноугольный (VIII-VII), пермско-триасовый (VII-III), юрско-барремский (III-A), аптско-верхнемеловой (A-mBU), палеоцен-эоценовый (mBU-UB), олигоценный (UB-RU), неоген-четвертичный (RU-рельеф).

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

Анализ собранных баз данных показал, что на исследуемой территории присутствуют как прямые, так и косвенные признаки нефтегазоносности. В результате работ, проводимых ОАО «Севморнефтегеофизика», ГНЦ ФГУП «Южморгеология» и ИНГГ СО РАН, ОАО «МАГЭ», ГУП ИИЦ «Саханефтегаз», ВНИГРИ, в континентальной части области исследования были выявлены нефте-, газо- и битумопроявления в вендской, кембрийской, пермской, триасовой и юрской частях разреза, а также зафиксированы 9 спонтанных выходов газа в долинах рек Анабар и Уэле. Кроме того, в 2014 году по данным гидрогазосъемки, проведенной ГНЦ ФГУП «Южморгеология», на шельфе моря Лаптевых было установлено 5 естественных выходов УВ-газов, проинтерпретированных как миграционные, указывающие на присутствие УВ в недрах (рис. 2). Помимо прямых признаков нефтегазоносности, по результатам исследований, выполненных ГНЦ ФГУП «Южморгеология» в 2014 г., установлены также косвенные признаки присутствия УВ в осадочном разрезе:

сейсмические аномалии, выявляемые по результатам AVO-анализа.

Анализ особенностей вертикального и латерального распределения УВ и типа флюида проявлений позволяет прогнозировать как минимум две самостоятельные ГАУС. Одна из них располагается в пределах Анабаро-Хатангской седловины и охватывает верхнепалеозойско-мезозойскую часть разреза. При этом нельзя исключать, что мезозойские проявления УВ могут принадлежать ГАУС с очагом в Енисей-Хатангском прогибе, примыкающем к седловине с запада. Вторая предполагаемая ГАУС, включающая отложения протерозоя-палеозоя, расположена в Лено-Анабарском прогибе (рис. 3). Для первой характерны проявления газа и нефти (с преобладанием последних). На территории Лено-Анабарского прогиба установлены битумы и газопроявления. Скважины Восточная и Улахан-Юряхская хоть и относятся к разным тектоническим элементам, располагаются, по-видимому, в зоне аккумуляции, принадлежащей обеим ГАУС. Битумы, обнаруженные в скважине Восточной, вероятно, связаны с ГАУС

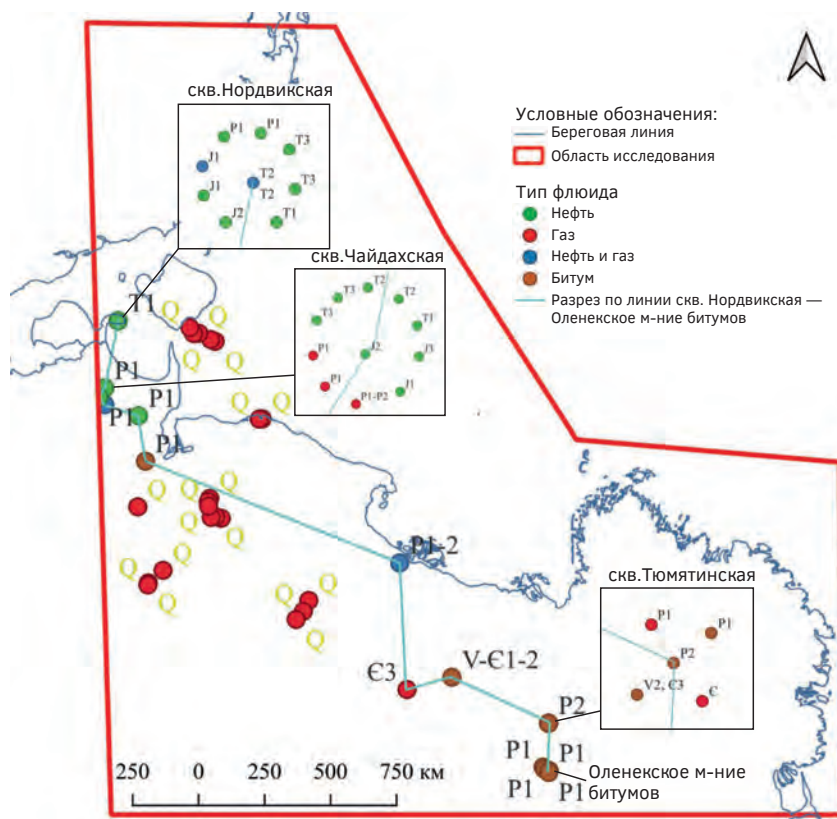


Рис. 2. Распределение типа флюида выявленных скоплений и проявлений. Буквами указан возраст отложений, содержащих УВ

Fig. 2. Spatial distribution of the hydrocarbon shows in the sedimentary cover. Letter indicates age of deposits containing hydrocarbons

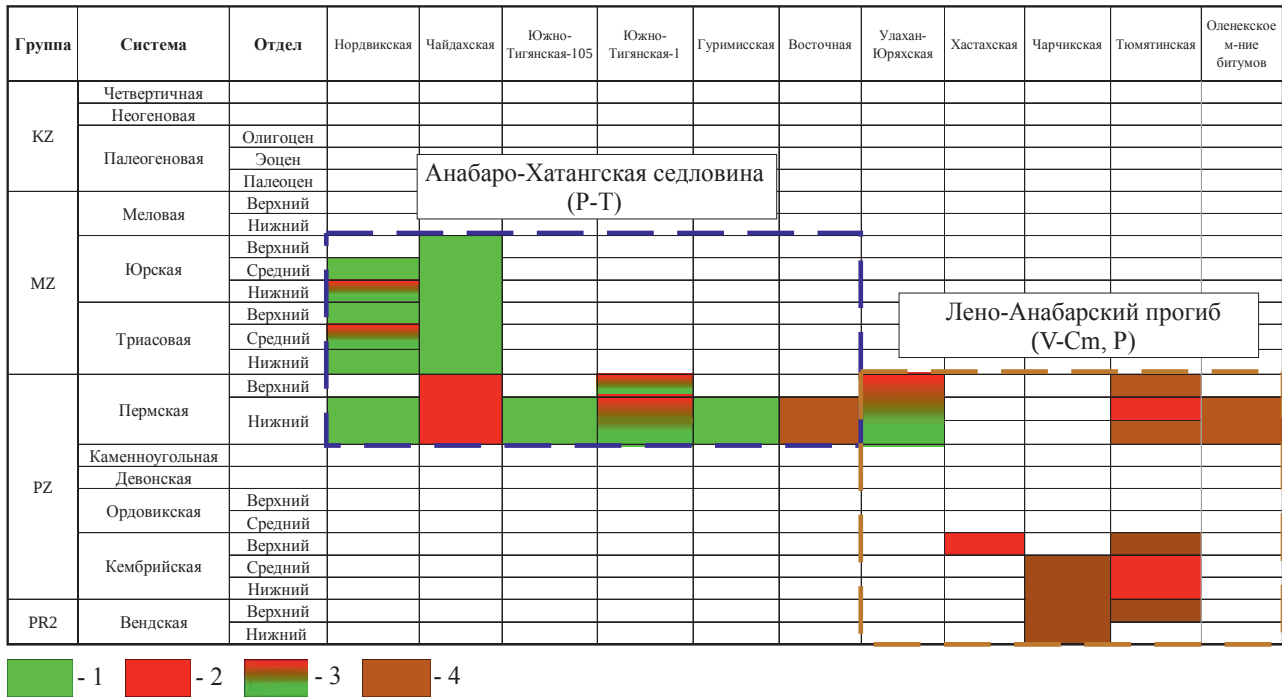


Рис. 3. Распределение УВ различного типа в коренных отложениях по линии разреза скв. Нордвикская-Оленекское месторождение битумов (положение разреза показано на рисунке 2). Условные обозначения: 1 — нефть, 2 — газ, 3 — нефть и газ, 4 — битум

Fig. 3. Vertical distribution of hydrocarbons in the sedimentary cover along the line Nordvikskaya well — Olenekskeye field (for line location see fig. 2). Symbols: 1 — oil, 2 — gas, 3 — oil and gas, 4 — bitumen

Лено-Анабрского прогиба, а нефть и газ Улахан-Юряхской скважины, скорее всего, мигрировали из Анабаро-Хатанской седловины.

Рифейско-кембрийский комплекс включает рифейские преимущественно терригенные отложения с прослоями доломитов и известняков; вендские и кембрийские отложения, представленные в основном карбонатными формациями [7—9]. По результатам проведенного анализа в рифейско-кембрийском интервале осадочного чехла выделены крупные депоцентры осадконакопления в южной части изучаемой территории (рис. 4А), а также серия небольших изолированных депоцентров в северной части, расположенных в пределах шельфа моря Лаптевых. Указанные области повышенных мощностей (более 3000 м) характеризуются низкими (от 3 до 9 м/млн лет) скоростями осадконакопления. Отложения формировались в относительно глубоководных обстановках, благоприятных для формирования НГМТ (рис. 5А). Нефтегазоматеринские свойства развитых в этих обстановках аргиллитов и глинистых известняков изучены в скважинах Усть-Оленекская и Хастахская, а также в породах из обнажения близ р. Хорбусуонка (ГНЦ ФГУП «Южморгеология» и ИНГГ

СО РАН, 2014). Измеренные значения содержания органического углерода рифейских отложений, вскрытых скважинами Усть-Оленекская-2370 и Хастахская-930, составляют 0,78 и 1,72% соответственно; современный генерационный потенциал — от 0,02 (скв. Усть-Оленекская-2370) до 1,57 (скв. Хастахская-930) мг УВ/г породы. В образце глинистого известняка вендского возраста, отобранного из обнажения р. Хорбусуонка, содержание органического углерода достигает 4,19%, генерационный потенциал составляет 16,5 мг УВ/г породы, а водородный индекс — 381 мг УВ/г $C_{орг}$. Наблюдается улучшение качества органического вещества рифейско-вендских отложений в южном направлении, от прибрежно-морских условий осадконакопления (скв. Усть-Оленекская) к относительно глубоководным (скв. Хастахская и обнажение р. Хорбусуонка). Зрелость пород рифейско-кембрийского комплекса в пределах изучаемой территории варьирует от стадий $МК_2$ до $АК$ [1, 9, 12, 13]. В связи с преобладанием карбонатных отложений в составе рифейско-кембрийского комплекса резервуарные толщи можно прогнозировать в верхнерифейской части разреза,

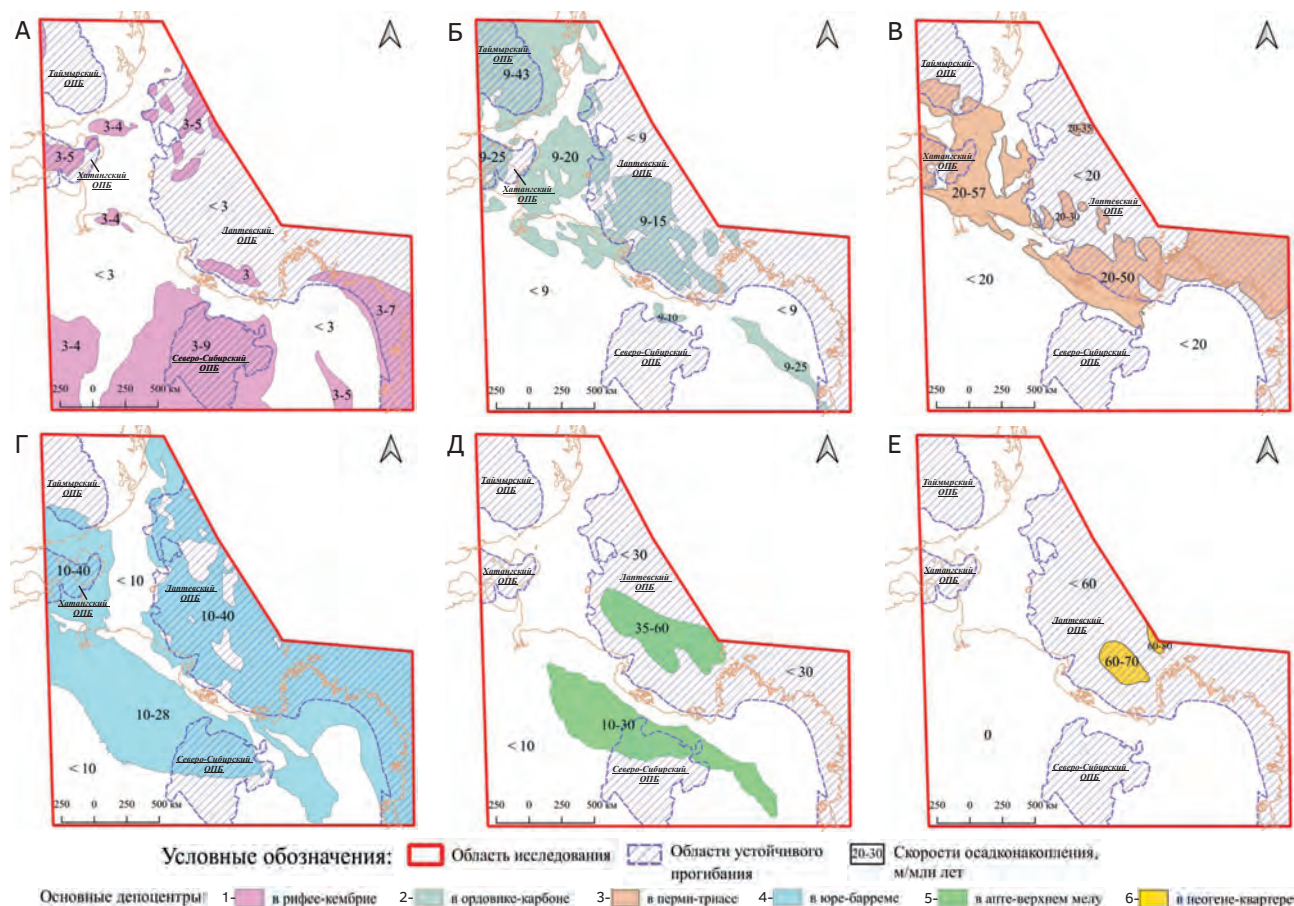


Рис. 4. Схема расположения разновозрастных депоцентров осадконакопления и областей устойчивого прогибания зоны сочленения Сибирской платформы и Лаптевоморской плиты

Fig. 4. Location of the main depocenters and domains of consistent subsidence within junction of the Laptev plate and Siberian platform

сложной преимущественно песчаниками и алевролитами. Также коллекторскими свойствами могут обладать вендско-кембрийские карвернозные и трещинные доломиты и известняки, что подтверждается выявленными в этих отложениях битумо- и газопроявлениями, а также притоками пластовой воды [6, 9]. В пределах области исследования распространение резервуарных толщ предполагается в континентальных и относительно мелководных обстановках осадконакопления.

Ордовикско-каменноугольный комплекс характеризуется крайне неоднородным составом. В пределах Лено-Анабарского прогиба отложения комплекса распространены лишь в северной его части и представлены конгломератами и известняками с прослоями песчаников средне-позднеордовикского возраста. Девонско-каменноугольные отложения обнажаются на п-ве Юрюнг-Тумус в Анабаро-Хатангской седловине, а также в юго-западной части п-ва Таймыр, где

представлены преимущественно карбонатными формациями, местами с прослоями аргиллитов. Каменноугольные отложения (в составе нерасчлененной средне-позднекаменноугольно-раннепермской толщи) распространены практически на всей территории Анабаро-Хатангской седловины и представлены чередующимися аргиллитами, алевролитами, песчаниками [7–9].

По результатам анализа карты толщин ордовикско-каменноугольного комплекса выделена серия неглубоких депоцентров, ограниченных изолинией 1550 м, протягивающихся от дельты р. Лены к Хатангскому заливу. Максимальные мощности (до 8000 м) отмечены в депоцентре, расположенном в районе Таймыра. Скорости осадконакопления в основных депоцентрах варьируют от 9 до 25 м/млн лет, а в наиболее глубоких — до 43 м/млн лет (рис. 4Б). В ордовикско-каменноугольный период на изучаемой территории преобладали континентальные обстановки

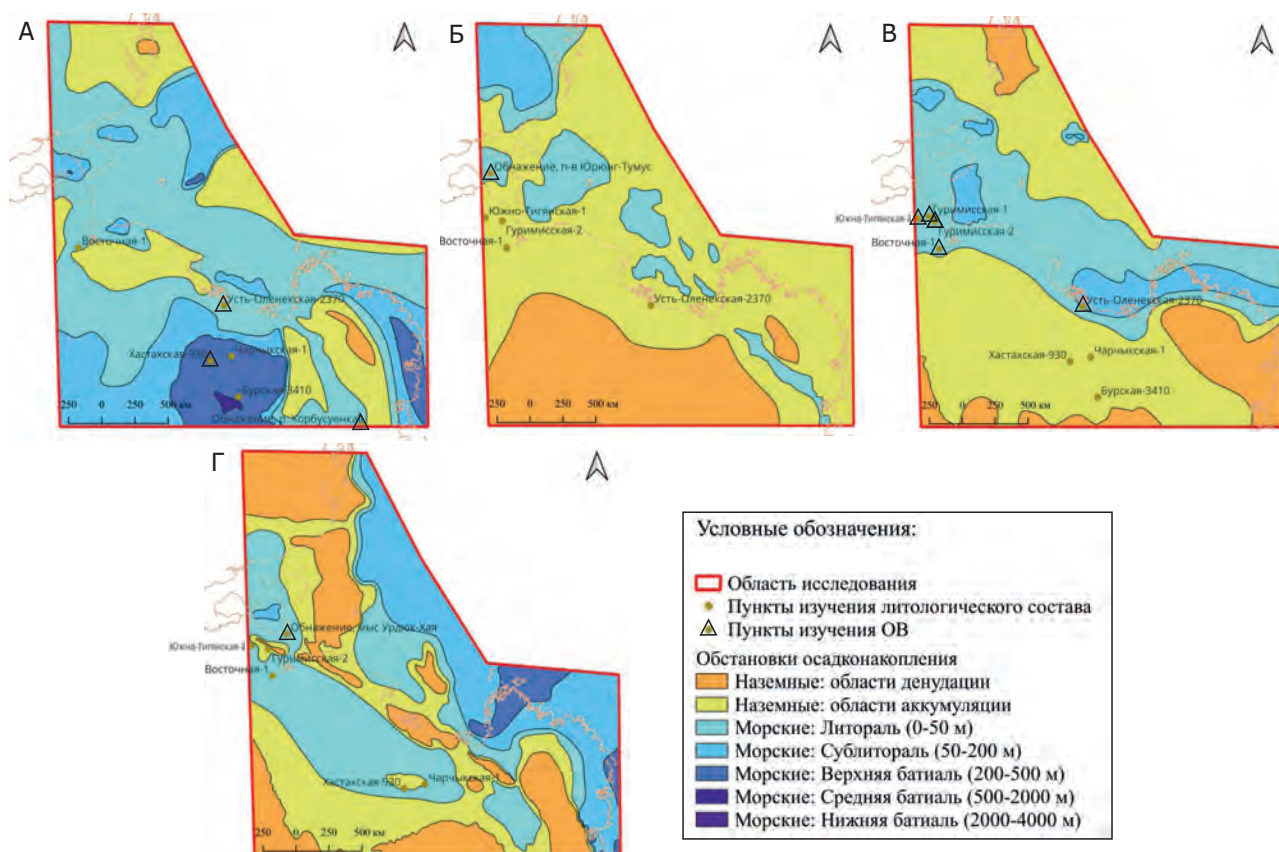


Рис. 5. Палеогеографические реконструкции на периоды: А — рифея-кембрия; Б — ордовика-карбона; В — перми-триаса; Г — юры — раннего мела

Fig. 5. Paleogeography of southeastern part of the Laptev Sea and the adjacent territory of the Siberian Platform. Timespans: А — Mezoproterozoic-Cambrian; Б — Ordovician-Carboniferous; В — Permian-Triassic; Г — Jurassic-Early Cretaceous

осадконакопления, наиболее благоприятными областями для формирования НГМТ являлись небольшие морские относительно мелководные бассейны, распространенные на территории современного Хатангского залива, п-ве Таймыр, акватории моря Лаптевых и дельте р. Лены (рис. 5Б). Изученные в этих обстановках девонские отложения характеризуются хорошими нефтегазоматеринскими свойствами. Так, в образце известняка, отобранного с обнажения на п-ве Юрюнг-Тумус, содержание органического углерода достигает 3,93%, генерационный потенциал на современном этапе — до 0,27 мг УВ/г породы, водородный индекс — до 85 мг УВ/г $C_{орг}$ (по материалам ГНЦ ФГУГП «Южморгеология» и ИНГГ СО РАН, 2014 г.). При этом органическое вещество сильно перезревшее (T_{max} достигает 573 °C), что указывает на истощенность НГМТ, а также позволяет предполагать ее хороший начальный генерационный потенциал. Формирование терригенных резервуарных толщ

предполагается в континентальных обстановках — в зоне аккумулятивной равнины.

Пермско-триасовый комплекс на изучаемой территории повсеместно сложен чередующимися песчаниками, алевролитами и аргиллитами [7—9]. На рубеже перми и триаса площадь неглубокого морского бассейна, протягивающегося от современной дельты р. Лены на запад к Хатангскому заливу, увеличивается по сравнению с предыдущим этапом развития (рис. 4В), а скорости седиментации возрастают. В областях повышенных мощностей скорости осадконакопления достигают 57 м/млн лет. Мощность накопившихся осадков варьирует от 1800 до 5800 км. Пермские отложения, формировавшиеся в морских обстановках (рис. 5В), по данным ГНЦ ФГУГП «Южморгеология» и ИНГГ СО РАН (2014), характеризуются высокими содержаниями органического углерода. В достаточно зрелом ($МК_3$ — $МК_4$) образце глинистого алевролита тустакской свиты ранней перми из скважины Усть-Оленекская

содержание органического углерода достигает 6,81%, значение водородного индекса — 64 мг УВ/г $C_{орг}$, генерационный потенциал — около 5 мг УВ/г породы.

Отложения тустахской и нижнекожевниковской свит, сформированные в более мелководных, прибрежных обстановках осадконакопления, изучены на территории Анабаро-Хатангской седловины, в скважинах Южно-Тигянская-1, Гуримисская-1, Гуримисская-2 и Восточная-1. Вскрытые скважинами аргиллиты и алевроито-аргиллиты характеризуются пониженным (в сравнении с образцом, отобранном в скважине Усть-Оленекская) содержанием органического углерода — до 3%. Среднее значение водородного индекса в изученных образцах варьирует от 15 до 92 мг УВ/г $C_{орг}$; генетический потенциал изменяется от 0,2 до 3,4 мг УВ/г породы.

Преобразованность органического вещества в отложениях тустахской свиты соответствует стадиям $МК_3$ — $МК_4$, в нижнекожевниковской — $МК_1$ — $МК_2$. Отложения верхнекожевниковской свиты поздней перми в пределах области исследования изучены в скважинах Гуримисская-2 на территории Анабаро-Хатангской седловины и Усть-Оленекская-2370 в районе Лено-Анабарского прогиба. Породы представлены аргиллитами и глинистыми алевролитами. Содержание органического углерода в них составляет 3,69% (скв. Усть-Оленекская) и 2,16% (скв. Гуримисская), водородный индекс достигает 76 мг УВ/г $C_{орг}$, генетический потенциал в среднем составляет 0,5 — 1 мг УВ/г породы, в скважине Усть-Оленекская достигает 3,1 мг УВ/г породы. Органическое вещество на территории Лено-Анабарского прогиба преобразовано до стадии $МК_3$ — $МК_4$, в Анабаро-Хатангской седловине — $МК_1$ [1, 9, 12, 13].

Породы, обладающие коллекторскими свойствами, формировались в условиях прибрежной аккумулятивной равнины. Они вскрыты скважинами Хастахская, Чарчикская и Бурская и характеризуются значительным увеличением количества песчаных прослоев в пермском разрезе. Триасовые отложения, вскрытые скважинами Южно-Тигянская-1, Гуримисская-1, Гуримисская-2 и Восточная-1, характеризующими прибрежно-морские условия осадконакопления, представлены песчаниками. Кроме этого, многочисленные признаки нефтегазоносности в пермско-триасовых отложениях, а также небольшие Нордвикское, Чайдахское, Южно-Тигянское и Оленекское месторождения указывают на активные миграционные процессы [5, 6, 9].

В составе отложений **юрско-барремского комплекса** наблюдается неравномерное переслаивание алевролитов, аргиллитов и песчаников [7]. Разрез нижнемеловых отложений этого комплекса (бериасс-баррем), вскрытый скважинами Хастахская и Чарчикская, отличается наличием пропластков угля и преобладанием песчаных и алевроитовых фаций, что указывает на континентальные обстановки осадконакопления на территории Лено-Анабарского прогиба. В конце юры в связи с присоединением к Сибирской древней платформе с севера Колымско-Омолыйского террейна начинается орогенез в Верхоянье (по материалам работ В.Ю. Керимова, Р.Н. Мустаева, Е.А. Лавреновой, Г.А. Заварзиной и др., 2023 г.). На фоне тектонической перестройки существовавший ранее единый бассейн седиментации фрагментируется и по обе стороны от орогена начинают формироваться прогибы (Приверхоянский ретрофорланд и Усть-Ленский профорланд) (рис. 1, 4Г). Крупные депоцентры, соответствующие форландам, характеризуются относительно небольшими (600—3000 м) толщинами осадочных образований. Скорости осадконакопления варьируют от 10 до 40 м/млн лет.

Обстановки осадконакопления предполагают весьма благоприятные условия для формирования НГМТ в этом возрастном интервале разреза. Так, на большей части территории распространены прибрежно-морские обстановки накопления осадков с углублением бассейна в сторону современной акватории моря Лаптевых (рис. 5Г). В условиях литорали накапливались отложения, нефтегазоматеринские свойства которых изучены в обнажении на мысе Урдюк-Хая. Верхнеюрские аргиллиты характеризуются высоким содержанием (от 0,87 до 5,65%) органического углерода, водородного индекса (от 10 до 277 мг УВ/г $C_{орг}$) и генерационного потенциала, достигающего 15 мг УВ/г породы. Преобразованность органического вещества этих отложений соответствует стадии $МК_1$ (по материалам ГНЦ ФГУП «Южморгеология» и ИНГГ СО РАН, 2014 г.). В более мелководных обстановках Усть-Ленского профорланда прогнозируется улучшение генерационных характеристик верхнеюрских НГМТ. Резервуарные толщи могли развиваться в прибрежно-морских и континентальных обстановках осадконакопления в результате сноса большого количества обломочного материала с Верхоянского орогена. Коллекторскими свойствами обладают песчаные прослои юрских и нижнемеловых отложений, что согласуется с наличием нефтегазопроявлений, установленных в юрских

отложения на Нордвикской и Чайдахской площадях [6, 9].

Аптско-верхнемеловой комплекс сложен песчаниками, включающими гальку известняков, аргиллитов и пласты угля. Положение депоцентров в южной и северной частях наследуется от юрско-барремского этапа развития, однако область распространения повышенных мощностей существенно сокращается (рис. 4Д). Мощность отложений, заполняющих депоцентр, соответствующий Приверхоянскому ретрофорланду, составляет 500—1600 м. Относительно повышенные (до 3000 м) мощности характерны для депоцентра, соответствующего Усть-Ленскому профорланду. Скорости седиментации также существенно различаются в двух прогибах и составляют, соответственно, 10—30 м/млн лет в пределах Приверхоянского ретрофорланда и до 60 м/млн лет в области Усть-Ленского профорланда.

Анализ состава отложений и мощностей осадочных образований не позволяет выделять на территории Лено-Анабарского прогиба и Анабаро-Хатангской седловины благоприятные условия для развития НГМТ, однако аптско-верхнемеловой комплекс может рассматриваться в качестве вместилища для УВ при наличии надежных флюидопоров. С учетом выполненных палеореконокструкций отложения, обладающие нефтегазоматеринскими свойствами, могли формироваться в пределах Усть-Ленского профорланда.

Начиная с палеогена формирование отложений в пределах Приверхоянского ретрофорланда прекращается, а депоцентр, расположенный в акватории, мигрирует в северном направлении по мере формирования бассейна моря Лаптевых. Прогибание в южной части Усть-Ленского профорланда, сопровождаемое довольно высокими скоростями осадконакопления (до 60—73 м/млн лет) (рис. 4Е), возобновляется в неоген-четвертичное время, что, вероятно, связано с активизацией сдвиговой тектоники на фоне взаимного движения относительно двух крупных литосферных плит — Северо-Американской и Евразийской, граница между которыми проходит в пределах шельфа моря Лаптевых и Верхоянской складчатой области.

Заключение

Анализ эволюции разновозрастных осадочных бассейнов позволяет выделить 4 области устойчивого прогибания (осадочно-породные бассейны) в пределах изучаемой территории (рис. 4). «Северо-Сибирский» осадочно-породный бассейн

(ОПБ) располагается в южной части Лено-Анабарского прогиба. Он включает отложения трех осадочных комплексов: рифейско-кембрийского, распространенного по всей площади бассейна, юрско-барремского и аптско-верхнемелового, депоцентры которых мигрировали в процессе развития в северную часть области. «Хатангский» ОПБ расположен на территории Хатангского залива, о-ва Большой Бегичев и п-ва Юрюнг-Тумус. Его осадочное наполнение представлено отложениями рифейско-кембрийского, ордовикско-каменноугольного, пермско-триасового и юрско-барремского комплексов. Соотношение комплексов в отдельных частях «Хатангского» бассейна варьирует, что обусловлено миграцией депоцентров в процессе его развития. «Таймырский» ОПБ преимущественно состоит из отложений ордовикско-каменноугольного комплекса. Рифейско-кембрийские, пермско-триасовые и юрско-барремские отложения присутствуют в подчиненном количестве. «Лаптевский» ОПБ обрамляет дельту р. Лены и открывается в сторону акватории. В пределах изучаемой территории в составе осадочных образований этого бассейна присутствуют отложения всех комплексов: рифейско-кембрийского, ордовикско-каменноугольного, пермско-триасового, юрско-барремского, аптско-верхнемелового и неоген-четвертичного. Юрско-барремские отложения доминируют в разрезе южной окраины бассейна.

На основании изучения факторов, контролирующих формирование начального генерационного потенциала НГМТ и условия его реализации, включая обстановки осадконакопления, скорости седиментации, устойчивое погружение в постседиментационный период, выделены вероятные очаги генерации прогнозируемых НГМТ. В частности, очаги генерации рифейской и вендской НГМТ расположены на территории «Северо-Сибирского», «Хатангского» и «Лаптевского» ОПБ, девонской — в «Хатангском», «Таймырском» и «Лаптевском» ОПБ, пермской — в пределах «Хатангского» и «Лаптевского» ОПБ, юрской — в «Северо-Сибирском», «Хатангском» и «Лаптевском» ОПБ.

Таким образом, перспективы нефтегазоносности «Таймырского» ОПБ обеспечиваются ГАУС в составе девонских отложений, «Северо-Сибирского» — ГАУС рифейско-вендского и юрского комплексов, «Хатангского» и «Лаптевского» — ГАУС рифейско-вендского, девонского, пермского и юрского интервалов разреза.

С учетом изложенного наиболее перспективными для поисков УВ являются области,

принадлежащие «Хатангскому» ОПБ, что подтверждается открытыми месторождениями (Нордвикское, Чайдахское, Южно-Тигянское) и «Лаптевскому» ОПБ, перспективы которого требуют дальнейшего изучения.

Проведенные исследования свидетельствуют об отсутствии существенных перспектив

Лено-Анабарского прогиба, за исключением, возможно, его южной части, принадлежащей «Северо-Сибирскому» ОПБ.

Полученные результаты носят предварительный характер, а сформированные гипотезы и предположения требуют дальнейшей проверки методами численного моделирования бассейнов и ГАУС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бакай Е.А., Смирнова М.Е., Коробова Н.И., Надежкин Д.В. Литолого-геохимическая характеристика Пермского нефтегазоносного комплекса Лено-Анабарского прогиба (на примере скважины Усть-Оленекская-2370) // Вестник Московского университета. 2016. № 1. С. 71—81.
2. Грамберг И.С., Деменицкая Р.М., Секретов С.Б. Система рифтогенных грабенов шельфа моря Лаптевых как недостающего звена рифтового пояса хребта Геккеля-Момского рифта // Доклады Академии наук СССР. 1990. Т. 311. № 3. С. 689—694.
3. Грамберг И.С., Иванов В.Л., Орлов В.П., Погребницкий Ю.Е. Геология и полезные ископаемые России. В 6 томах. Том 5. Арктические и дальневосточные моря. Книга 1. Арктические моря. СПб.: ВСЕГЕИ, 2004. 468 с.
4. Драчев С.С. Тектоника рифтовой системы дна моря Лаптевых // Геотектоника. 2000. № 6. С. 43—58.
5. Каширцев В.А., Конторович А.Э., Иванов В.Л., Сафронов А.Ф. Месторождения природных битумов на северо-востоке Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 93—105.
6. Конторович В.А., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Соловьев М.В. Сейсмогеологические модели и нефтегазоносность осадочных комплексов в арктических регионах Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции (Анабаро-Хатангская, Лено-Анабарская нефтегазоносные области) // Геология нефти и газа. 2019. № 5. С. 15—26. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-5-15-26>
7. Конторович В.А., Конторович А.Э., Губин И.А., Зотеев А.М., Лапковский В.В., Малышев Н.А., Соловьев М.В., Фрадкин Г.С. Структурно-тектоническая характеристика и модель геологического строения неопротерозойско-фанерозойских отложений Анабаро-Ленской зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1253—1274.
8. Конторович В.А., Конторович А.Э., Калинин А.Ю., Калинина Л.М., Лапковский В.В., Лунев Б.Л., Моисеев С.А., Соловьев М.В. Сейсмогеологическая и структурно-тектоническая характеристика континентальной окраины Сибирской платформы (Хатангско-Ленское междуречье) // Геология и геофизика. 2021. Т. 62. № 8. С. 1153—1171. <https://doi.org/10.15372/GiG2021122>
9. Лежнин Д.С., Афанасенков 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. <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-4-7-28>
10. Полякова И.Д., Борукаев Г.Ч. Структура и нефтегазовый потенциал Лаптевоморского региона // Литология и полезные ископаемые. 2017. № 4. С. 322—339. <https://doi.org/10.7868/S0024497X17040036>
11. Сафронов А.Ф., Сивцев А.И., Чалая О.Н., Зуева И.Н., Соколов А.Н., Фрадкин Г.С. Начальные геологические ресурсы углеводородов шельфа моря Лаптевых // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 8. С. 1275—1279.
12. Соболев П.Н., Лежнин Д.С., Панарин И.А., Гаврилова Е.Н., Пименова А.М. Геохимические критерии нефтегазоносности рифей-палеозойских отложений Лено-Анабарского регионального прогиба и сопредельных территорий // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2019. № 8. С. 62—74. [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-8\(332\)-62-74](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-8(332)-62-74)
13. Фролов С.В., Коробова Н.И., Бакай Е.А., Курдина Н.С. Углеводородные системы и перспективы нефтегазоносности Анабаро-Ленского прогиба // Георесурсы. 2017. Спецвыпуск. Ч. 2. С. 173—185. <https://doi.org/http://doi.org/10.18599/grs.19.18>
14. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. М.: Научный мир, 2001. 606 с.
15. Franke D., Hinz K. & Oncken O. The Laptev Sea rift // Marine and Petroleum Geology. 2001. Vol. 18. P. 1083—1127. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(01)00041-1)

REFERENCES

1. Bakaj E.A., Smirnova M.E., Korobova N.I., Nadezhkin D.V. Lithological and geochemical characteristics of the Permian oil and gas complex of the Leno-Anabar trough (using the example of the Ust-Olenekskaya-2370 well) // Bulletin of the Moscow University. 2016. No. 1. P. 71—81 (In Russian).
2. Gramberg I.S., Demenickaja R.M., Sekretov S.B. The system of rift grabens of the Laptev Sea shelf as the

- missing link of the rift belt of the Haeckel-Momsky Rift ridge // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. 1990. Vol. 311. No. 3. P. 689—694 (In Russian).
3. Gramberg I.S., Ivanov V.L., Orlov V.P., Pogrebickij Ju.E. Geology and minerals of Russia. In six volumes. Volume 5. Arctic and Far Eastern seas. Book 1. The Arctic Seas. St. Petersburg: VSEGEI, 2004. 468 p. (In Russian).
 4. Drachev S.S. Tectonics of the rift system of the Laptev Sea floor // Geotectonics. 2000. No. 6. P. 43—58 (In Russian).
 5. Kashircev V.A., Kontorovich A.Je., Ivanov V.L., Safronov A.F. Natural bitumen fields in the northeast of the Siberian Platform // Geology and Geophysics. 2010. Vol. 51. No. 1. P. 93—105 (In Russian).
 6. Kontorovich V.A., Kalinin A.Ju., Kalinina L.M., Solov'ev M.V. Seismogeological models and petroleum potential of sedimentary sequences in the Arctic regions of Lena-Tunguska petroleum province (Anabar-Khatanga, Lena-Anabar petroleum areas) // Oil and gas geology. 2019. No. 5. P. 15—26 (In Russian). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2019-5-15-26>
 7. Kontorovich V.A., Kontorovich A.Je., Gubin I.A., Zoteev A.M., Lapkovskij V.V., Malyshev N.A., Solov'ev M.V., Fradkin G.S. The neoproterozoic-phanerozoic section of the Anabar-Lena province: structural framework, geological model, and petroleum potential // Geology and geophysics. 2013. Vol. 54. No. 8. P. 1253—1274 (In Russian).
 8. Kontorovich V.A., Kontorovich A.Je., Kalinin A.Ju., Kalinina L.M., Lapkovskij V.V., Lunev B.L., Moiseev S.A., Solov'ev M.V. Seismogeologic, structural, and tectonic characteristics of the continental margin of the Siberian platform (Khatanga-Lena interfluvium) // Geology and geophysics. 2021. Vol. 62. No. 8. P. 1153—1171 (In Russian). <https://doi.org/10.15372/GiG2021122>
 9. Lezhnin D.S., Afanasenkov A.P., Sobolev P.N., Najdenov L.F. Riphean-Palaeozoic series in the Khatanga-Lena interfluvium: geological structure and petroleum potential // Oil and gas geology. 2021. No. 4. P. 7—28 (In Russian). <https://doi.org/10.31087/0016-7894-2021-4-7-28>
 10. Polyakova I.D., Borukaev G.Ch. The structure and oil and gas potential of the Laptev Sea region // Lithology and minerals. 2017. No. 4. P. 322—339 (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0024497X17040036>
 11. Safronov A.F., Sivcev A.I., Chalaja O.N., Zueva I.N., Sokolov A.N., Fradkin G.S. Initial Geologic Hydrocarbon Resources of the Laptev Sea Shelf // Geology and geophysics. 2013. Vol. 54. No. 8. P. 1275—1279 (In Russian).
 12. Sobolev P.N., Lezhnin D.S., Panarin I.A., Gavrilova E.N., Pimenova A.M. Geochemical criteria of petroleum potential of the riphean-paleozoic sediments of the lena-anabarsky regional trough and adjacent territories // Geology, geophysics and development of oil and gas fields. 2019. No. 8. P. 62—74 (In Russian). [https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-8\(332\)-62-74](https://doi.org/10.30713/2413-5011-2019-8(332)-62-74)
 13. Frolov S.V., Korobova N.I., Bakaj E.A., Kurdina N.S. Hydrocarbon systems and oil and gas potential prospects of the Anabar-Lena trough // Georesources. 2017. Special issue. Part 2. P. 173—185 (In Russian). <https://doi.org/http://doi.org/10.18599/grs.19.18>
 14. Hain V.E. Tectonics of continents and oceans. Moscow: Scientific world, 2001. 606 p.
 15. Franke D., Hinz K. & Oncken O. The Laptev Sea rift // Marine and Petroleum Geology. 2001. Vol. 18. P. 1083—1127. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(01\)00041-1](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(01)00041-1)

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Павёлкина Д.А. — внесла основной вклад при выполнении исследования (сбор материалов, формирование и анализ базы данных результатов геохимических исследований, анализ базы данных признаков нефтегазоносности, разработка структурного каркаса геологической модели, выполнение палеогеографических реконструкций, выделение депоцентров осадконакопления, установление областей устойчивого прогибания, расчет скоростей осадконакопления основных осадочных комплексов, прогноз элементов углеводородных систем, подготовка входных данных для моделирования), подготовила текст статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Высоколян А.М. — сформировала геоинформационную базу данных признаков нефтегазоносности и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Diana A. Pavelkina — made the main contribution to the research (collection of materials, formation and analysis of the database of geochemical research results, analysis of the database of signs of oil and gas potential, development of the structural framework of the geological model, paleogeographic reconstructions, identification of main depocenters and domains of consistent subsidence, calculation of sedimentation rates of the main sedimentary complexes, forecast of elements of petroleum systems, preparation of input data for modeling), has prepared the text of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Anastasia M. Vysokolyan — formed a geoinformation database of signs of oil and gas potential and accepted the responsibility for all aspects of the work.

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

Лавренова Е.А. — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Шатыров А.К. — выполнил интерпретацию геофизических исследований в скважинах по специальной методике, позволяющей проследить смену осадочных трендов в процессе формирования осадочного чехла, и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Elena A. Lavrenova — developed the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Anar K. Shatyrov — performed the interpretation of geophysical studies in wells using a special technique that allows us to trace the change of sedimentary trends during the formation of the sedimentary cover, and accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Павёлкина Диана Андреевна* — студентка 5-го курса 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: dianapavyolkina@yandex.ru

тел.: +7 (902) 987-64-04

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6934-0785>

Diana A. Pavelkina* — student of the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: dianapavyolkina@yandex.ru

tel.: +7 (902) 987-64-04

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-6934-0785>

Высоколян Анастасия Михайловна — студентка 5-го курса 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: visokolyan09@mail.ru

тел.: +7 (988) 679-90-25

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4707-4439>

Anastasia M. Vysokolyan — student of the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: visokolyan09@mail.ru

tel.: +7 (988) 679-90-25

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4707-4439>

Лавренова Елена Александровна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент 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: lavrenovaelena@mail.ru

тел.: +7 (903) 452-45-94

SPIN-код: 1859-8634

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3329-7424>

Elena A. Lavrenova — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Lecturer at the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: lavrenovaelena@mail.ru

tel.: +7 (903) 452-45-94

SPIN-code: 1859-8634

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3329-7424>

Шатыров Анар Камандарович — инженер лаборатории «Моделирование углеводородных систем» ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: anar.shatyrov@mail.ru

тел.: +7 (926) 142-77-63

SPIN-код: 5794-0287

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-5325>

Anar K. Shatyrov — engineer of the Laboratory “Modeling of Hydrocarbon Systems” of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: anar.shatyrov@mail.ru

tel.: +7 (926) 142-77-63

SPIN-code: 5794-0287

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3450-5325>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ПОЛЕВЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГЛИНИСТОЙ ТОЛЩИ ЗОНЫ ДИСЛОКАЦИИ В РАЙОНЕ СТРОИТЕЛЬСТВА АЭС «ПАКШ-2», ВЕНГРИЯ

М.В. ВИЛЬКИНА^{1,2*}, А.М. НИКУЛЕНКОВ^{1,2}, В.Г. РУМИНИН^{1,2}, М.М. ЧЕРЕПАНСКИЙ³

¹ Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН
41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»
7—9, Университетская набережная, г. Санкт-Петербург 199034, Россия

³ ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117485, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Строительство атомной электростанции подразумевает возведение глубокого котлована, что может быть затруднено в условиях сильнообводненных грунтов. Одним из способов ограничить водопиток в строительный котлован является возведение противofiltrационной завесы. Как правило, основание завесы ПФЗ заглубляют до отметок водоупора, однако наличие в нем гидрогеологических окон может негативно отразиться на эффективности такого проектного решения.

Цель. Установить характер деформации глинистого слоя вдоль региональной зоны дислокации на площадке строительства АЭС «Пакш-2».

Материалы и методы. Для изучения сплошности слоя глин был использован обширный комплекс геолого-гидрогеологических методов. Он включал бурение и анализ свыше тысячи инженерно-геологических скважин с отбором керна, комплекс наземной и скважинной геофизики, создание многоуровневой мониторинговой сети скважин за наблюдением уровня подземных вод, проведение опытно-фильтрационных работ, а также методы численного гидрогеологического моделирования.

Результаты. Исследование показало, что наличие большого числа скважин не гарантирует достаточного количества информации для схематизации гидрогеологических условий. Установление сплошности глинистого слоя с амплитудой вертикального смещения в сто метров стало возможным благодаря вероятностному анализу на численной модели и проведению комплекса гидрогеологических исследований, нацеленных на подтверждение или опровержение результатов моделирования.

Заключение. Интерпретация гидрогеологических условий на объектах повышенной ответственности, таких как атомные электростанции, подземные выработки, карьеры, влияет на безопасность и экономическую целесообразность проекта. В условиях недостаточности или отсутствия представлений о геологическом строении территории комплекс гидрогеологических методов может служить самостоятельным источником недостающей информации.

Ключевые слова: противofiltrационная завеса, гидродинамическая томография, гидрогеологическое моделирование, пликтивная структура, строительство АЭС, зона дислокации

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Вилькина М.В., Никуленков А.М., Румынин В.Г., Черепанский М.М. Полевые и модельные исследования проницаемости глинистой толщи зоны дислокации в районе строительства АЭС «Пакш-2», Венгрия. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):49—59. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-49-59>

Статья поступила в редакцию 15.04.2024
Принята к публикации 15.05.2024
Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

FIELD AND MODEL INVESTIGATIONS OF CLAY LAYER PERMEABILITY IN THE AREA OF PAKS II NPP CONSTRUCTION

MARIIA V. VILKINA^{1,2,*}, ANTON M. NIKULENKOV^{1,2}, VYACHESLAV G. RYMUNIN^{1,2},
MIKHAIL M. CHEREPANSKY³

¹ St. Petersburg Division of the E.M Sergeev Institute of Environmental Geology of the Russian Academy of Sciences
41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia

² St. Petersburg State University
7—9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg 199034, Russia

³ Russian State University for Geological Prospecting
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

ABSTRACT

Background. The construction of a nuclear power plant inevitably requires excavation of a deep pit. This task may be impeded by high groundwater levels. The groundwater inflow into the pit can be limited by erecting a cut-off wall. As a rule, the cut-off wall is deepened to the aquitard elevation; however, the presence of hydrogeological windows therein may reduce the efficiency of such a solution.

Aim. To determine the nature of clay layer deformation along the regional dislocation area of the Paks II NPP construction site.

Materials and methods. A comprehensive geological and hydrogeological study was carried out to identify the continuity of the clay layer. This included an analysis of core samples from more than 1000 engineering and geological boreholes, surface and borehole geophysical surveys, a multi-level borehole network for groundwater level monitoring, as well as numerical hydrogeological modelling.

Results. It was found that extensive borehole data does not always guarantee the sufficiency of information for mapping the hydrogeological settings. The continuity of the clay layer with a vertical displacement amplitude of 100 meters was established through a probabilistic analysis using a numerical model and a set of hydrogeological surveys aimed at confirming or refuting the modeling results.

Conclusion. Assessment of hydrogeological conditions when implementing high-risk projects, such as nuclear power plants, underground excavations, and open-pit quarries, determines their safety and economic feasibility. In the absence or inconsistency of geological structure knowledge, hydrogeological surveys can serve as an independent source of missing information.

Keywords: cutoff wall, hydraulic tomography, hydrogeological modeling, fold structure, NPP construction, dislocation area

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

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

For citation: Vilkina M.V., Nikulenkova A.M., Rymunin V.G., Cherepansky M.M. Field and model investigations of clay layer permeability in the area of Paks II NPP construction. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):49—59. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-49-59>

Manuscript received 15 April 2024
Accepted 15 May 2024
Published 28 June 2024

* Corresponding author

На начало 2024 года в Евросоюзе насчитывалось 100 действующих энергоблоков на территории 12 стран, производящих до четверти всей электроэнергии, потребляемой регионом [5]. Четыре из них расположены на венгерской атомной электростанции (АЭС) «Пакш». Проект АЭС «Пакш-2» подразумевает строительство двух дополнительных энергоблоков (ЭБ) в 100 м к северу от действующей АЭС «Пакш». Чтобы ограничить водопиток в строительный котлован глубиной 23 м и минимизировать гидродинамическое влияние на уже действующую АЭС «Пакш», было принято решение о возведении противодиффузионной завесы (ПФЗ) по контуру строительного котлована. Максимальная эффективность ПФЗ может быть достигнута путем заглубления ограждающих конструкций (стен ПФЗ) до глубины выдержанного водопора. А наличие гидрогеологических окон в водупорном слое является осложняющим фактором, который необходимо учитывать при проектировании водозащитных мероприятий [13]. Таким образом, **в рамках данного исследования** изученность гидрогеологического строения

определяет безопасность строящейся АЭС «Пакш-2» и действующей АЭС «Пакш».

Гидрогеологическая схематизация изучаемой территории определена структурными особенностями геологического строения и может быть представлена в следующем виде (рис. 1).

1. Четвертичный безнапорный водоносный горизонт, субгоризонтально залегающий у поверхности земли в интервале абсолютных отметок от 97,1 до 80,0 м, сложен аллювиальными песками, гранулометрический состав которых с глубиной увеличивается от пылеватого до гравийного.

2. Верхне-неогеновый напорно-безнапорный водоносный горизонт, заполняющий переслаивающимися глинистыми и супесчаными отложениями грабенообразную структуру.

3. Неогеновый глинистый слой мощностью 10—15 м.

4. Нижне-неогеновый (паннонский) напорный водоносный горизонт, сложенный песками.

Подробно гидрогеологическое строение и характеристика фильтрационных свойств приведены в [4].

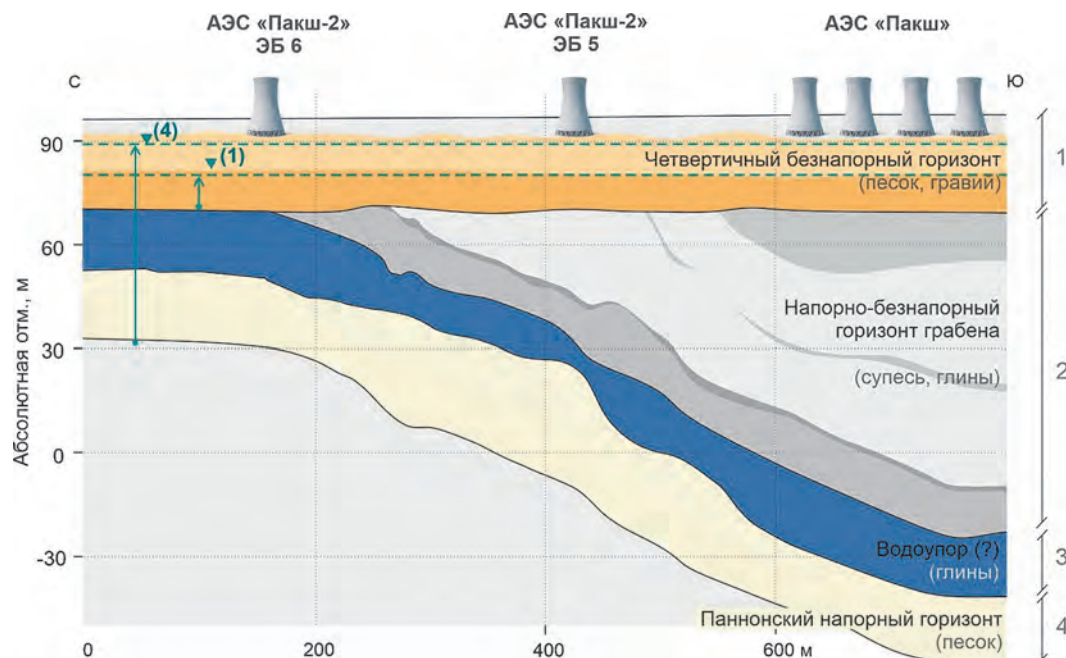


Рис. 1. Схематичный геолого-гидрогеологический разрез через площадку строительства АЭС «Пакш-2»
Fig. 1. Schematic geological and hydrogeological cross-section across the construction site of the Paks II NPP

Имеющийся слой глин рассматривается в качестве потенциального основания для заглубления ПФЗ. По данным, полученным в ходе бурения и комплекса геофизических работ на территории строительства новых энергоблоков, стало известно о резко невыдержанной отметке залегания глин, варьирующей от +70 до -30 абс. м. Согласно геологическим представлениям о строении территории данная структура была сформирована в результате тектонических смещений по региональной зоне дислокации Дунасентдьердь — Харта, пересекающей площадку строительства в районе проектируемого пятого энергоблока. Примечательно, что вертикальное смещение толщ фиксируется лишь в отложениях неогенового возраста, что дает основание заключить об отсутствии сейсмической опасности в регионе.

Столь масштабная (стометровая) амплитуда вертикального смещения могла привести к нарушению сплошности глинистого слоя. Исчерпывающий теоретический и литературный обзор влияния тектонических нарушений на структуру фильтрационного потока приведен в работе [9]. В общем виде на площадке строительства «АЭС Пакш-2» возможны три концептуальных схематизации деформации глинистого слоя (рис. 2):

1. Вертикальное перемещение без нарушения сплошности глинистого слоя (пликативная структура).

2. Вертикальное смещение с серией разрывных нарушений небольшой амплитуды.

3. Вертикальное перемещение с нарушением сплошности слоя (дизъюнктивная структура).

Работы, проведенные в рамках настоящего исследования, были нацелены на установление принадлежности гидрогеологического строения к одной из предложенных схематизаций. Обзор используемых для этого методов приведен ниже.

Материалы и методы

Целью настоящего исследования являлось установление не только геометрии глинистого слоя, но и его водоупорных свойств. Для этого был проведен комплекс геолого-гидрогеологических исследований, основные методы которого перечислены в настоящем разделе.

1. Бурение инженерно-геологических скважин

Для детализации глинистого слоя на площадке строительства АЭС «Пакш-2» была создана инженерно-геологическая сеть наблюдений, насчитывающая более 1000 скважин глубиной от 20 до 150 м. Чтобы определить амплитуду и геометрию вертикального смещения вдоль зоны

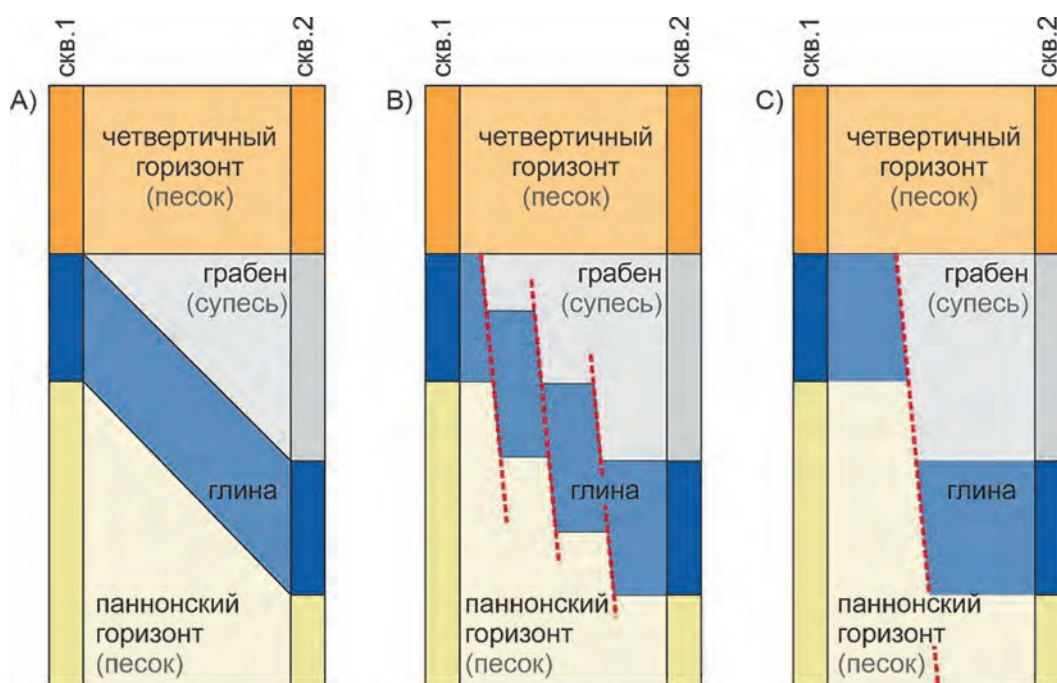


Рис. 2. Концепции деформации глинистого слоя в зоне дислокации: А — разрыв отсутствует; В — разрыв локальный; С — протяженный разрыв

Fig. 2. Concepts of the clay layer deformations in the fault zone: A) no discontinuity; B) local discontinuity; C) regional discontinuity

Дунасентдьердь — Харта, расстояние между скважинами не превышало 20 м. В скважинах проводилось детальное описание кернового материала, была разработана система маркирующих горизонтов, проведено статическое зондирование более чем в 500 точках, выполнен комплекс скважинной и наземной геофизики включая методы вертикального электрического зондирования, межскважинного сейсмического просвечивания и многие другие [4].

2. Мониторинг за уровнем подземных вод

Часть скважин, пробуренная в рамках инженерно-геологических изысканий, в дальнейшем была использована для создания мониторинговой сети за наблюдением уровня подземных вод. Так, на территории площадки были организованы многоуровневые кусты гидрогеологических скважин, оборудованные на верхний (четвертичный) и нижний (паннонский) водоносные горизонты (рис. 3).

Наблюдательная сеть скважин служит источником информации о распределении напоров в плане и по глубине. Очевидно, что разница напоров между двумя водоносными горизонтами, разделенными водоупором, будет тем больше, чем

изолирующие свойства водоупора совершеннее. Количественно данная зависимость в зоне разгрузки подземных вод может быть выражена следующим образом [2, 6]:

$$\Delta H_0 = \varepsilon L \sqrt{\frac{m'T_2}{k'T_1(T_1 + T_2)}}, \quad (1)$$

где ΔH_0 — разница напоров, м; ε — величина инфильтрационного питания, м/сут; L — длина от водораздела до зоны разгрузки, м; k' — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность m' (м) разделяющего слоя; $T_1 = k_1m_1$, $T_2 = k_2m_2$ — проводимость верхнего и нижнего водоносных горизонтов соответственно, м²/сут; k , m — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность (м) водоносного горизонта.

3. Опытнo-фильтрационные работы

Для количественного и качественного анализа фильтрационных свойств разделяющего слоя глин в нижнем (паннонском) водоносном горизонте были проведены четыре откачки длительностью от 5 до 7 суток с постоянным расходом от 150 до 370 м³/сут. При этом 44 скважины многоуровневой мониторинговой сети использовались

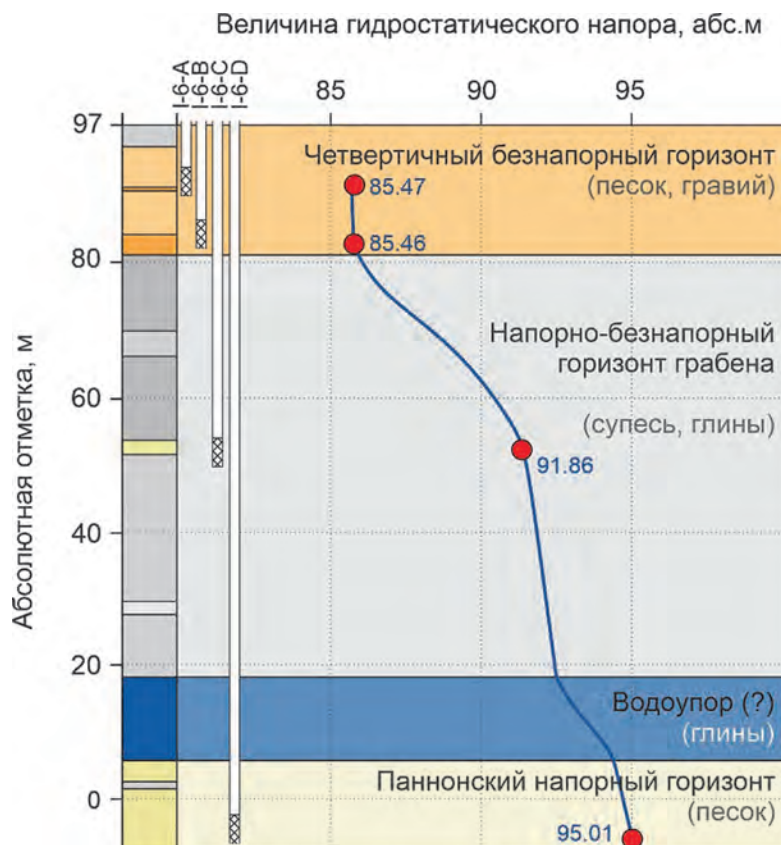


Рис. 3. Распределение фактических напоров по глубине в многоуровневом кусте скважин I-6

Fig. 3. Distribution of the observed hydraulic heads with depth in a multi-level wells cluster

для пространственного анализа гидродинамического возмущения, создаваемого откачкой по всей глубине.

На качественном уровне интерпретировать результаты подобных откачек можно с помощью индикаторного признака: наличия или отсутствия понижения на откачку из смежного водоносного горизонта. Данный алгоритм также получил название гидродинамической томографии [8, 12].

Количественная оценка приводилась с помощью графиков временного $S - \lg(t)$ прослеживания по схеме неограниченного плано-однородного пласта (решение C.V. Theis, 1935 [11], (2)), а также по схеме пласта с перетеканием с поддержанием постоянного напора в смежном пласте (решение Hantush—Jacob, 1955 [10], (3)):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right); \quad (2)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4Tt}, \frac{r}{B}\right) = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right), \quad (3)$$

$$W(u, \beta) = \int_u^\infty \frac{1}{\tau} \exp\left(-\tau - \frac{\beta^2}{4\tau}\right) d\tau,$$

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}},$$

где s — понижение в наблюдательной скважине, м; Q — расход опытной скважины, м³/сут; $T = km$ — проводимость основного водоносного горизонта, м²/сут; k, m, S — коэффициент фильтрации (м/сут), мощность (м) и водоотдача (–) основного водоносного горизонта; $a = T/S$ — пьезопроводность основного водоносного горизонта, м²/сут; B — параметр перетекания для одного смежного пласта, м; k' — коэффициент фильтрации (м/сут) и мощность m' (м) слабопроницаемого слоя; r — расстояние от опытной до наблюдательной скважины, м; t — время от начала откачки, сут; $W(u, \beta)$ — функция влияния скважины с учетом перетекания [7].

Отметим, что решение Hantush—Jacob (3) стремится к решению Theis (2), если параметр перетекания стремится к бесконечности, $B \rightarrow \infty$. Данное замечание отвечает физическому смыслу: когда перетекание из смежного горизонта отсутствует, гидрогеологические условия можно схематизировать до однородного, выдержанного в плане водоносного горизонта.

4. Численное моделирование

Методы численного моделирования значительно расширяют возможности вероятностного анализа строения гидрогеологической среды [3]. Так,

на откалиброванной гидрогеологической модели с помощью открытого программного кода MODFLOW сравнивались три концепции деформации глинистого слоя: 1) сплошной водоупор без разрывных нарушений (пликативная структура); 2) локальное разрывное нарушение в водоупоре и 3) протяженное линейное разрывное нарушение (дизъюнктивная структура) (рис. 2). Нарушение сплошности глинистого слоя имитировалось путем задания в модельные блоки (которые расположены вдоль линий дислокаций) повышенного коэффициента фильтрации. Критерием достоверности результатов моделирования служила фактически наблюдаемая разница напоров между верхним (четвертичным) и нижним (паннонским) водоносными горизонтами.

Результаты

Густая сеть пробуренных инженерно-геологических скважин значительно расширила представления о геологическом строении территории, однако не позволила сделать вывод о характере деформации глинистого слоя.

Многоуровневые кусты наблюдательных скважин на площадке АЭС «Пакш-2» стали источником информации о распределении уровней подземных вод по глубине (рис. 3). Разница уровней подземных вод между нижним (паннонским) и верхним (четвертичным) водоносными горизонтами рассматривается как косвенный признак водоупорных свойства разделяющего слоя глин. Данные, полученные в ходе гидрогеологического мониторинга за уровнем подземных вод, использовались для анализа разницы уровня подземных вод в плане. Фактическая разница в напоре (рис. 4А) сравнивалась с результатами модельных расчетов, выполненных для трех сценариев сплошности глинистого слоя (рис. 4В, С, D).

Сравнительный анализ показывает, что наличие протяженной зоны разрыва в глинистом слое (рис. 4D) существенно меняет гидрогеологический режим паннонского горизонта: на участках разрыва сплошности водоупора уровни в нем снижаются. Это приводит к сокращению разницы напоров между четвертичным и паннонским горизонтами до 2—3 м (рис. 4D) по сравнению с фактическими 4—5 м (рис. 4D). На этом основании сценарий с протяженной зоной разрыва был исключен из дальнейшего рассмотрения.

Фактическое распределение разницы напоров (рис. 4А) в целом отвечает модельному сценарию с отсутствием разрыва в сплошности глинистого слоя (рис. 4В). При этом нельзя

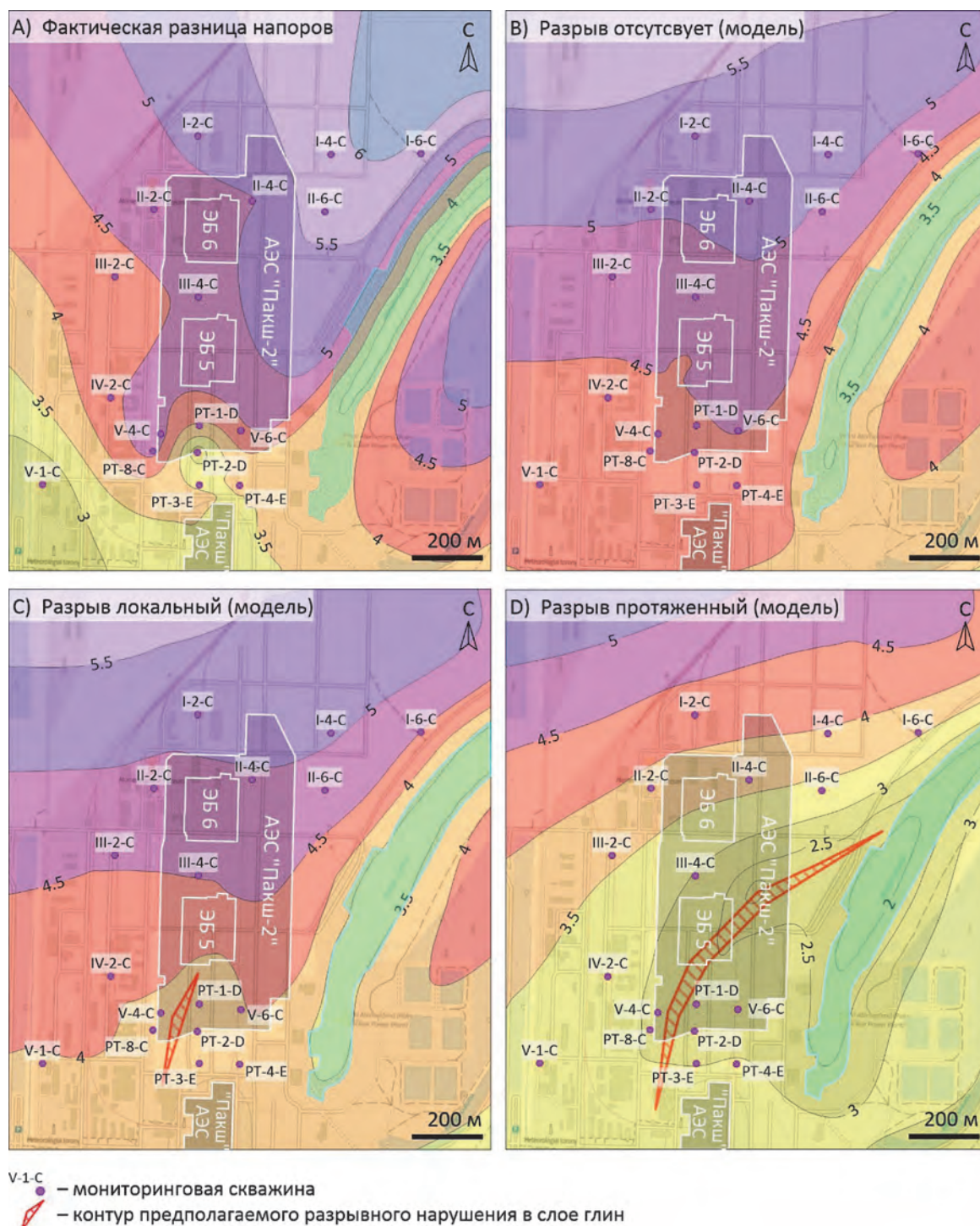


Рис. 4. Карта разницы напора между нижним (паннонским) и верхним (четвертичным) водоносными горизонтами: А — фактическая на площадке строительства по данным мониторинга; В — модельная для сценария без разрыва сплошности в глинистом слое; С — модельная для сценария с локальным разрывом сплошности в глинистом слое; Д — модельная для сценария с выдержанным разрывом сплошности в глинистом слое
Fig. 4. Map of the hydraulic head difference between the bottom (pannonian) and upper (quaternary) aquifers: A) observed at the construction site based on the monitoring data; B) model for the no discontinuity scenario; C) model for the local discontinuity scenario; D) model for the regional discontinuity scenario

оставить без внимания anomalно низкую разницу в напорах, фиксирующуюся в районе скважины РТ-2-D (рис. 4А). Данная «аномалия» может быть вызвана перетоком через гидрогеологическое окно, образовавшимся в результате вертикального смещения глинистого слоя амплитудой 100 м. Данный сценарий отвечает модельному прогнозу, отображенному на рисунке 4С (локальный разрыв). Однако данное предположение не нашло подтверждения при анализе данных откачки из скважины РТ-2-D.

Качественная интерпретация пятидневной откачки из скважины РТ-2-D с расходом 230 м³/сут показала, что ни в одной наблюдательной скважине, оборудованной на интервал выше кровли глинистого слоя, понижения уровня подземных вод зарегистрировано не было. В то же время все скважины, расположенные под глинистым слоем, демонстрируют схожую между собой реакцию на откачку (рис. 5А). Кривые понижения описываются прямолинейным участком без выполаживания, что свидетельствует об отсутствии перетекания из смежного водоносного горизонта.

Количественная интерпретация откачки включала аппроксимацию данных понижения аналитическим решением Theis (2) [1]. Полученные таким образом значения проводимости и пьезопроводности для каждой скважины затем подставлялись

в решение Hantush—Jacob (3) для оценки потенциального параметра перетекания и, как следствие, коэффициента фильтрации разделяющего водоупора (рис. 5В). Обработка откачек проводилась в программном комплексе ANSDIMAT [7].

Из данных, представленных на графиках, видно, что понижения хорошо описываются аналитическим решением для выдержанного в плане водоносного горизонта, что подтверждает вывод о сплошности глинистого слоя (рис. 6). Оценка коэффициента фильтрации слабопроницаемого слоя (слоя глин) по решению Hantush—Jacob дает значения порядка 1,5Е-04 м/сут (рис. 5В), что в целом соответствует оценкам в 2,3 Е-04 м/сут, полученным по формуле (1) (при $\Delta H_0 = 5$ м; $\epsilon = 0,00025$ м/сут; $L = 3000$ м; $m' = 10$ м; $T_1 = 900$ м/сут; $T_2 = 80$ м/сут).

Заключение

Атомные электростанции являются объектом повышенной ответственности, что предполагает наличие большого количества исходных данных, в том числе данных бурения скважин, исчисляющихся несколькими сотнями, а в отдельных случаях тысячами единиц. Данное обстоятельство, тем не менее, не гарантирует достаточности информации для схематизации гидрогеологических условий, тогда как в условиях повышенного риска

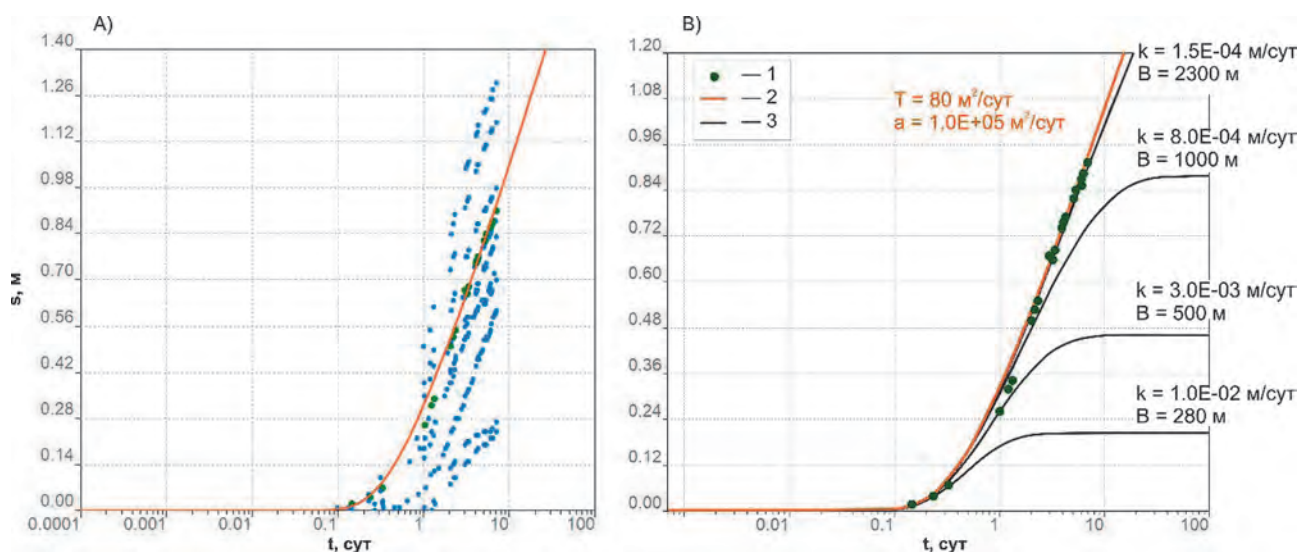


Рис. 5. Графики фактического понижения уровня подземных вод во время откачки из скважины РТ-2-D: А — в группе скважин, оборудованных на паннонский горизонт; В — в одной из скважин с примером аналитической обработки и оцененными параметрами перетекания В (1 — фактические замеры уровня; 2 — решение Theis, [11] (2); 3 — решение Hantush—Jacob [10], (3))

Fig. 5. Graphs of the observed groundwater drawdown during the pumping test in the РТ-2-D well: А) in a group of wells screened to the pannonian aquifer; В) in a single well with an example of the analytical interpretation and evaluated leakage factor В (1 — observed drawdown levels; 2 — Theis solution [11] (2); 3 — Hantush—Jacob solution [10], (3))

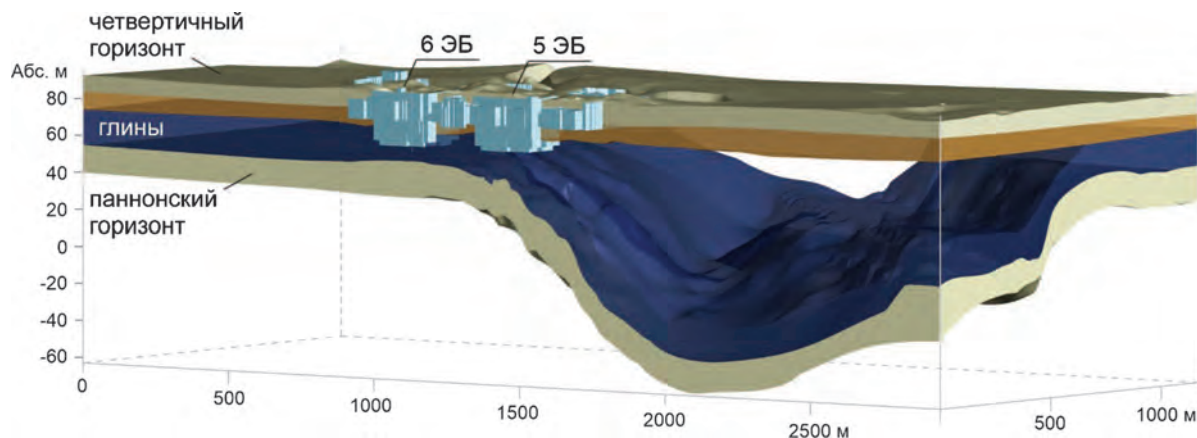


Рис. 6. Трехмерная геологическая модель грабенообразной структуры с выдержанным слоем глин в районе проектируемого пятого энергоблока АЭС «Пакш-2»

Fig. 6. Three-dimensional geological model of the fault structure and continuous clay layer under the designed nuclear island 5 of the Paks NPP

обоснованное выделение гидрогеологических единиц отвечает за экономическую составляющую объекта и его безопасность.

Настоящее исследование является наглядным примером эффективности комплексного подхода для изучения гидрогеологической среды. Последовательный анализ информации из различных источников позволил методично исключить из рассмотрения концепции гидрогеологического строения, не удовлетворяющие фактическим

данным. Так, с помощью данных мониторинговой сети удалось установить отсутствие выдержанного разрыва сплошности в глинистом слое, а с помощью данных многоуровневых откачек исключить наличие локальных гидрогеологических окон. Результаты гидрогеологического моделирования верифицировали интерпретацию натурных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С. Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1979. 326 с.
2. Бочеввер Ф.М., Гармонов И.В., Лебедев А.В., Шестаков В.М. Основы гидрогеологических расчетов. М.: Недра, 1969. 365 с.
3. Капырин И.В. Расчетные коды для гидрогеологического моделирования в задачах оценки безопасности ОИАЭ // Радиоактивные отходы. 2022. № 2(19). С. 105—118.
4. Никуленков А.М., Новицкая О.И., Румынин В.Г., Вилькина М.В., Шварц А.А., Синдаловский Л.Н. Экспериментальные и модельные исследования фильтрационных потоков в районе строительства АЭС «Пакш-2» (Венгрия) // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2023. № 6. С. 47—61.
5. Официальный сайт всемирной ядерной ассоциации. 2016. URL: <https://www.world-nuclear.org> (дата обращения: 19.02.2024).
6. Румынин В.Г. Геомиграционные модели в гидрогеологии. СПб.: Наука, 2011. 1158 с.
7. Синдаловский Л.Н. Гидрогеологические расчеты с использованием программы ANSDIMAT. СПб.: Наука, 2021. 891 с.
8. Berg S. Comparison of hydraulic tomography with traditional methods at a highly heterogeneous site // Groundwater. 2011. Vol. 53. P. 71—89.
9. Bense V., Gleesonb T., Loveless S., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology // Earth Science Review. Elsevier. 2013. Vol. 127. P. 171—192.
10. Hantush M.S., Jacob C.E. Non-Steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, No. 1. P. 95—100.
11. Theis C.V. The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 35. Pt. 2. P. 519—524.
12. Zhao Z. Geostatistical analysis of high-resolution hydraulic conductivity estimates from the hydraulic profiling tool and integration with hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site // Journal of Hydrogeology. Elsevier. 2023. Vol. 617. P. 18.
13. Zhuang C., Zhan H., Xu X., Wang J., Zhou Z., Dou Z. Effects of aquitard windows on groundwater fluctuations within a coastal leaky aquifer system: An analytical and experimental study // Advances in Water Resources. Elsevier. 2023. Vol. 177. P. 15.

REFERENCES

1. Borevskiy B.V., Samsonov B.G., Yazvin L.S. Methodology for determining the parameters of aquifers based on pumping data. Moscow: Nedra, 1979. 326 p. (In Russian).
2. Bochever F.M., Garmonov I.V., Lebedev A.V., Shestakov V.M. Basics of the hydrogeological calculations. Moscow: Nedra, 1969. 365 p. (In Russian).
3. Kapyrin I.V. Computational codes for the hydrogeological modeling in the safety assessment of nuclear facilities // Radioactive wastes. 2022. Vol. 2(19). P. 105—118 (In Russian).
4. Nikulenkova A.M., Novitskaya O.I., Rumynin V.G., Vil'kina M.V. Shvarts A.A. Sindalovskii L.N. Field and model research of the groundwater flows in the area of the Paks-2 NPP construction // Hungary. Geocology, Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology, 2023. No. 6. P. 47—61.
5. Website of the World Nuclear Association, 2016. Available from: <https://www.world-nuclear.org> (last accessed 19.02.2024).
6. Rumynin V.G. Subsurface solute transport models with application to groundwater hydrology. St. Petersburg: Nauka, 2011. 1158 p. (In Russian).
7. Sindalovskiy L.N. Aquifer Test Solutions A Practitioner's Guide with Algorithms Using ANSDIMAT. St. Petersburg: Nauka, 2021. 891 p. (In Russian).
8. Berg, S. Comparison of hydraulic tomography with traditional methods at a highly heterogeneous site // Groundwater. 2011. Vol. 53. P. 71—89.
9. Bense V., Gleeson T., Loveless S., Bour O., Scibek J. Fault zone hydrogeology // Earth Science Review. Elsevier. 2013. Vol. 127. P. 171—192.
10. Hantush M.S., Jacob C.E. Non-Steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955. Vol. 36, no. 1. P. 95—100.
11. Theis C.V. The relationship between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 35. Pt. 2. P. 519—524.
12. Zhao Z. Geostatistical analysis of high-resolution hydraulic conductivity estimates from the hydraulic profiling tool and integration with hydraulic tomography at a highly heterogeneous field site // Journal of Hydrogeology. Elsevier. 2023. Vol. 617. P. 18.
13. Zhuang C., Zhan H., Xu X., Wang J., Zhou Z., Dou Z. Effects of aquitard windows on groundwater fluctuations within a coastal leaky aquifer system: An analytical and experimental study // Advances in Water Resources. Elsevier. 2023. Vol. 177. P. 15.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Вилькина М.В. — внесла вклад в разработку концепции статьи, подготовила текст статьи, обработала результаты опытно-фильтрационных работ, визуализировала результаты численного моделирования, выполнила перевод на английский язык, утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы

Никулеников А.М. — разработал концепцию статьи, добавил и отредактировал текст, разработал численную фильтрационную модель, разработал концепт опытно-фильтрационных работ.

Румынин В.Г. — внес вклад в разработку концепции статьи, разработал концепции деформации глинистого слоя, разработал аналитическую зависимость для разницы напора в зоне региональной разгрузки.

Черепанский М.М. — внес вклад в разработку концепции статьи, общие правки статьи.

Mariia V. Vilkina — contributed to the development of the article concept, prepared the text of the article, analyzed the pumping tests' results, visualized the results of the numerical modeling, translated into English, approved the published version of the article and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Anton M. Nikulenkova — develop the article concept, added and edited the text of the article, developed the numerical model, developed the concept of the pumping tests.

Vyacheslav G. Rymunin — contributed to the development of the article concept, developed the concepts of the clay layer deformation, developed an analytical solution of the hydraulic head difference in the discharge zone.

Mikhail M. Cherepansky — contributed to the development of the article concept, made general comments to the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Вилькина Мария Владимировна* — младший научный сотрудник Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН, аспирант кафедры гидрогеологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет».
41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия
7—9, Университетская набережная, г. Санкт-Петербург 199034, Россия
e-mail: wilkina.mari@hgepro.ru
SPIN-код: 7660-2571
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-7069>

Никуленков Антон Михайлович — кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией экспериментальной гидрогеологии и гидрогеомеханики Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН.
41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия
e-mail: annik@hgepro.ru
SPIN-код:
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5498-076X>

Румынин Вячеслав Гениевич — доктор геолого-минералогических наук, директор Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии РАН; профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», член-корреспондент РАН.
41, Средний проспект В.О., г. Санкт-Петербург 199004, Россия
7—9, Университетская набережная, г. Санкт-Петербург 199034, Россия
e-mail: rumynin@hgepro.ru
SPIN-код: 5695-387
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3928-0228>

Черепанский Михаил Михайлович — доктор геолого-минералогических наук, профессор ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе».
23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117485, Россия
e-mail: vodamch@mail.ru
SPIN-код: 6148-5599

Mariia V. Vilkina* — junior research scientist of the Institute of the Environmental Geology of the RAS, PhD student in hydrogeology of Saint-Petersburg State University.
41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia
e-mail: wilkina.mari@hgepro.ru
SPIN-code: 7660-2571
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3687-7069>

Anton M. Nikulenkov — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Leading research scientist, head of experimental hydrogeology and hydrogeomechanics laboratory of the Institute of the Environmental Geology of the RAS.
41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia
e-mail: annik@hgepro.ru
SPIN-code:
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5498-076X>

Vyacheslav G. Rymunin — Dr. Sci. (Geol.-Min.), director of the Institute of the Environmental Geology of the RAS; Professor of Saint-Petersburg State University, corresponding member of the RAS.
41, Sredny Avenue V.O., St. Petersburg 199004, Russia
7—9, Universitetskaya embankment, St. Petersburg 199034, Russia
e-mail: rumynin@hgepro.ru
SPIN-code: 5695-387
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3928-0228>

Mikhail M. Cherepansky — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Professor of Russian State University for Geological Prospecting.
23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: vodamch@mail.ru
SPIN-code: 6148-5599

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕФОРМИРОВАНИЯ БЕРЕГОВ КРУПНЫХ ВОДОХРАНИЛИЩ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

М.В. СТЕПАНОВА*, В.Н. ЭКЗАРЬЯН

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Первые 10—20 лет после создания крупных водохранилищ активизируется процесс переработки прибрежных территорий, что приводит к потере земельных ресурсов, оказывает негативное влияние на существующую прибрежную инфраструктуру и изменению глубины водохранилища в результате активизации процесса аккумуляции пород, разрушению береговых склонов. Отступление береговой линии составляет 10—15 метров в год. В работе рассмотрен процесс переработки берегов водохранилищ на примере Волгоградского водохранилища.

Цель. Разработка методики изучения и прогноза процесса переформирования берегов водохранилищ с помощью методов дистанционного зондирования и математической статистики.

Материалы и методы. Были собраны, обработаны и проанализированы данные 1980—1990 гг. по фактической величине переработки берегов Волгоградского водохранилища и проведена типизация прибрежной территории. Для получения величин берегобрушения за период с 90-х годов по настоящее время предлагается использовать материалы дистанционного зондирования. Прогнозирование процесса переформирования берегов водохранилищ осуществляется на основе применения методов математической статистики.

Результаты. На основе решения поставленных задач была предложена универсальная новая методика изучения и прогнозирования переформирования берегов водохранилищ. Методика апробирована на материалах Волгоградского водохранилища.

Заключение. Предлагаемая новая методика позволяет получать данные о динамике процесса переформирования берегов Волгоградского водохранилища, а также сделать прогноз на последующие 10 лет. Данную методику можно использовать для изучения процесса переформирования берегов крупных водохранилищ.

Ключевые слова: переформирование берегов водохранилищ, мониторинговые наблюдения, дистанционное зондирование, инженерно-геологическое районирование, методы математической статистики, прогнозирование процесса.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Степанова М.В., Экзарьян В.Н. Особенности изучения процесса переформирования берегов крупных водохранилищ с применением материалов дистанционного зондирования. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):60—68. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-60-68>

Статья поступила в редакцию 27.04.2024

Принята к публикации 25.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

STUDY INTO THE RESHAPING PROCESS OF LARGE RESERVOIR BANKS USING REMOTE SENSING

MARIA V. STEPANOVA*, VLADIMIR N. EKZARYAN

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

ABSTRACT

Background. During the first 10—20 years after the creation of large reservoirs, the process of processing of coastal territories is activated, which leads to the loss of land resources, has a negative impact on the existing coastal infrastructure and changes in the depth of the reservoir as a result of activation of the process of rock accumulation, destruction of coastal slopes. Shoreline retreat is 10—15 meters per year. The paper considers the process of recycling of reservoir banks on the example of the Volgograd reservoir.

Aim. Development of a methodology for studying and forecasting the process of reshaping of reservoir banks using remote sensing.

Materials and methods. The data of 1980—1990 on the actual magnitude of bank reprocessing of the Volgograd reservoir were collected, processed and analyzed, and the coastal territory was typified. It is proposed to use remote sensing materials to obtain the values of coastal overbanking for the period from the 1990s to the present time. Forecasting of the process of reformation of reservoir banks is carried out on the basis of application of mathematical statistics methods.

Results. On the basis of solving the set tasks, a universal new methodology for studying and forecasting reservoir bank reformation was proposed. The methodology was tested on the materials of the Volgograd reservoir.

Conclusion. The proposed new methodology makes it possible to obtain data on the dynamics of the Volgograd reservoir bank reformation process and to make a forecast for the next 10 years. This methodology can be used to study the process of bank reformation of large reservoirs.

Keywords: reshaping of reservoir banks, monitoring, remote sensing, engineering-geological zoning, methods of mathematical statistics, process forecasting

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

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

For citation: Stepanova M.V., Ekzaryan V.N. Study into the reshaping process of large reservoir banks using remote sensing. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):60—68. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-60-68>

Manuscript received 27 April 2024

Accepted 25 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Введение

Создание больших и малых водохранилищ, вызванное размахом строительства гидротехнических сооружений, привело к интенсивному размыву берегов. Основными процессами, которые оказывают отрицательное влияние на береговую инфраструктуру, являются: переформирование берегов, оползни, овражная эрозия, подтопление, заболачивание и другие. Характер распространения и интенсивность указанных процессов на водохранилищах определяются особенностями

зонально-климатических и регионально-геологических условий территорий.

Под непосредственной опасностью размыва оказались многочисленные населенные пункты, промышленные предприятия, отдельные здания и сооружения. Составление генеральных схем освоения прибрежной территории и планирование переноса зданий и сооружений из зоны, находящейся под угрозой, требует детального изучения инженерно-геологических условий территории с целью прогнозирования возможного размыва и потери земель.

Материалы и методы

В 40—70-е годы XX века после строительства ГЭС перед специалистами возникла проблема организации и проведения постоянных наблюдений за развитием природно-техногенных процессов на прибрежных территориях созданных водохранилищ [1].

Создание крупных и малых искусственных водоемов-водохранилищ привело не только к резкому изменению динамики водных масс в естественных водотоках, но также к активизации старых и возникновению новых экзогенных геологических процессов (ЭГП), происходящих в прибрежной зоне водохранилищ.

В частности, наиболее сильное воздействие на береговые склоны водохранилищ Волжского каскада (ВВК) оказывает абразионная переработка. Она приводит к полному разрушению береговой зоны и выведению из землепользования сельскохозяйственных и лесных угодий, а также территорий населенных пунктов [11]. Трудно оцениваемый ущерб наносится при размыве плодороднейших черноземов и урбанизированных территорий. Многолетние наблюдения показывают, что темпы этого процесса имеют устойчивую тенденцию к стабилизации (в отличие от оползневого процесса). Максимальные величины переработки берегов приурочены к начальному периоду эксплуатации водохранилищ, и в настоящее время средняя скорость абразии на размываемых участках ВВК составляет 1,5—5,0 м/год. Пораженность береговых уступов водохранилищ абразионной переработкой различна. Абсолютные значения ее зависят как от интенсивности распространения и развития процесса, так и от размеров водохранилища. Например, для наиболее крупных ВВК протяженность берегов, подверженных переработке, и их доля от общей протяженности береговой линии составляет [12]:

1. Рыбинское водохранилище — 252 км, 10%;
2. Горьковское водохранилище — 630 км, 28%;
3. Куйбышевское водохранилище — 1000 км, 40%;
4. Саратовское водохранилище — 600 км, 40%;
5. Волгоградское водохранилище — 850 км, 57%.

В настоящее время ведутся бессистемные режимные наблюдения за процессами переформирования берегов практически всех ВВК.

Основной целью исследования является разработка методики изучения и прогнозирования процесса переформирования берегов крупных водохранилищ с использованием материалов дистанционного зондирования.

Переформирование берегов водохранилищ представляет собой совокупность воздействия ЭГП, возникающих при создании и эксплуатации водохранилищ и приводящих к деформациям прибрежных территорий [3, 9, 10].

Переформирование берегов водохранилищ приводит к изменению первоначальной формы и положения береговых склонов, подтопленных при образовании водохранилища, выражающееся в разрушении надводной части склона различными факторами и образовании аккумулятивной береговой отмели [8].

Переформирование берегов водохранилищ — процесс сложный и многофакторный. Отдельными учеными выделяется свыше 40 факторов, влияющих на его интенсивность. Для изучения информативности факторов процесса переработки берегов могут использоваться три метода: качественный, графический и количественный.

Качественный метод основан на использовании колоссального объема априорных знаний. Как отмечает Р. Эшби [13], априорная информация включает в себя опыт многих миллионов лет эволюции и частный опыт жизни данного человека и образует своеобразную «предпрограмму», облегчающую человеку решение самых различных задач.

Для оценки информативности факторов процесса переформирования берегов водохранилища использовался метод экспертного опроса. Составленный список-перечень известных нам факторов процесса переработки берегов был распространен среди специалистов, изучающих ЭГП. Каждый специалист, основываясь на собственном опыте и знаниях, разделял все факторы по их значимости в процессе переформирования берегов на три группы: инварианты, коварианты и моноварианты [6].

После специальной обработки материала и проведения повторного опроса специалистов составляется классификация факторов по их значимости в процессе переформирования берегов.

Графический метод. Для изучения особенностей влияния гидрометеорологических факторов на процесс переформирования берегов водохранилищ при решении плоской задачи необходимо подобрать некоторое количество створов, охваченных многолетними стационарными наблюдениями за величиной переработки берега и факторами, определяющими его интенсивность. По выбранным створам собираются в фондах Росгидромета РФ, обрабатываются и рассчитываются показатели гидрометеорологических

параметров (скорость ветра, высота и повторяемость волн, энергия волнения и другие).

Для каждого из выбранных створов необходимо построить графики изменения величин переработки берега и гидрометеорологических факторов во времени.

На основании количественного метода являются наиболее репрезентативные факторы переработки берегов водохранилища (инварианты), определяющие интенсивность изучаемого процесса. С помощью методов корреляционного анализа определяется теснота связи этих факторов с величиной переработки берега. В расчетах, как правило, используются средние значения величины переработки берега и некоторых факторов за определенный (заданный) период наблюдений. Выбор периода обусловлен наличием наибольшей информации о количественных характеристиках факторов и величинах переработки берега по этим створам.

Особое место в исследовании занимает разработка методики прогноза процесса переформирования берегов водохранилищ с помощью методов дистанционного зондирования, поскольку прогнозы имеют непосредственный практический интерес. Кроме того, прогнозирование процесса и проверка прогнозов путем их сопоставления с данными фактических наблюдений позволяет глубже изучить физическую природу процесса и совершенствовать методы его моделирования и прогнозирования.

Методика исследования включает три этапа.

Первый этап представляет собой сбор, анализ и обработку материалов по n-му количеству ключевых участков изучаемого водохранилища за 10-летний период наблюдений. Так, например, по Волгоградскому водохранилищу были подобраны и проанализированы фактические величины переработки берегов (ВПБ) за период 1980—1990-х годов. За тот же период времени по материалам дистанционного зондирования на тех же участках определяются показатели, характеризующие процесс переработки берегов. Обработка информации осуществляется путем сопоставления данных мониторинговых наблюдений и материалов дистанционного зондирования [7].

На втором этапе исследования проводится инженерно-геологическое районирование территории с последующей ее типизацией по степени активности процесса переработки.

Районирование прибрежных территорий водохранилищ по существующим данным мониторинговых наблюдений за 10-летний период

за процессом переработки позволит выделить различные типы участков (рис. 1). Для каждого типа территории вероятностная модель изменения изучаемого процесса будет своя.

В частности, на водохранилищах Волжского каскада выделяются три типа участков:

- высокие склоновые оползни;
- полускальные породы правого берега р. Волги;
- песчано-глинистые склоны надпойменных террас левого берега р. Волги: сарпинской и хвалынской.

Перед районированием территории стоят две задачи: выделение однородных в инженерно-геологическом отношении участков побережья и уточнение их границ по интенсивности процесса переработки берегов.

Для решения первой задачи проводится общее инженерно-геологическое районирование береговой зоны, основанное на известных принципах таксономического районирования, разработанных И.В. Поповым [5]. Однородность выделенных участков при общем районировании определяется рассмотрением основного комплекса инженерно-геологических факторов.

Основной целью общего инженерно-геологического районирования является получение региональной инженерно-геологической характеристики береговой зоны водохранилища.

Н.В. Коломенским [4] и В.В. Дмитриевым [2] было предложено для выделения однородных по интенсивности процесса переформирования берегов водохранилищ (ППБВ) участков использовать принцип районирования по фактической ВПБ. Однако отсутствие равнозначных данных о ВПБ по всему периметру водохранилища и различие кинематических характеристик ППБВ для разных створов ставят в практических исследованиях задачу «комплексирования» принципов районирования по ВПБ, или — в общем случае — кинематическим характеристикам ППБВ с принципами районирования по ряду берегоформирующих факторов.

В качестве кинематических характеристик ППБВ можно использовать: ход процесса во времени, в виде кинематических моделей ППБВ; суммарную ВПБ за период существования водохранилища. Однако с помощью этих характеристик можно выделить однородные только в ретроспективе, по отношению к размыву, участки. Различия геолого-гидрометеорологических условий этих участков не дают возможности считать их однородными в перспективе. Поэтому необходимо одновременное проведение типизации береговой



Рис. 1. Пример типизации прибрежной территории по степени активности процесса переработки берега
Fig. 1. An example of typifying a coastal area by the degree of shoreline recycling activity

зоны водохранилища по комплексу факторов, отражающих геолого-литологическое строение и морфологические условия береговых склонов, а также гидрометеорологические характеристики собственно водохранилища (высота и повторяемость волн, ширина длин разгона волн по румбам, скорость ветра, энергия волнения и другие). Только совместный учет этих факторов и условий позволяет выделить однородные в отношении проявления процесса переработки берега участки. Как показал анализ многолетних наблюдений и исследований на ВВК, именно факторы и условия прибрежной территории и акватории определяют интенсивность процесса переформирования береговых склонов и в перспективе используются в качестве исходных данных при моделировании и прогнозировании берегообрушения.

Это можно сделать с помощью рассмотрения при специальном инженерно-геологическом районировании характеристик основных факторов ППБВ, например коэффициента размываемости пород берегового склона, высоты абразионного уступа, энергии волнения и др.

Например, в основу общего инженерно-геологического районирования береговой зоны Волгоградского водохранилища положены принципы таксонометрического районирования И.В. Попова [5].

1. Водохранилище относится к выделенным по структурно-тектоническому признаку регионам:

1.1. Правый берег — VI регион Томковского поднятия;

1.2. Левый берег — IX регион восточной части Прикаспийской флексуры (северная часть) и X регион Прикаспийской синеклизы (южная часть водохранилища).

2. По геоморфологическому признаку выделяются области:

2.1. Правый берег — область приволжских низких гор;

2.2. Левый берег — область Волжских и Каспийских террас (регион IX) и область северо-западной лиманной части Прикаспийской низменности (регион X).

Это тот региональный фон, по которому проводилось, в развитие принципов И.В. Попова, более детальное типологическое районирование.

3. На прибрежных территориях Волгоградского водохранилища выделяется три типа инженерно-геологических районов:

I — распространения четвертичных отложений;

II — распространения палеогеновых отложений;

III — распространения меловых отложений.

Районы I типа занимают все низкое левобережье водохранилища: по правому берегу

он приурочен только к узким долинам волжских притоков. Береговые уступы здесь сложены разнотеррасными и связными породами четвертичного возраста: песками, супесями хазарского яруса ($alQ_{III}srp$), слоистыми «шоколадными» глинами хвалынского яруса ($mQ_{III}hv$), песками и супесями хазарского яруса ($alQ_{III}hz$), обладающими весьма низкой сопротивляемостью размыву.

За 10-летний период существования водохранилища величина переработки берега в районах I типа, как правило, была не менее 50 м, за исключением заливов и зон с полузатопленными островами. Местами же эта величина достигала 200—250 м, что привело к большой потере сельскохозяйственных земель и необходимости переноса жилых домов и целых населенных пунктов.

В отличие от районов I типа районы II и III типов сложены довольно устойчивыми к размыву коренными породами.

Районы II типа охватывают правый берег водохранилища (от южной окраины с. Щербаковка до плотины Волгоградской ГЭС). Береговые уступы сложены нижнесызранскими опоками (Q_1sz_1), среднесызранскими песками (Q_1sz_2), а также песками и песчаниками с прослоями глин камышинской (Q_1k), пролейской (Q_1pr) и царицынской свит (Q_2tz) нижнего и среднего палеогена. Величина переработки берега за 10-летний период колеблется в среднем от 20 до 50 м, местами уменьшаясь до нуля.

Районы III типа включают в себя правый берег водохранилища от г. Саратова до южной окраины с. Щербаковка. Размываемые уступы здесь сложены плотными песками и глинами альбского яруса нижнего мела (K_1al), песками сеноманского (K_2cm), мергелями туронского (K_2t), опоками и глинами сантонского ярусов (K_2cn) верхнего мела.

Характерной особенностью геологического строения этого района является наличие глинистых толщ нижнего мела, являющихся водоупором наиболее водообильного водоносного горизонта, заключенного в вышележащих песках сеноманского яруса. Это обусловило широкое распространение в пределах районов этого типа крупных оползневых деформаций, связанных с местами выхода глинистых толщ выше уреза «старой» Волги. Как правило, ВПБ за 10-летний период не превышает 30 м, а местами размывы практически отсутствуют.

4. Инженерно-геологические районы по геоморфологическим условиям расчленены на участки. В пределах береговой зоны Волгоградского водохранилища имеют место два основных типа гео-

морфологических поверхностей: волжские террасы и водораздельные пространства (и, соответственно, два типа участков: А и Б).

Участки типа А объединяют в себе прибрежные территории распространения только аккумулятивных форм рельефа (надпойменные террасы р. Волги и ее притоков). Участки типа Б включают в себя как высокие эрозионно-аккумулятивные террасы, так и водораздельные пространства.

5. По признаку генетического типа склона выделены инженерно-геологические подучастки (обвально-осыпные и оползневые). Весь район I типа, а также некоторые участки районов второго и третьего типов включают в себя только один генетический тип берегового склона — обвально-осыпной. В районе III типа наблюдаются оба генетических типа склона, причем оползневый является господствующим.

Полученные материалы являются основой при выборе типов ключевых участков, по которым с использованием метода приближенного инженерно-геологического подобия можно осуществить прогнозирование процесса переформирования берегов водохранилищ.

Третий этап — создание вероятностных моделей проявления процесса переформирования берегов водохранилищ.

С помощью методов математической статистики [11] фактическую величину переработки берега (среднюю по участку) сравнивают с величиной берегообрушения, полученной с помощью дешифрирования материалов дистанционного зондирования за тот же период времени по данной территории. Полученные регрессионные уравнения являются математическими моделями, отражающими связь фактических ВПБ с данными дистанционного зондирования, а коэффициенты корреляции отражают степень этой связи [7].

Необходимо провести сравнительный анализ процесса переработки берегов по выделенным типам во времени. При идентичном протекании процесса можем говорить о том, что типы выделены по геолого-литологическому строению склона, которые отражают физику процесса и могут быть использованы в качестве критериев подобия.

Сопоставление полученных данных позволяет сделать вывод о наличии взаимосвязи между показателями фактических наблюдений за переработкой берегов водохранилищ и данными, полученными в результате дешифрирования материалов дистанционного зондирования, а также используется для построения математической модели взаимосвязи материалов дистанци-

онного зондирования с ВПБ за заданный период времени.

С учетом этого по выявленным закономерностям для идентичных по геолого-литологическому строению береговых склонов возможно сделать предварительный прогноз переработки берегов, используя только данные дистанционного зондирования.

Таким образом, материалы дистанционного зондирования становятся дополнительной основой получения мониторинговых режимных наблюдений за процессом переформирования берегов водохранилищ.

Для решения основной задачи работы — составления прогнозов процесса переформирования берегов водохранилищ используем метод стохастических моделей. Стохастические модели могут быть двух видов: кинематические и динамические. Стохастический характер модели означает: во-первых, прогноз по ним составляется в вероятностном аспекте и, во-вторых, вероятностно-статистическими методами.

Кинематическая модель ППБВ (денудационной части процесса) в общем виде записывается:

$$y = f(t),$$

где y — величина переработки берега, м; t — время.

Зная характер эмпирических кривых для различных водохранилищ на разные сроки, можно заметить, что они могут быть аппроксимированы различными видами функций (линейной, показательной, степенной, логарифмической и др.).

Построение динамических стохастических моделей процесса переработки берега существующих водохранилищ проводится по следующей методической схеме:

- 1) постановка геологической задачи (выбор геологической модели);
- 2) постановка математической задачи (выбор вида математической модели);
- 3) решение математической задачи;
- 4) геологическая интерпретация математического решения.

В перспективе модели перманентно будут пополняться материалами фактических данных и материалами дистанционного зондирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Решение поставленных задач позволит разработать универсальную методику изучения и прогнозирования переформирования берегов водохранилищ. С помощью инженерно-геологического районирования и типизации прибрежных территорий возможно выделить различные типы ключевых участков для проведения сравнительного анализа с материалами дистанционного зондирования за определенный период наблюдений.

Сопоставление данных позволит установить взаимосвязь между фактическими наблюдениями и показателями, полученными при дешифрировании материалов дистанционного зондирования, материалы которых в дальнейшем лягут в основу построения математических моделей для выявленных типов участков, по которым с использованием метода приближенного инженерно-геологического подбора можно осуществить предварительный прогноз процесса переработки берегов водохранилищ.

Заключение

Методика изучения и прогнозирования процесса переформирования берегов крупных водохранилищ с использованием материалов дистанционного зондирования позволит восполнить мониторинговые данные протекания процесса переформирования берегов водохранилищ с середины 1990-х годов по настоящее время, а также дать предварительный прогноз процесса на последующие годы. Так, например, с середины 1990-х годов сеть режимных наблюдений за процессом переформирования на водохранилищах Волжского каскада пришла в упадок. Благодаря предлагаемой методике можно проследить динамику процесса за годы, когда мониторинговые наблюдения не проводились.

ЛИТЕРАТУРА

1. Адад М.М., Комаров И.С., Экзарьян В.Н. Проблема контроля изменений геологической среды в зоне влияния гидротехнических сооружений // Проблемы биосферы. Информационный бюллетень 1985. № 10. С. 5—14.
2. Дмитриев В.В. Исследование факторов, влияющих на переработку берегов водохранилищ: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., 1974.
3. Инженерная геодинамика / Ред. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. М.: Изд-во: КДУ, 2015.
4. Коломенский Н.В. Применение идеи о формациях при инженерно-геологическом картировании // Известия высших учебных заведений «Геология и разведка». 1970. № 4. С. 77—83.

5. Попов И.В. Инженерная геология СССР. Часть 1. М.: Изд-во МГУ, 1961.
6. Розовский Л.Б. Введение в теорию геологического подобия и моделирования. М.: «Недра», 1969.
7. Степанова М.В. Особенности переформирования берегов Волгоградского водохранилища // «Геоэкологические проблемы техногенного этапа истории земли — 2023»: сб. мат-лов Междунар. науч.-практич. конф., Москва, 12—13 октября 2023 года. М.: НИМГСУ, 2023. С. 131—133.
8. СТО 70238424.27.140.042-2009: Гидроэлектростанции. Долговременные наблюдения за развитием техноприродных процессов в зоне взаимодействия оснований и сооружений. Нормы и требования.
9. Трофимов В.Т. Инженерная геология. М.: Изд-во МГУ, 2023, 573 с.
10. Трофимов В.Т. Теоретические аспекты инженерной геологии // Инженерная геология. 2019. Т. 14, № 3. С. 79.
11. Экзарьян В.Н. Перманентное моделирование и прогнозирование экзогенных геологических процессов. — Тр. Международной конференции «Проблемы инженерной геодинамики и экологической геодинамики», М., МГУ, 2006 г.
12. Экзарьян В.Н., Степанова М.В. Переформирование берегов водохранилищ как фактор социально-экологической опасности // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: мат-лы 8 науч.-практич. конф., Воронеж, 10—13 сентября 2023 года. Воронеж: «Кварт», 2023. С. 113—115.
13. Ashby M.F. Materials selection in mechanical design (2nd ed.). Oxford, OX: Butterworth-Heinemann, 1999. P. 407. ISBN 0-7506-4357-9. OCLC 49708474.

REFERENCES

1. Adas M.M., Komarov I.S., Ekzaryan V.N. The problem of controlling changes in the geological environment in the zone of influence of hydraulic structures // Problems of the biosphere. Information Bulletin 1985. No. 10. P. 5—14.
2. Dmitriev V.V. Study of factors influencing the processing of reservoir banks. Moscow, 1974.
3. Engineering geodynamics / Eds. Bondarik G.K., Pendin V.V., Yarg L.A. Moscow: Publishing house KDU, 2015
4. Kolomensky N.V. Application of the idea of formations in geotechnical mapping // Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration. 1970. No. 4. P. 77—83.
5. Popov I.V. Engineering geology of the USSR. Part 1. Moscow State University Publishing House, 1961.
6. Rozovsky L.B. Introduction to the theory of geological similarity and modeling. Moscow: "Nedra", 1969.
7. Stepanova M.V. Features of reshaping the banks of the Volgograd Reservoir // Geoecological problems of the technogenic stage of the history of the earth — 2023: Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 12—13, 2023. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering, 2023. P. 131—133.
8. СТО 70238424.27.140.042-2009: Hydroelectric power plants. Long-term observations of the development of techno-natural processes in the zone of interaction between foundations and structures. Norms and requirements.
9. Trofimov V.T. Engineering geology. Moscow: Moscow University Publishing House, 2023, 573 p.
10. Trofimov V.T. Theoretical aspects of engineering geology // Engineering Geology. 2019. T. 14, no. 3. P. 79.
11. Ekzaryan V.N. Permanent modeling and forecasting of exogenous geological processes // Proceedings of the International conference "Problems of engineering geodynamics and environmental geodynamics". Moscow: Moscow State University, 2006.
12. Ekzaryan V.N., Stepanova M.V. Reformation of the banks of reservoirs as a factor of socio-ecological danger // Environmental geology: theory, practice and regional problems: Materials of the eighth scientific and practical conference, Voronezh, September 10—13, 2023. Voronezh: "Kvarta", 2023. P. 113—115.
13. Ashby M.F. Materials selection in mechanical design (2nd ed.). Oxford, OX: Butterworth-Heinemann, 1999. P. 407. ISBN 0-7506-4357-9. OCLC 49708474.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Степанова М.В. — внесла основной вклад при выполнении исследования (сбор, анализ и обработка материалов, проведение инженерно-геологического районирования, разработка методики прогноза процесса переформирования берегов водохранилищ с помощью методов дистанционного зондирования), подготовила текст статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Maria V. Stepanova — Made the main contribution to the research (collection, analysis and processing of materials, engineering-geological zoning, development of a methodology for forecasting the process of reservoir bank reformation using remote sensing methods), prepared the text of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

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

Vladimir N. Ekzaryan — Made a major contribution to the conceptualization of the article, gave final approval of the published version of the article, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Степанова Мария Владимировна* — аспирант ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: Stepanova-Mariya2702@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4917-5649>

Maria V. Stepanova* — postgraduate student, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: Stepanova-Mariya2702@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4917-5649>

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, г. Москва 117997, Россия

e-mail: vnekzar@rambler.ru

SPIN-код: 7968-3231

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3961-8003>

Vladimir N. Ekzaryan — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Professor, Head of the Department of Ecology and Nature Management, 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/0000-0003-3961-8003>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>
УДК 624.131.523



ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ВСАСЫВАНИЯ ГЛИНИСТЫХ НЕПОЛНОСТЬЮ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СКЛОНА

М.А. НОВГОРОВА^{1,*}, Д.Н. ГОРОБЦОВ¹, А.С. УШАКОВ²

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

² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт
оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсевича —
структурное подразделение АО «НИЦ «Строительство»»
6, стр. 12, 2-я Институтская ул., г. Москва 109428, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В данной статье рассмотрены основные аспекты влияния давления всасывания на устойчивость склона с примером расчета в программном обеспечении Plaxis. Авторы детально рассматривают особенности поведения ненасыщенного и насыщенного грунта, а также представляют модель описания поведения насыщенного грунта под воздействием этого давления.

Цель. Советские гидрофизики и почвоведы активно исследовали зависимость между капиллярно-сорбционным (структурным, или матричным [2]) давлением воды в грунте и влажностью. Однако с внедрением в инженерно-геологическую практику расчетов устойчивости склонов зарубежных методик и основанного на них программного обеспечения возникает вопрос — влияет ли давление всасывания глинистых грунтов на устойчивость склона?

Материалы и методы. Основным материалом выполненного исследования являются суглинки московского оледенения, а в качестве основы для моделирования выбрана модель Муалема — Ван Генухтена.

Результаты. Моделирование показало, что давление всасывания и капиллярность непосредственным образом влияют на коэффициент устойчивости склона (при условии, что остальные параметры моделей идентичны между собой).

Ключевые слова: механика неводонасыщенных грунтов, характеристическая кривая грунт — вода SWCC, модель Муалема — Ван Генухтена, расчет устойчивости склона

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Новгорода М.А., Горобцов Д.Н., Ушаков А.С. Влияние давления всасывания глинистых неполностью водонасыщенных грунтов на устойчивость склона. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):69—79.

<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>

Статья поступила в редакцию 15.04.2024

Принята к публикации 27.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

INFLUENCE OF SUCTION PRESSURE OF CLAY UNSATURATED SOILS ON SLOPE STABILITY

MARGARITA A. NOVGORODOVA^{1,*}, DENIS N. GOROBTSOV¹, ANDREY S. USHAKOV²

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

² Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC
6, p. 12, 2nd Institutskaya str., Moscow 109428, Russia

ABSTRACT

Background. The main aspects of the influence of suction pressure on slope stability are considered; an example of calculations in the Plaxis software is presented. Specific features in the behavior of unsaturated and saturated soils are described. A model for describing the behavior of saturated soil under the influence of suction pressure is proposed.

Aim. Soviet hydrophysic and soil scientists actively explored the relationship between capillary-sorption (structural or matrix) water pressure in the soil and humidity. However, the introduction of foreign methods and software based thereon into the engineering and geological practice of calculating the stability of slopes has raised the question about the influence of suction pressure of clay soils on the stability of slopes.

Materials and methods. The main research material was loams of the Moscow glaciation. Simulation was carried out based on the Mualllem — van Genuchten model.

Results. The simulation results showed that suction pressure and capillarity directly affect the slope stability coefficient, provided that the similarity of other model parameters.

Keywords: unsaturated soil mechanics, soil–water characteristic curve SWCC, Mualllem — van Genuchten model, slope stability calculation

Conflict of interest: financial disclosure: no financial support was provided for this study.

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

For citation: Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N., Ushakov A.S. Influence of suction pressure of clay unsaturated soils on slope stability. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):69—79. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>

Manuscript received 15 April 2024

Accepted 27 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Одним из важных факторов, который может оказать влияние на устойчивость склона, сложенного глинистыми неводонасыщенными грунтами, является давление всасывания глинистых грунтов. В данной работе рассмотрены основные аспекты этого явления, его влияние на характеристики грунта, а также представлена модель описания поведения грунта под воздействием давления всасывания.

Теория

Ненасыщенный грунт представляет собой многофазовую систему, состоящую из твердых частиц, воды, газов и сократительной оболочки — уникальной фазы границы раздела воздух — вода [8].

Поведение полностью насыщенного грунта определяется полным напряжением и поровым давлением воды через эффективное напряжение [3]. В случае насыщенных грунтов возникает положительное поровое давление воды, которое расталкивает частицы и уменьшает прочность грунта. Положительное поровое давление создает условия для притяжения воды к частицам грунта и образования связей между ними, т.е. абсорбции — процесса поглощения воды всем объемом грунта.

В ненасыщенном грунте пустоты заполняются воздухом и водой, в результате чего силами поверхностного натяжения создается отрицательное поровое давление воды. Это воздействие

способствует сжатию частиц грунта и увеличению его прочности. Комплексное понимание этих процессов и их моделирование имеют важное значение для правильной оценки состояния грунта и его поведения в различных условиях.

В однородной модели насыщенного грунта, как показано на рисунке 1, две фазы — вода и твердые частицы — сосуществуют и разделяют пространство в зависимости от пористости грунта. Все переменные в этой модели непрерывны и зависят от пространства и времени.

В однородной модели ненасыщенного грунта (рис. 2) существуют три фазы: вода, воздух и твердые частицы. Пространство также разделяется в зависимости от пористости грунта и объемного содержания воды. Все переменные в этой модели также являются непрерывными и зависят от пространства и времени.

Абсорбция воды именно глинистыми грунтами способствует возникновению капиллярности. Капиллярность — это явление подъема или опускания жидкости в узких каналах (капиллярах) под воздействием сил поверхностного натяжения, т.е. вода, попадая в поры грунта, движется по капиллярам — маленьким трубкам. Капиллярность играет важную роль в ненасыщенном грунте, особенно в грунтах, содержащих глинистые частицы, которые имеют большую площадь поверхности, что позволяет им активно поглощать воду и другие вещества. В порах грунта, имеющих различные размеры и формы, можно концептуально рассмотреть капиллярные трубки с различными радиусами. Равновесие кривизны менисков [4] возможно только в порах определенного размера, соответствующего данному капиллярному давлению.

Давление всасывания — это отрицательное давление, которое возникает в порах грунта, частично насыщенного водой, в результате капиллярного поднятия воды. В глинистых грунтах капиллярность и давление всасывания являются двумя связанными понятиями, ведь оба явления возникают из-за действия сил на границе раздела между грунтом и водой. Поскольку капиллярность и давление всасывания определяют способность грунта удерживать влагу и сохранять свою структуру, то это, в свою очередь, влияет на физико-механические свойства глинистых грунтов. При этом большинство грунтов имеют остаточное содержание влаги из-за механизма удержания воды, отличного от капиллярности, называемого адсорбцией.

Адсорбция и абсорбция являются процессами поглощения одного вещества другим. В случае адсорбции вещество поглощается на поверхности другого вещества, а в случае абсорбции — проникает в объем. Ненасыщенные глинистые грунты представляют собой грунты, которые имеют высокую адсорбционную способность. Адсорбция может влиять на всасывание в грунтах, улучшая или ухудшая их водоудерживающую способность [16,18].

Давление всасывания возникает при изменении водосодержания в глинистых грунтах и представляет собой разность между атмосферным давлением и давлением в порах грунта. Если оно будет положительным, это может привести к снижению устойчивости склонов, так как вода, проникающая в поры грунта, увеличивает его влажность и снижает сцепление между частицами.

Для описания поведения воды и процессов, происходящих в ненасыщенных глинистых грунтах, используется уравнение Ричардса [1].

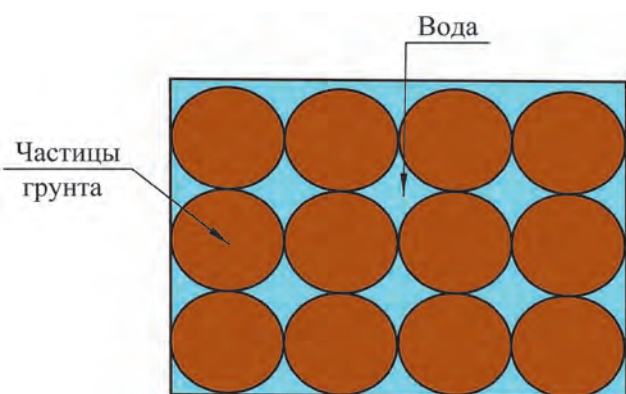


Рис. 1. Однородная модель насыщенного грунта
Fig. 1. Homogeneous saturated soil model

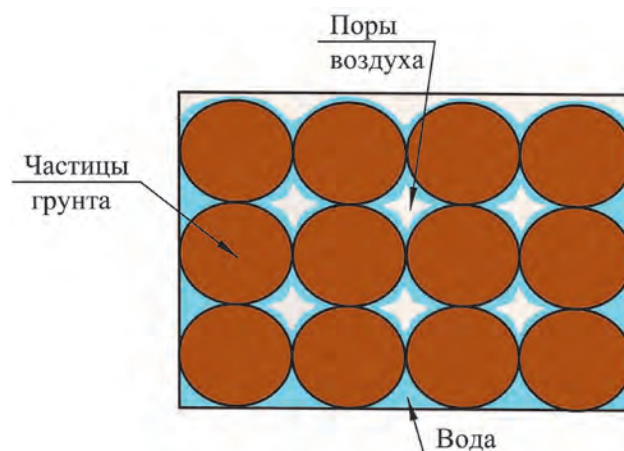


Рис. 2. Однородная модель ненасыщенного грунта
Fig. 2. Homogeneous unsaturated soil model

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right]. \quad (1)$$

Для решения уравнения Ричардса необходимы замыкающие соотношения (модели вододерживающей способности). Для этого используют алгебраические уравнения связи высоты всасывания ψ с влагосодержанием θ , называемые капиллярными соотношениями. Также нужны соотношения, связывающие коэффициент фильтрации $K(\psi)$ и высоту всасывания ψ . Одним из достаточно успешных вариантов решения является уравнение Муалема — Ван Генухтена. Модель ван Генухтена представляет собой математическую формулу, которая позволяет рассчитать объемную влажность грунта на основе его пористости, коэффициента влагопроводности (коэффициент влагопроводности аналогичен коэффициенту фильтрации, но применяется он для ненасыщенных грунтов) и других параметров. Таким образом, имеется подход к моделированию порового давления в ненасыщенных грунтах, учитывающий изменение пористости грунта и его проницаемости в зависимости от уровня влажности. Одна из широко используемых формулировок имеет вид [1]:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\psi|^n)^m}, & \psi < 0; \\ \theta_s, & \psi \geq 0; \end{cases} \quad (2)$$

$$K(\psi) = K_s S_{e,s}^l \left[1 - (1 - S_{e,s}^{\frac{1}{m}})^m \right]^2, \quad S_{e,s} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},$$

где $S_{e,s}$ — эффективная насыщенность;
 θ_r и θ_s — остаточное (т.е. не извлекаемое гравитационным путем) влагосодержание и влагосодержание при полном насыщении соответственно;
 K_s [м/сут] — коэффициент фильтрации в условиях насыщения;
 α [м⁻¹] — параметр модели, функция размера пор;
 n — коэффициент распределения размеров пор;
 $m = 1 - 1/n$, $n > 1$;
 l — параметр связности пор.

Решение модели Муалема — Ван Генухтена представлено в программном обеспечении Plaxis для геотехнических расчетов, но для этого необходимо использовать характеристическую кривую «грунт — вода» SWCC, построенную на основе лабораторных испытаний или принятую по рекомендациям для разных типов грунтов (рис. 3).

SWCC — интерпретирующая модель, которая использует элементарную капиллярную модель для обеспечения понимания распределения воды

в пустотах. Первоначально SWCC рассматривалась как средство оценки всасывания грунта в полевых условиях путем измерения содержания свободной воды и использования SWCC в качестве фиксированной зависимости между всасыванием и содержанием воды (рис. 4).

Связь кривой SWCC и влажности может быть выражена через параметр «структурное всасывание», который учитывает поровое давление воды в грунте, в том числе отрицательное. Таким образом, характеристическая кривая «грунт — вода» SWCC представляет собой отношение между структурным всасыванием (энергетическим потенциалом) и содержанием воды (гравиметрическим или объемным) или степенью водонасыщения (S_e) [17]. Для построения кривой необходимо определить структурное всасывание грунта в зависимости от влажности.

Структурное всасывание, или энергетический потенциал, представляет собой изменение свободной энергии в единице объема воды при изотермическом переходе из состояния связанной воды в состояние свободной воды и определяется в репрезентативном элементарном объеме грунт — вода — воздух. Структурное всасывание широко рассматривается как наиболее фундаментальная физическая переменная, определяющая поведение ненасыщенного грунта, в том числе эффективное напряжение, прочность на сдвиг, давление набухания, снижение температуры замерзания и теплопроводность.

В этом исследовании для определения, как общего, так и структурного всасывания [17, 20] выбран метод фильтровальной бумаги по причине простоты выполнения испытания, широкого диапазона измеряемых значений и достаточного количества апробации [14].

Метод основан на водопоглощающих свойствах фильтровальной бумаги, используемой в качестве фильтра. Путем взаимодействия с грунтовой средой фильтровальная бумага либо десорбирует, либо абсорбирует влагу до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие между фильтровальной бумагой и образцом грунта [13].

Влияние давления всасывания на устойчивость склона

Как уже говорилось выше, давление всасывания и капиллярность могут оказывать влияние на физико-механические свойства грунтов, а они, в свою очередь, воздействуют на величину коэффициента устойчивости склона. В качестве практического примера влияния давления

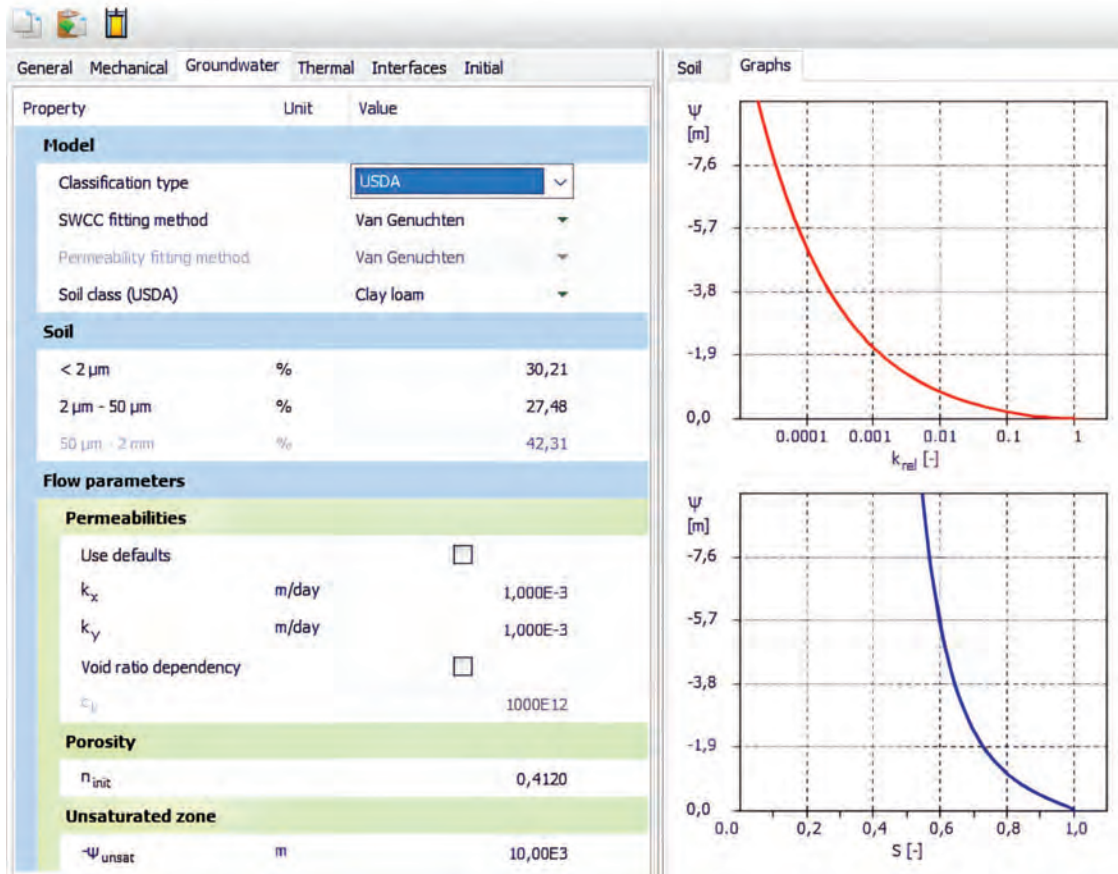


Рис. 3. Пример предлагаемой стандартизированной SWCC для тяжелых суглинков
Fig. 3. Example of a proposed standardized SWCC for heavy loams

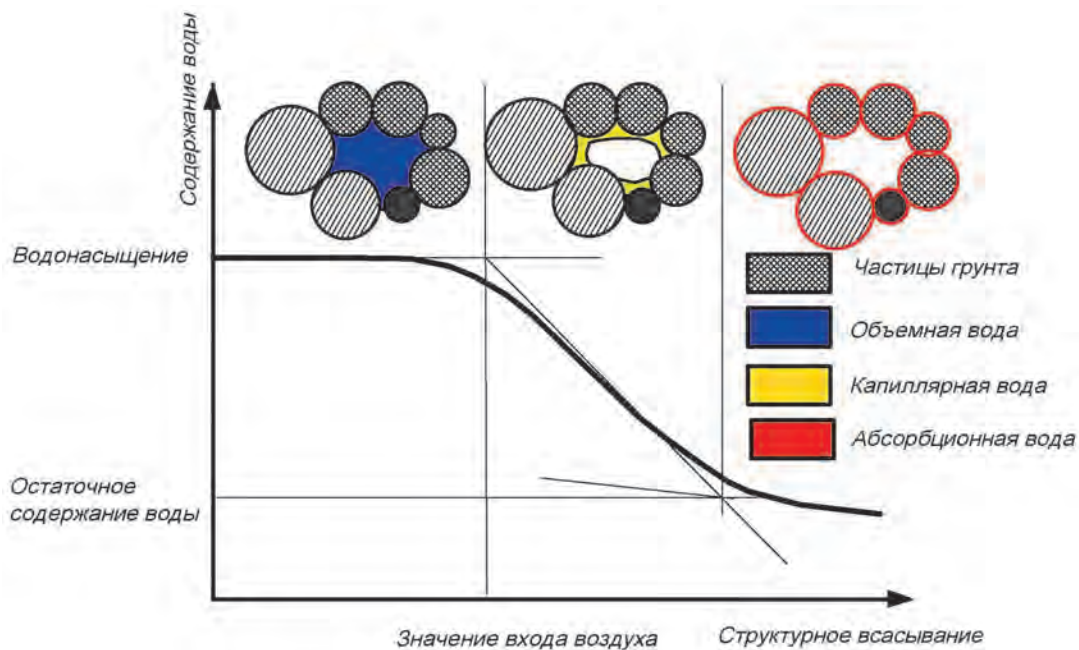


Рис. 4. Различные механизмы удержания воды в ненасыщенном грунте
Fig. 4. Various mechanisms of water retention in unsaturated soil

Таблица. Физико-механические свойства исследуемого грунта
Table. Physico-mechanical properties of the studied soil

Влажность, д. е.			Число пла- стич- ности, I_p , д. е.	Пока- затель теку- чести, I_L , д. е.	Плотность, г/см ³			Пори- стость грунта, n , д. е.	Кoeffи- циент пористо- сти, e , д. е.	Кoeffи- циент водона- сыщения, S_r , д. е.
есте- ственная (природ- ная), w_e	на гра- нице текуче- сти, w_L	на границе раскаты- вания, w_p			грун- та, ρ	сухого грун- та, ρ_d	частиц грунта, ρ_s			
0,241	0,295	0,164	0,125	0,59	1,98	1,62	2,72	0,41	0,701	0,93

Прочность			Деформируемость	
Кoeffициент вн. трения, $\operatorname{tg} \phi$	Угол внутреннего трения ϕ , градусы	Уд. сцепление C , МПа	Модуль деforma- ции E , МПа	Кoeffициент Пуассона, ν
0,302	16,8°	0,025	13,2	0,41

всасывания на устойчивость склона рассмотрим объект, расположенный в г. Зеленограде.

Инженерно-геологический разрез представлен:

- современными техногенными (насыпными) накоплениями tQIV, представленными суглинками тугопластичными; песками мелкими средней плотности;

- среднечетвертичными флювиогляциальными водно-ледниковыми и озерно-ледниковыми отложениями московского горизонта f,lgQII^{ms},

представленными суглинками мягко- и тугопластичными, редко заторфованными; песками мелкими средней плотности;

- среднечетвертичными ледниковыми отложениями московского горизонта gQII^{ms}, представленными суглинками тугопластичными; песками средней крупности, плотными.

При создании геомеханической модели для упрощения расчетов массив грунта представлял собой однородный грунт, сложенный

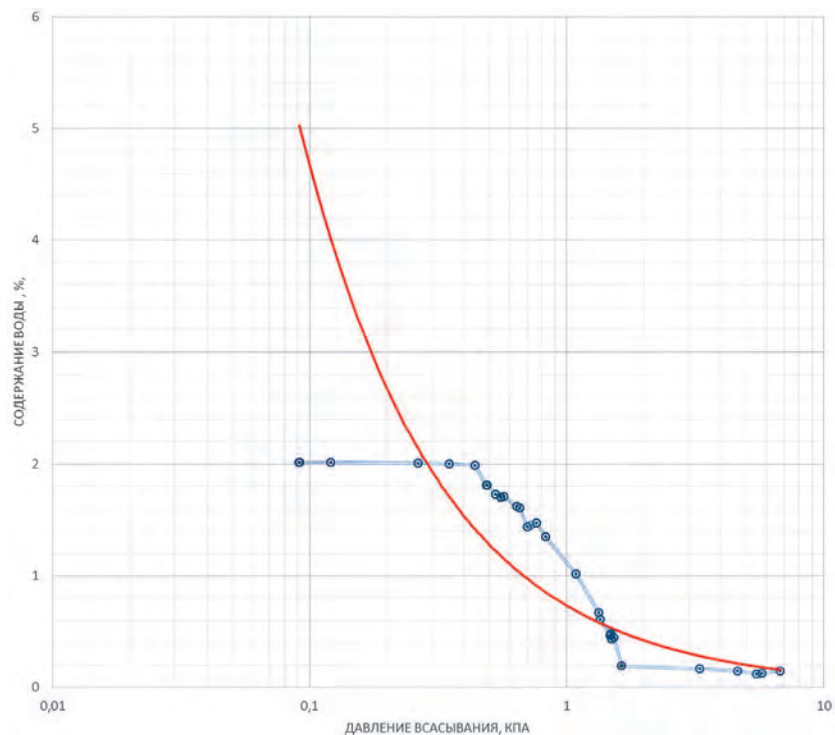


Рис. 5. Полученная характеристическая кривая «грунт — вода» SWCC для среднечетвертичных флювиогляциальных отложений

Fig. 5. Obtained characteristic soil—water curve SWCC for mid-Quaternary fluvioglacial deposits

суглинками мягко- и тугопластичными в естественном состоянии. В таблице приведены физико-механические свойства грунта.

Для рассматриваемого в модели грунта в лабораторных условиях бесконтактным и контактным методом фильтровальной бумаги [5—7, 12, 13, 19] для выборки из 30 образцов было определено содержание воды, по которым в соответствии с известной калибровочной кривой [15] получены значения полного и структурного всасывания. Далее была построена характеристическая кривая «грунт — вода» (рис. 5).

В дальнейшем в программном обеспечении Plaxis были выполнены расчеты без учета давления всасывания и с учетом давления всасывания, при этом все остальные параметры модели оставались неизменными [9—11].

Результаты моделирования представлены на рисунках 6—8.

Анализ рисунков показал, что коэффициент устойчивости склона без учета всасывания и капиллярности грунта, равен 1,46 (рис. 7). При учете всасывания и капиллярности коэффициент устойчивости повышается до 1,67 (рис. 8).

Если в процессе моделирования учитывать только давление всасывания без учета капиллярности (рис. 9), то коэффициент устойчивости составляет 1,66.

Заключение

В результате проведенного опыта можно сделать вывод о том, что давление всасывания и капиллярность могут влиять на свойства грунтов. Так, при повышении давления всасывания увеличивается влажность грунта, что может привести к снижению его прочности. Кроме того, увеличение давления всасывания может также привести к изменению структуры грунта, что также может повлиять на его свойства.

Таким образом, давление всасывания может оказывать влияние на устойчивость склона через его воздействие на физико-механические свойства грунта. Если давление всасывания приводит к увеличению влажности грунта и снижению его прочности, это может снизить коэффициент устойчивости склона и, следовательно, сделать склон менее устойчивым, что было показано в выполненном моделировании.

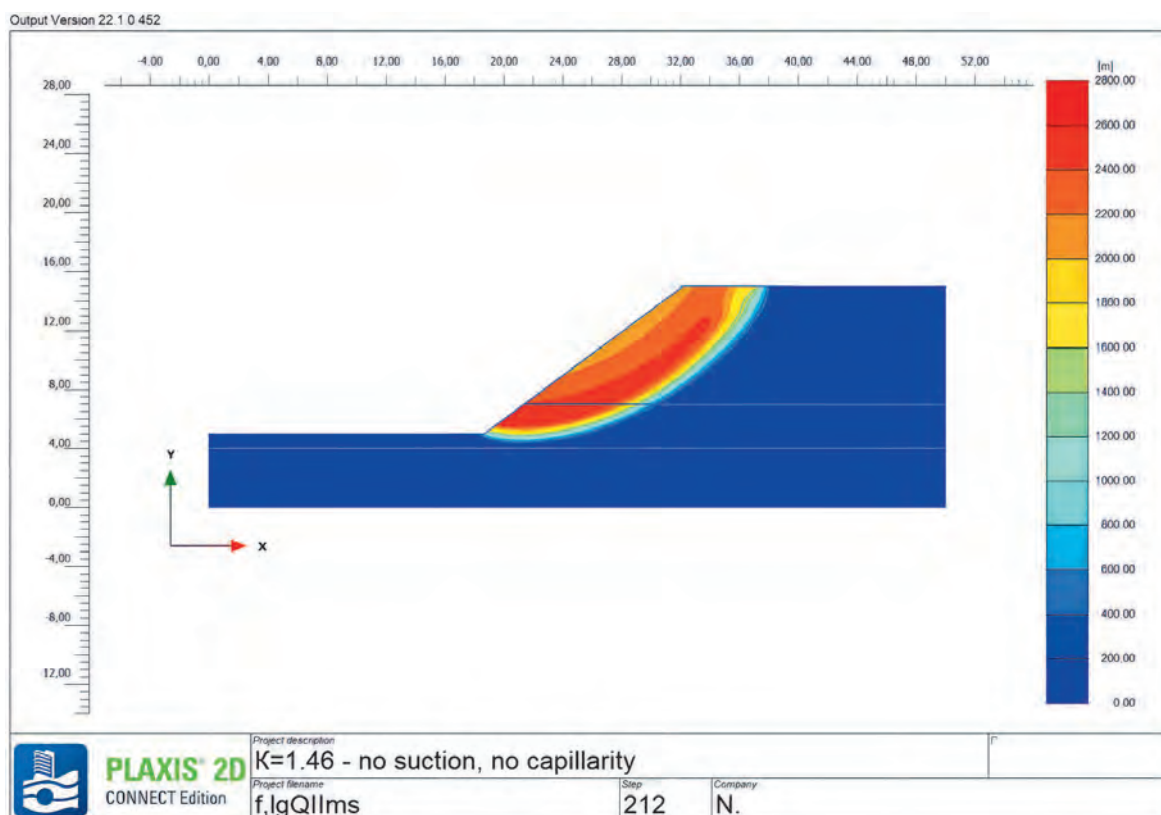


Рис. 6. Расчет устойчивости склона без учета давления всасывания и капиллярности

Fig. 6. Calculation of slope stability without taking into account suction pressure and capillarity

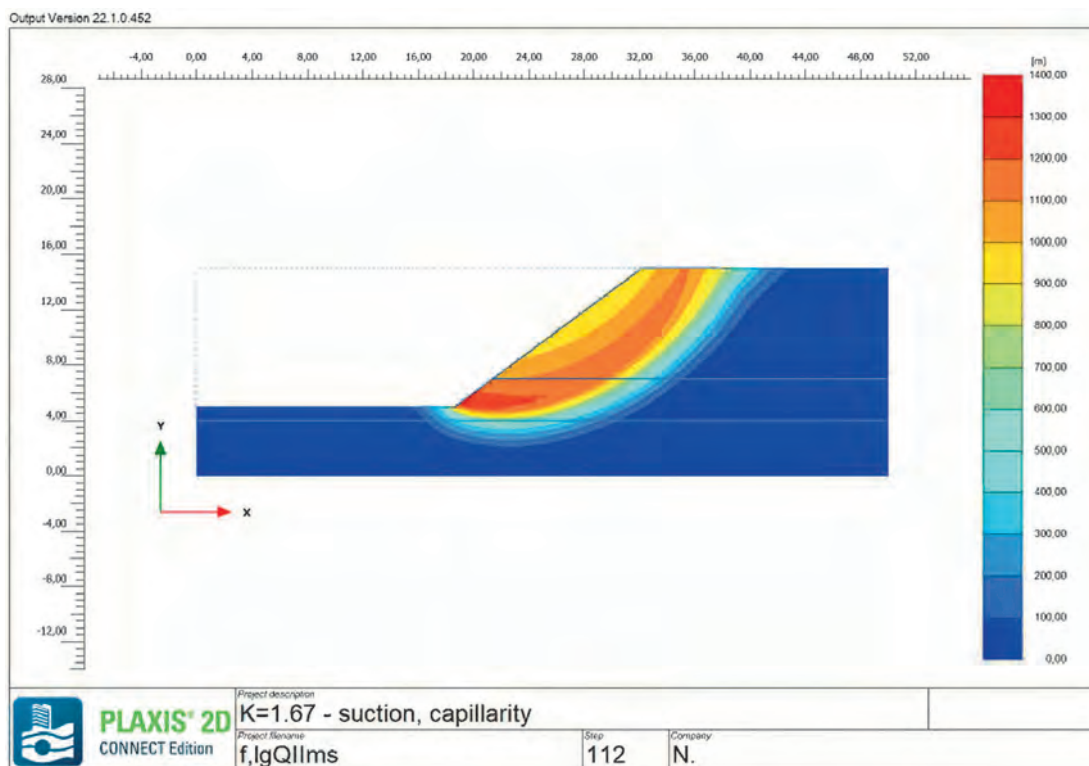


Рис. 7. Расчет устойчивости склона с учетом давления всасывания и капиллярности
Fig. 7. Calculation of slope stability taking into account suction pressure and capillarity

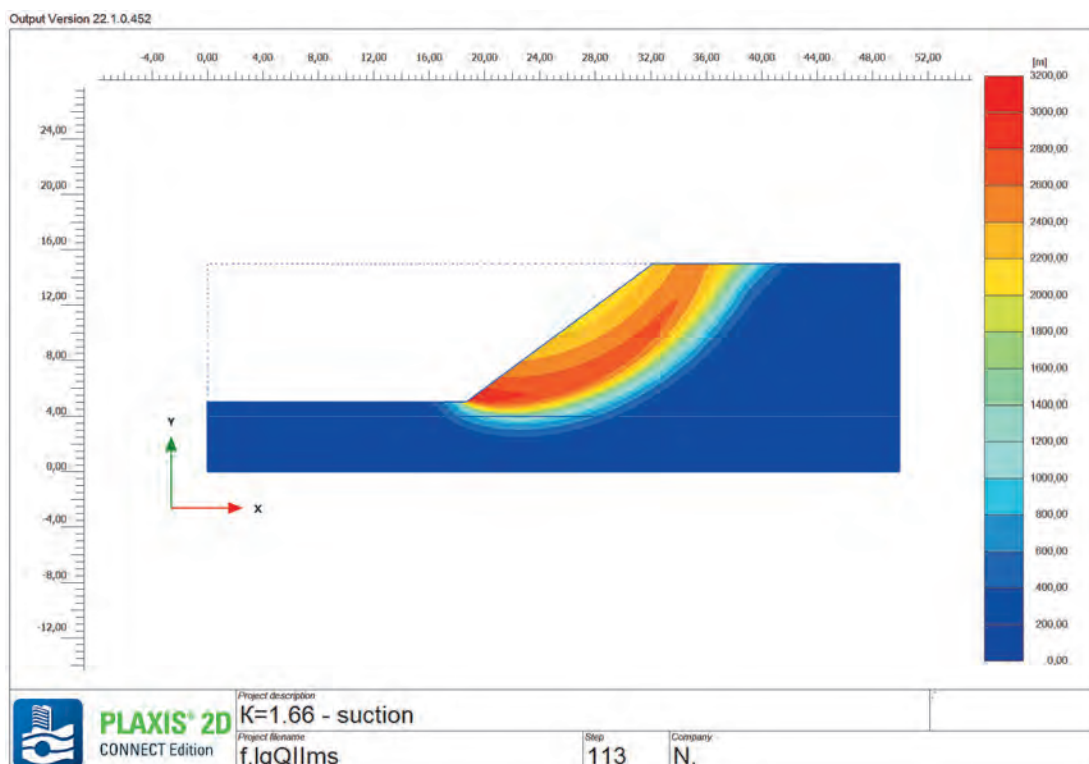


Рис. 8. Расчет устойчивости склона с учетом только давления всасывания
Fig. 8. Calculation of slope stability considering only suction pressure

ЛИТЕРАТУРА

- Бахаев А.Н., Машенькин П.А., Сидоров М.Л. Модели насыщенно-ненасыщенной и напорно-безнапорной фильтрации в комплексе программ «НИМФА» // ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 3. С. 73—83.
- Болдырев Г.Г., Колесников А.С., Новичков Г.А. Интерпретация результатов лабораторных испытаний с целью определения прочностных характеристик грунтов // Инженерные изыскания. 2014. № 5—6. С. 78—85.
- Гольдин А.Л., Нгуен Фьонг Зунг. Построение траектории напряжений для ненасыщенного грунта при консолидированно-недренированных испытаниях в стабилометре // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 9. С. 1—8.
- Дугарцыренов А.В. Физико-химическая модель связной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 8. С. 80—88.
- Мади Ахмед Йехиа Али Али. Экспериментальные исследования и моделирование динамики влажности и температуры почвы: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2018. 25 с.
- Новгородова М.А. Определение параметров всасывания ненасыщенных грунтов методом фильтровальной бумаги // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации: мат-лы 17-й общеросс. науч.-практич. конф. и выставки изыскательских организаций / Под ред. Н.А. Журавлевой и К.С. Висхаджиевой. М.: Геомаркетинг, 2022. С. 39—51.
- Новгородова М.А., Горобцов Д.Н. Экспериментальное определение давления всасывания ненасыщенных глинистых грунтов // VI российское совещание по глинам и глинистым минералам «ГЛИНЫ-2023». СПб.: ИГЕМ РАН, 2023. С. 111—113.
- Новгородова М.А., Горобцов Д.Н., Фоменко И.К. Теория ненасыщенных грунтов // Новые идеи в науках о Земле: мат-лы XV междунар. науч.-практич. конф. В 7 тт. М.: РГГУ им. С. Орджоникидзе, 2021. С. 273—276.
- Скоробогатько К.В. Механика грунтов насыщенной и неводонасыщенной области грунта // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. 2022. URL: <https://midasoft.ru/blog/mekhanika-gruntov-nasyshchennoy-i-nevodonasyshchennoy-oblasti-grunta/> (дата обращения: 02.03.2024).
- Скоробогатько К.В. Моделирование свойств грунта в неводонасыщенной области выше уровня грунтовых вод // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/modelirovanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-vyshe-urovnya-gruntovykh-vod/> (дата обращения: 05.03.2024).
- Скоробогатько К.В. Влияние свойств грунта в неводонасыщенной области на результаты расчетов // Специализированные расчетные комплексы MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/vliyanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-na-rezultaty-raschetov/> (дата обращения: 04.03.2024).
- ASTM D5298-03. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-03>
- ASTM D5298-2016. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
- Fondjo A.A., Elizabeth Theron, Richard P. Ray. Assessment of Various Methods to Measure the Soil Suction // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075 (Online). Vol. 9 Iss. 12, October 2020. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L7958.1091220/>
- Fredlund D.G., Wong D.K. Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction // Geotechnical Testing Journal. 1989. No. 12(3). P. 188—194. <https://doi.org/10.1520/GTJ10967J>
- Fredlund D.G., Rahardjo H., Fredlund M.D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. 2012. 944 p.
- Leong E.C., He L., Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements // Geotechnical Testing Journal. 2002. No. 25(3). P. 322—333. <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>
- Lu N., Likos W.J. Unsaturated soil mechanics. 2004. Wiley. 584 p. ISBN: 978-0-471-44731-3
- Meilani I., Rahardjo H., Leong E.C., Fredlund D.G. Mini suction probe for matric suction measurements / Canadian Geotechnical Journal. № 39(6). 2002. P. 1427—1432. <https://doi.org/10.1139/t02-101>
- Swarbrick, G.E. Measurement of soil suction using the filter paper method // Conference: Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at ASCE Civil Engineering Conference 2001. P. 241—263. [https://doi.org/10.1061/40592\(270\)14](https://doi.org/10.1061/40592(270)14)

REFERENCES

- Bakhaev A.N., Mashenkin P.A., Sidorov M.L. Models of saturated-unsaturated and pressure-non-pressure filtration in the NIMFA program complex // VANT, ser. Mathematical modeling of physical processes. 2019. Vol. 3. pp. 73—83.
- Boldyrev G.G., Kolesnikov A.S., Novichkov G.A. Interpretation of the results of laboratory tests to determine the strength characteristics of soils // Engineering surveys. 2014. No. 5—6. pp. 78—85.
- Goldin A.L., Nguyen Phuong Dung. Construction of a stress trajectory for unsaturated soil during consolidated undrained tests in a stabilometer // Engineering and Construction Journal. 2012. No. 9. P. 1—8.
- Dugartsyrenov A.V. Physico-chemical model of cohesive rock // Mining Information and Analytical Bulletin. 2007. No. 8. P. 80—88.

5. Madi Ahmed Yehia Ali Ali. Experimental studies and modeling of the dynamics of soil moisture and temperature: abstract of thesis. dis. ... cand. biol. sci. M., 2018. 25 p.
6. Novgorodova M.A. Determination of suction parameters of unsaturated soils using the filter paper method // Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation: materials of the 17th All-Russian. scientific-practical conf. and exhibitions of survey organizations / Ed. ON THE. Zhuravleva and K.S. Viskhadzhieva. M.: Geomarketing, 2022. pp. 39—51.
7. Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N. Experimental determination of suction pressure of unsaturated clay soils // VI Russian meeting on clays and clay minerals "CLAYS-2023". SPb.: IGEM RAS, 2023. pp. 111—113.
8. Novgorodova M.A., Gorobtsov D.N., Fomenko I.K. Theory of unsaturated soils // New ideas in Earth sciences: materials of the XV international. scientific-practical conf. In 7 vols. M.: Russian State University for the Humanities named after. S. Ordzhonikidze, 2021. pp. 273—276.
9. Skorobogatko K.V. Soil mechanics of saturated and unsaturated soil areas // Specialized calculation systems MIDAS. 2022. URL: <https://midasoft.ru/blog/mekhanika-gruntov-nasyshchennoy-i-nevodonasyshchennoy-oblasti-grunta/> (access date: 03/02/2024).
10. Skorobogatko K.V. Modeling of soil properties in a non-water-saturated area above the groundwater level // Specialized calculation systems MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/modelirovanie-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-vyshe-urovnya-gruntovykh-vod/> (access date: 03/05/2024).
11. Skorobogatko K.V. Influence of soil properties in a non-water-saturated area on the calculation results // Specialized calculation systems MIDAS. URL: <https://midasoft.ru/blog/vliyaniye-svoystv-grunta-v-nevodonasyshchennoy-oblasti-na-rezultaty-raschetov/> (access date: 03/04/2024).
12. ASTM D5298-03. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-03>
13. ASTM D5298-2016. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper. Pages: 6. <https://doi.org/10.1520/D5298-16>
14. Fondjo A.A., Elizabeth Theron, Richard P. Ray. Assessment of Various Methods to Measure the Soil Suction // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075 (Online). Vol. 9 Iss. 12, October 2020. <https://doi.org/10.35940/ijitee.L7958.1091220/>
15. Fredlund D.G., Wong D.K. Calibration of thermal conductivity sensors for measuring soil suction // Geotechnical Testing Journal. 1989. No. 12(3). P. 188—194. <https://doi.org/10.1520/GTJ10967J>
16. Fredlund D.G., Rahardjo H., Fredlund M.D. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA. 2012. 944 p.
17. Leong E.C., He L., Rahardjo H. Factors affecting the filter paper method for total and matrix suction measurements // Geotechnical Testing Journal. 2002. No. 25(3). P. 322—333. <https://doi.org/10.1520/GTJ11094J>
18. Lu N., Likos W.J. Unsaturated soil mechanics. 2004. Wiley. 584 rub. ISBN: 978-0-471-44731-3
19. Meilani I., Rahardjo H., Leong E.C., Fredlund D.G. Mini suction probe for matric suction measurements / Canadian Geotechnical Journal. No. 39(6). 2002. P. 1427—1432. <https://doi.org/10.1139/t02-101>
20. Swarbrick, G.E. Measurement of soil suction using the filter paper method // Conference: Shallow Foundation and Soil Properties Committee Sessions at ASCE Civil Engineering Conference 2001. P. 241—263. [https://doi.org/10.1061/40592\(270\)14](https://doi.org/10.1061/40592(270)14)

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Новгородова М.А. — является основным автором статьи, участвовала в написании и редакции текста статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Горобцов Д.Н. — сгенерировал цель исследования, поставил задачи исследования и участвовал в редакции текста статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Ушаков А.С. — проанализировал результаты исследования, подготовил данные и выполнил расчеты и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Margarita A. Novgorodova — is the main author of the article, participated in the writing and editing of the text of the article and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Denis N. Gorobtsov — generated the purpose of the study, set the research objectives, participated in the editing of the text of the article, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Andrey S. Ushakov — analyzed the research results, prepared the data, performed the calculations, and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Новгородова Маргарита Алексеевна* — преподаватель кафедры инженерной геологии гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: marga_97@mail.ru

тел.: +7 (909)-639-17-27

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Горобцов Денис Николаевич — кандидат геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой инженерной геологии, гидрогеологического факультета ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: dngorobtsov@mail.ru

тел.: +7 (925) 664-59-28

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Ушаков Андрей Сергеевич — инженер Научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсееванова — структурное подразделение АО «НИЦ «Строительство»».

6, стр. 12, 2-я Институтская ул., г. Москва 109428, Россия

e-mail: u20.andrey@gmail.com

тел.: +7 (962) 985-25-88

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0956-7393>

Margarita A. Novgorodova* — teacher of Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia

e-mail: marga_97@mail.ru

tel.: +7 (909) 639-17-27

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4629-1969>

Denis N. Gorobtsov — Cand. Sci. (Geol.-Min.), head of Department of Engineering Geology, Faculty of Hydrogeology, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23 Mikluho-Maklay str., Moscow 117997, Russia

e-mail: dngorobtsov@mail.ru

tel.: +7 (925) 664-59-28

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1232-6652>

Andrey S. Ushakov — engineer of Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC. 6, p. 12, 2nd Institutskaya str., Moscow 109428, Russia

e-mail: u20.andrey@gmail.com

tel.: +7 (962) 985-25-88

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0956-7393>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ВЕЩЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РОССЫПНОГО ЗОЛОТА РУЧЬЯ ВЕТВИСТЫЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ВЫЯВЛЕНИЯ РОССЫПЕЙ С НЕТИПИЧНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ В РАЙОНЕ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ р. СЕЛЕННЯХ (МОМСКИЙ, АБЫЙСКИЙ РАЙОН (ЯКУТИЯ))

А.М. ПРАСОЛОВ^{1,2,*}, О.В. ВЛАДИМИРЦЕВА²

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

² ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии»
Российской академии наук
33, пер. Старомонетный, г. Москва 119017, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Значительная распространенность аллювиальных россыпей золота в районе нижнего-среднего течения р. Селеннях (Момский, Абыйский улус Республики Саха (Якутия)) при отсутствии явных потенциальных коренных источников ставит задачу выявления источников питания этих россыпей.

Цель. Охарактеризовать источники золота, формирующего россыпи междуречья Селеннях — Индигирка, и оценить возможность наращивания ресурсного потенциала исследуемого района.

Материалы и методы. Проведен анализ материалов работ предшественников на исследуемой площади. Методом микрозондового анализа (ЦКП ИГЕМ РАН) исследован вещественный состав аллювиального золота, отобранного в рамках полевых работ на ручье Ветвистый (правый приток р. Селеннях) в 2020—2021 годах, изучен минеральный состав тяжелой шлиховой фракции.

Результаты. Установлено, что источник питания россыпи — промежуточный коллектор (неогеновые песчаные отложения). Выявлены пути транзита золота внутри россыпи, что теоретически позволяет локализовать обогащенные пласты в питающих россыпь отложениях.

Заключение. Для успешного восполнения минерально-сырьевой базы золота, в том числе в труднодоступных регионах (Арктической зоне РФ), помимо возобновления региональных тематических работ необходимо создание новых прогнозно-поисковых моделей, в том числе для выявления нетипичных месторождений полезных ископаемых, в данном случае — россыпей, в которые золото поступает из неогеновых отложений, заполняющих крупные кайнозойские впадины в районе исследования (западное обрамление Яно-Индигирской низменности).

Ключевые слова: россыпи, золото, Арктическая зона России, промежуточный коллектор, неоген, третичные отложения

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в молодежной лаборатории ИГЕМ РАН «Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований» в рамках темы государственного задания «Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей».

Благодарности: Авторы выражают благодарность Ковальчук Елене Владимировне (ИГЕМ РАН) за проведение исследования вещественного состава золотин электронно-зондовым микроанализом на микроанализаторе JXA-8200, Лейбгам Полине Никодимовне

(ФБГУ «ЦНИГРИ») за техническую помощь в организации фотографирования золотин и минералов шлиховой фракции на микроскопе Leica S9D, ООО «Селенях» за содействие.

Для цитирования: Прасолов А.М., Владимирцева О.В. Вещественная характеристика россыпного золота ручья Ветвистый и перспективы выявления россыпей с нетипичными источниками питания в районе среднего течения р. Селеннях (Момский, Абыйский район (Якутия)). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):80—90. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-80-90>

Статья поступила в редакцию 05.06.2024

Принята к публикации 24.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

MATERIAL CHARACTERISTIC OF VETVISTY CREEK PLACER GOLD AND PROSPECTS FOR ATYPICAL-SOURCE DEPOSITS IN THE MIDDLE COURSE OF THE SELENNYAKH RIVER (MOMSKY AND ABYISKY DISTRICT, YAKUTIA)

ALEXANDER M. PRASOLOV^{1,2,*}, OLGA V. VLADIMIRTSEVA²

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

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

ABSTRACT

Background. The lower-middle course of the Selennyakh River in the Momsky and Abyisky districts of the Republic of Sakha, Yakutia, is characterized by a wide distribution of alluvial gold placers. The absence of obvious potential primary sources of these placers raises the question of their identification.

Aim. To identify sources of gold placers found in interfluvial area of the Selennyakh and Indigirka rivers, as well as to assess the gold-bearing potential of this area.

Materials and methods. The data on the studied area obtained in previous works was analyzed. Microprobe analysis (CSRIF IGEM RAS) was used to study the composition of alluvial gold grains sampled during field works in the Vetvisty Creek, the right tributary of the Selennyakh River, conducted in 2020–2021. The mineral composition of heavy concentrate was also studied.

Results. The source of the gold placer under study was established to be an intermediate reservoir, i.e., Neogene coarse sand and gravel. Possible paths of gold transit within the placer were revealed. Theoretically, this allows enriched layers in the sediments feeding the placer to be localized.

Conclusion. In order to replenish the gold mineral base of the country, including in such hard-to-reach regions as the Arctic zone of the Russian Federation, regional research projects should be resumed. In addition, new models should be developed for forecasting and prospecting of atypical placer deposits, with gold sources from Tertiary sediments filling large Cenozoic depressions in the western rim of the Yano-Indigirskaya lowland).

Keywords: placers, gold, Arctic zone of the Russian Federation, intermediate reservoir, Neogene, Tertiary sediments

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

Financial disclosure: The investigation was carried out at the “Laboratory of prognostic and metallogeny studies” IGEM RAS. State assignment is “Application of modern methods of assessment, search and forecasting of solid mineral deposits, including strategic ones, in the Arctic zone of the Russian Federation for the purpose of expanding the mineral resource base and planning the development of transportation and communication networks”.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to Kovalchuk Elena Vladimirovna (IGEM RAS) for conducting the study of the material composition of the gold pellets by electron-probe microanalysis on the microanalyzer JXA-8200, Leibgam Polina Nikodimovna (FSBI TSNIGRI) for technical assistance in the organization of photographing gold grains and minerals of the heavy concentrate on the microscope Leica S9D, LLC "Selenyakh" for assistance.

For citation: Prasolov A.M., Vladimirtseva O.V. Material characteristic of Vetvisty creek placer gold and prospects for atypical-source deposits in the middle course of the Selennyakh river (Momsky and Abyisky district, Yakutia). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):80—90. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-80-90>

Manuscript received 05 June 2024

Accepted 24 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Введение

Исследуемый район территориально относится к Момскому и Абыйскому районам Республики Саха (Якутия). Гидрографически относится к междуречью р. Индигирка и ее левого притока р. Селеннях в его среднем течении. Минерагенически район принадлежит к Колымо-Омолонской минерагенической провинции.

Территория располагается на западном обрамлении Яно-Индигирской низменности — болотистой местности, сформировавшейся в пределах крупных кайнозойских впадин. Основание впадин позднемеловое, сами впадины заполнены палеогеновыми и неогеновыми отложениями псаммитового состава, мощность которых по данным бурения [10] достигает первых сотен метров. Кайнозойские впадины залегают на палеозой-мезозойском основании, которое представлено породами различных структурно-вещественных комплексов.

Вопрос золотоносности третичных толщ Яно-Колымской низменности изучался фрагментарно, хотя золотоносные проявления известны. Одно из таких — долина руч. Чалкин (первый приток р. Селеннях в его нижнем течении), где в 1980-х годах производилось поисковое бурение [10], которое показало содержания золота в первые граммы на тонну (в среднем $0,5 \text{ г/м}^3$) на мощности более десятков метров (рис. 1).

Аллювий ручья Чалкин представлен песками с галечно-гравийным материалом, плотик сложен слабосцементированными конгломератами с редкими прослоями песка (0,5—1,5 м) чалкинской свиты. В результате бурения ЯНГРЭ в 1981—82 гг. [10] установлено, что конгломераты чалкинской свиты золотоносны, содержания золота

достигают нескольких г/м^3 , составляя в среднем $0,5 \text{ г/м}^3$ на наиболее продуктивных интервалах мощностью до 50 метров. Сам руч. Чалкин содержит россыпь, золото представлено в основном пластинчатыми и чешуйчатыми хорошо окатанными золотинами. Участок входит в состав одноименного прогнозируемого россыпного узла, с оценкой ресурсов по категории РЗ в пределах 64 тонн (паспорт учёта перспективного объекта прогнозных ресурсов категории РЗ № 5661155, ФГБУ «ВСЕГЕИ»), главным источником золота в котором являются неогеновые конгломераты чалкинской свиты.

Наличие мощной зоны конгломератов, описанной А.И. Некрасовым [4] по западному обрамлению неоген-палеогеновых отложений Яно-Индигирской низменности (Абыйская и пр.), указывает в первую очередь на масштабность явления и позволяет с некоторой долей допущения экстраполировать «чалкинский» пример на значительную часть кайнозойских впадин Яно-Индигирской низменности. В 30 км от участка р. Чалкин расположено еще несколько золотороссыпных проявлений (руч. Ветвистый, руч. Берелех), которые локализованы в малых (первые десятки км) линейных кайнозойских впадинах. В рамках исследования была изучена россыпь золота на руч. Ветвистый с целью выяснения источника поступления золота в россыпь и его связь с третичными отложениями кайнозойских впадин

Объект исследований

Ручей Ветвистый, расположенный в 400 км к западу от пгт. Белая гора административного центра Абыйского улуса Республики Саха (Якутия),

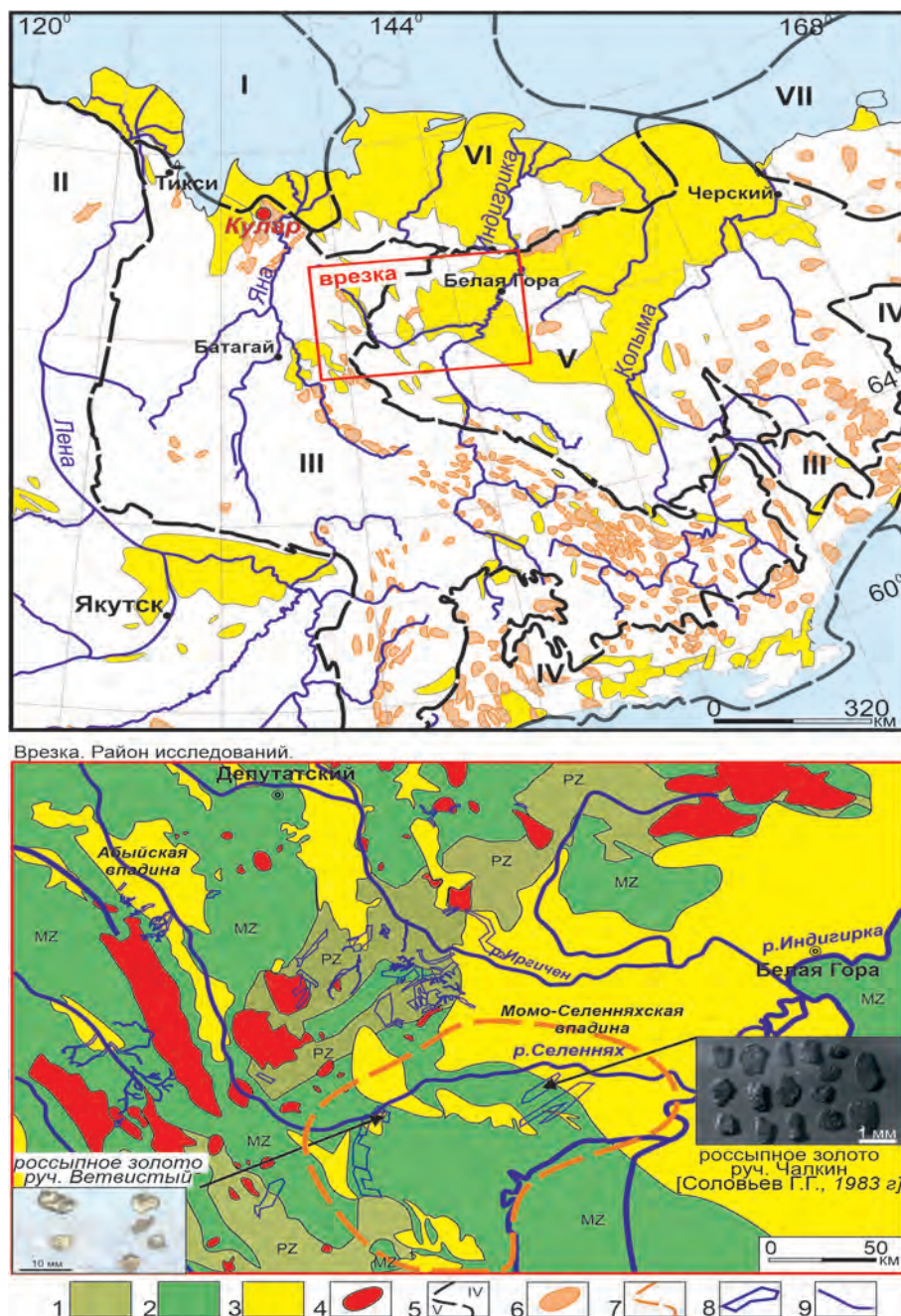


Рис. 1. Схема расположения района исследований: 1 — палеозойские комплексы пород, 2 — мезозойские комплексы пород, 3 — палеоген-неогеновые отложения кайнозойских впадин, 4 — мезозойские интрузии, 5 — границы минерагенических провинций. Латинские цифры: Провинции I — Лаптевоморская, II — Восточно-Сибирская, III — Верхояно-Колымская, IV — Охотско-Чукотская, V — Колымо-Омолонская, VI — Ляховско-Святоноская, VII — Колымо-Чукотская, 6 — рудно-россыпные узлы, 7 — потенциально перспективная область для выявления золотоносных неогеновых отложений и россыпей золота связанных с ними, 8 — лицензии на пользование недрами (золото россыпное), 9 — водотоки

Fig. 1. Location scheme of the research area: 1 — Paleozoic rock complexes, 2 — Mesozoic rock complexes, 3 — Paleogene-Neogene sediments of Cenozoic troughs, 4 — Mesozoic intrusions, 5 — boundaries of mineralogenic provinces. Latin numerals: I — Laptevomorskaya, II — Vostochno-Sibirskaya, III — Verkhoyano-Kolymskaya, IV — Okhotsko-Chukotskaya, V — Kolymo-Omolonskaya, VI — Lyakhovsko-Svyatonoskaya, VII — Kolymo-Chukotskaya, 6 — ore and placer nodes, 7 — potentially promising area for identification of gold-bearing Neogene sediments and gold placers associated with them, 8 — licenses for subsoil use (alluvial gold), 9 — watercourses

является правым притоком реки Селенных в его среднем течении (рис. 2). Ручей представляет собой водоток 2-го порядка с U-образной долиной. Хорошо выражена I надпойменная терраса, имеющая высоту бровки порядка 1,5—2 м, ширина площадки террасы достигает 30—50 м, длина ручья составляет порядка 6 км. Аллювий представлен песчано-галечными отложениями мощностью от 1 м (в верховьях) до более 3 м (в нижнем течении). Породы плотика представлены слабосцементированными песчаниками уяндинской свиты [3]. Ручей Рыжий — водоток 1-го порядка с V-образной долиной, является левым притоком руч. Ветвистый в его среднем течении. Протяженность ручья составляет около 700 метров. Аллювиальные отложения представлены песчано-галечным материалом, встречаются валуны (до 30—40 %), мощность песчаных отложений — 1—1,5 м. Породы плотика представлены гравеллитами уяндинской свиты [3].

Как было установлено в результате предыдущих исследований [3], ручей Ветвистый дренирует

песчанистые отложения уяндинской свиты (неоген). Отложения свиты с угловым несогласием залегают на мезозойских толщах. Уяндинская свита представлена галечниками с прослоями песков разнозернистых, алевроитов, присутствуют лигнитизированные растительные остатки [8]. Мощность отложений в обрывах рек до 20—70 м, наблюдаемая мощность отложений в долине руч. Ветвистый составляет 15—20 метров [3].

Методы исследования

Полевые наблюдения проводились в 2020—2021 гг. в рамках геологического изучения участка «Ветвистый» ООО «Селенных» [3] и заключались в шлиховом опробовании руч. Ветвистый и его притока руч. Рыжий. Всего было отобрано более 134 шлиховых проб, а также пройдено несколько шурфов мускульным способом глубиной от 1,5 до 3 метров.

Морфологический и ситовой анализ золота проводился с использованием сит стандартных диаметров, описание форм золотин выполнено

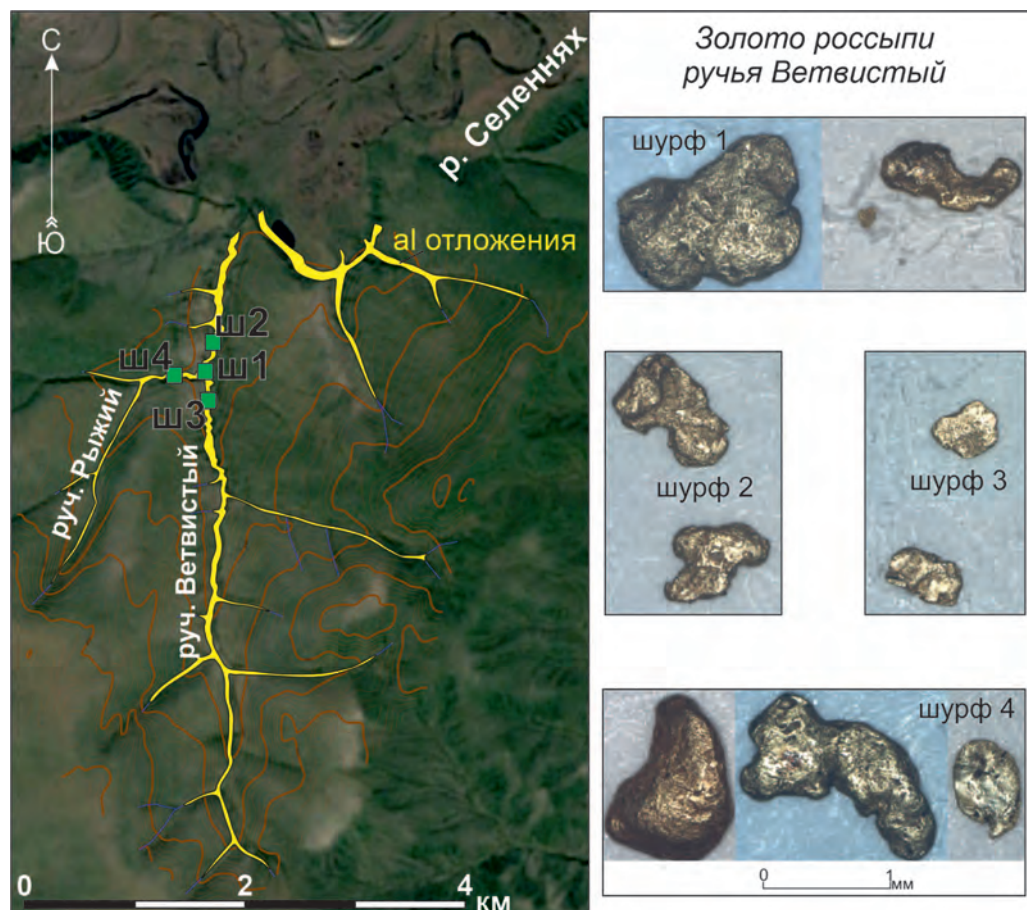


Рис. 2. Схема расположения шурфов в долине руч. Ветвистый
Fig. 2. Scheme of pits location in the valley of Vetvisty stream

в соответствии с рекомендациями, разработанными ФГБУ «ЦНИГРИ» [2, 5, 6].

Для анализа тяжелой фракции шлихов был проведен качественный минералогический анализ на микроскопе Leica S9D в ФГБУ «ЦНИГРИ».

Для оценки вещественных особенностей аллювиального золота был исследован химический состав золотин методом электронно-зондового микроанализа на микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL в ЦКП «ИГЕМ-аналитика». Всего было проведено 59 измерений на 23 золотилах, отобранных со слияния руч. Рыжий и руч. Ветвистый. Золотины относятся к различным классам крупности. Классы крупности: $-0,5 + 0,25$ мм (6 шт.), $-1,0 + 0,5$ мм (15 шт.), $-2,0 + 1,0$ мм (2 шт.).

Результаты исследования

Установлено [3], что наибольшую промышленную значимость имеют аллювиальные отложения руч. Ветвистый ниже его слияния с руч. Рыжим (относительно большие объемы рыхлого материала и содержания золота от 0,5 до 1,5 г/м³). Также золотоносными являются аллювиальные отложения всей долины руч. Ветвистого (в том числе руч. Рыжего и других притоков руч. Ветвистый).

Шлиховая фракция представлена преимущественно минералами немагнитной фракции (в основном касситерит). В электромагнитной фракции преобладает ильменит и гранат. Минералы магнитной фракции не обнаружены. Также отмечается циркон, форстерит, цоизит, кварц, сидерит, монацит. Минералы определялись по внешнему виду, оптическим свойствам и форме кристаллов. Материал тяжелой фракции шлихов россыпи большей частью мелкозернистый (меньше 0,25 мм), реже средний (0,25—1,00 мм).

Золото ручья видимое, в основном мелкое. Доминирующий класс крупности золота 0,25—1 мм (70—80 весовых процентов), хотя встречаются и золотины размеров 3×3 мм. Золотины имеют преимущественно хорошую и среднюю степень окатанности (рис. 3). Встречаются пластинчатые, комковидные (наиболее крупные), чешуйчатые и сложные по форме зерна. На части пластинчатых золотин обнаружены закатанные края. Большинство золотин имеют ярко-желтый цвет, однако встречаются зерна и серебристых оттенков (до 30%). Блеск золотин металлический, поверхность, в основном, мелкоямчатая и бугорчатая. На части золотин (10%) отмечается бурый налет гидроокислов железа (железистые рубашки). Некоторые зерна сформированы из нескольких золотин меньшего размера, что наблюдается

и невооруженным глазом, и при исследовании золота под микроскопом, полностью отсутствуют сростки золотин с другими минералами [7].

По результатам электронно-зондового микроанализа установлено, что золотины относятся к существенно различным группам по пробности (рис. 4): 2 высокосеребристые золотины (пробность ниже 600‰), 3 относительно низкопробные (пробность от 700 до 800‰), 8 золотин средней пробности (пробность 800—900‰), 8 высокопробных золотин (900—950‰) и 2 весьма высокопробные (выше 950‰). Средняя пробность золота составила 841‰. По данным работ предшественников [9], пробность золота руч. Ветвистый составила от 766 до 871‰.

Помимо серебра (рис. 4), в части золота установлены примеси меди (до 0,07%), железа (до 0,08%) и ртути (до 7,5%). При этом зависимость наличия примесей от пробности золота не выявлена.

У большинства исследованных (18 из 23) золотин наблюдается развитие высокопробных оболочек, на 8 зернах измерены значения пробности золота в каймах. Выявленные явные (до 50 мк, рис. 5) высокопробные каймы свидетельствуют о длительном пребывании золота в зоне гипергенеза. Корреляционная связь между пробностью золота и наличием гипергенных кайм не установлена.

Также выявлена золотина (рис. 5в), состоящая из золота существенно разной пробности. По форме золотины видно, что, скорее всего, она образовалась в результате слипания и срастания менее крупных золотинок.

В ходе обработки результатов морфологического анализа шлихового золота и анализа полученных данных было установлено отсутствие корреляционной зависимости между пробностью золотины, ее классом крупности, формой и наличием высокопробных кайм.

Предыдущими исследованиями [3, 7, 10] предполагалось, что источником россыпи руч. Ветвистый и его притока руч. Рыжий выступал промежуточный коллектор — отложения уядинской свиты (неоген). В рамках данных исследований предстоит методами морфологического анализа россыпного золота в различных частях водотоков более точно локализовать источник питания россыпи.

В ходе исследования рассматривались пробы из 4 шурфов (рис. 2): шурф 1 — слияние руч. Ветвистого и руч. Рыжего, шурф 2 — руч. Ветвистый в 200 м ниже слияния; шурф 3 — руч. Ветвистый в 300 м. выше слияния; шурф 4 — руч.

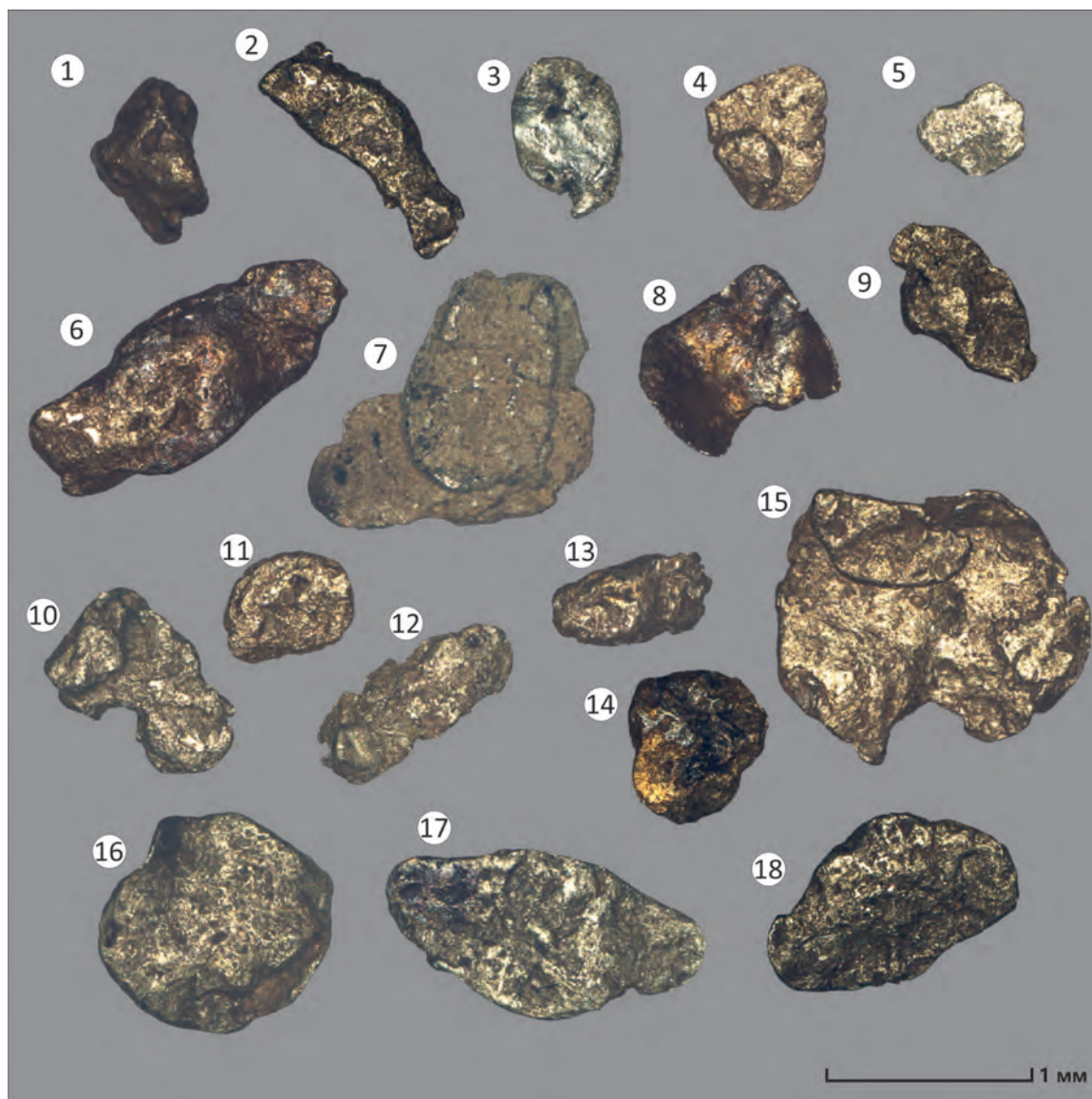


Рис. 3. Шлиховое золото руч. Ветвистый. Золотина серебристого оттенка (3), с железистыми рубашками (1, 6, 8, 14), со сrostками (7), закатанными краями (4, 10, 15). По форме изометричные (5, 11, 16), овальные (13, 18) и вытянутые (2, 6, 9, 12, 17).

Fig. 3. Gold of Vetvisty stream. Silvery-colored gold grain (3), with iron-jackets (1, 6, 8, 14), with splices (7), rolled edges (4, 10, 15). In shape isometric (5, 11, 16), oval (13, 18) and elongated (2, 6, 9, 12, 17).

Рыжий в 300 м выше слияния. Для золота из каждого шурфа был проведен гранулометрический анализ, определены формы золотинок, степень их уплощенности, окатанности, цвет.

В результате гранулометрического анализа (табл.), были установлены следующие закономерности.

1. Наибольшая схожесть распределения золота по классам крупности прослеживается между золотинами из руч. Рыжий (шурф 4) и золотинами из слияния руч. Рыжего и Ветвистого (шурф 1).

Для этих же шурфов характерна и наибольшая крупность золота: на класс крупности +2 мм приходится 61 и 52,4% соответственно.

2. В шурфе 2 (нижнее течение руч. Ветвистого) отсутствуют золотины класса крупности >2 мм, однако, если сравнивать кривые распределения золота по классам крупности (табл.), видно, что в целом золото нижнего течения руч. Ветвистый наследует распределение по классам крупности золота руч. Рыжего (и слияния руч. Рыжего с руч. Ветвистый).

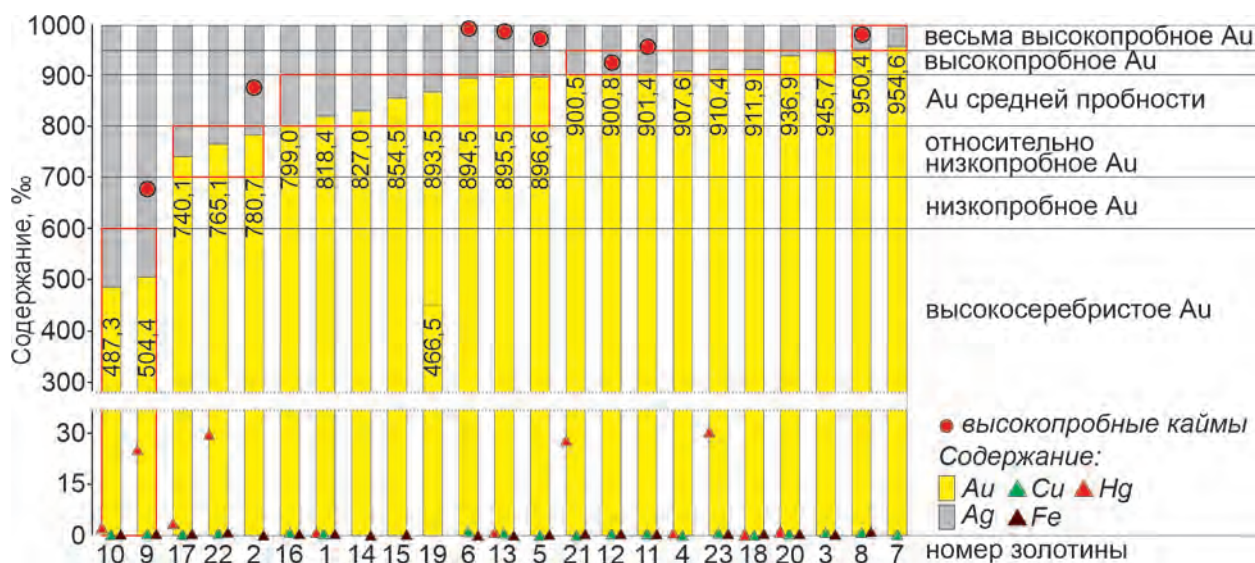


Рис. 4. Вещественный состав золота руч. Ветвистый

Fig. 4. Material composition of gold of Vetvisty stream

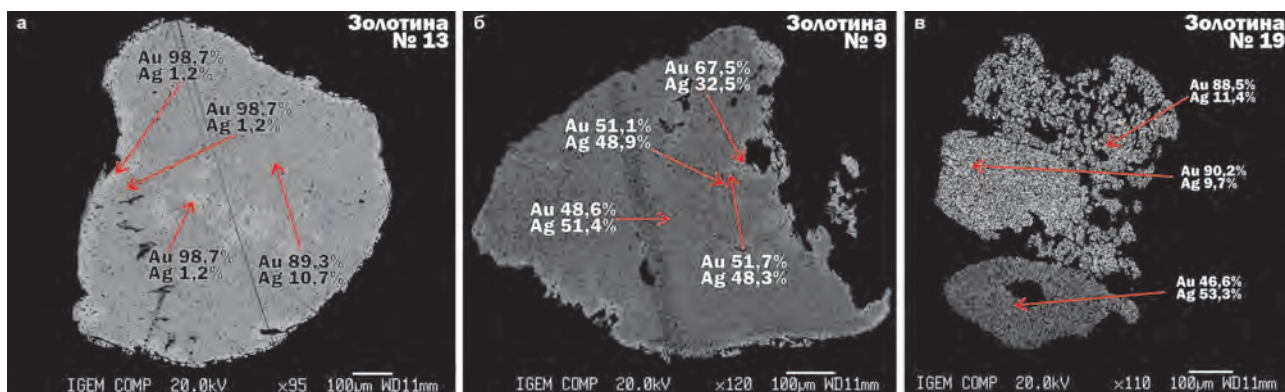


Рис. 5. Химический состав золотин по результатам электронно-зондового микроанализа: а — золотина № 13, увеличение 95; б — золотина № 9, увеличение 120, в — золотина № 19, увеличение 110

Fig. 5. The chemical composition of gold grains according to the results of electron-probe microanalysis: а — gold grain No. 13, magnification 95; б — gold grain No. 9, magnification 120, в — gold grain No. 19, magnification 110

Таблица. Распределение золота по классам крупности
Table. Distribution of gold by size class

№ шурфа	Краткая привязка	Содержания золота, г/м ³	Распределение золота по классам крупности			
			–0,25	–1,0 +0,25	–2,0 +1,0	+2,0 мм
1	Слияние	2	0,2%	22,4%	16,4%	61,0%
2	Руч. Ветвистый ниже слияния	1,0	1,7%	13,0%	85,4%	0,0%
3	Руч. Ветвистый выше слияния	0,3	25,7%	72,6%	1,7%	0,0%
4	Руч. Рыжий	1,5	0,0%	34,3%	13,4%	52,4%

3. Самое мелкое золото обнаружено в верхнем течении руч. Ветвистый (шурф 3): на класс крупности –1,0 +0,25 мм приходится 72,6% металла.

Обсуждение результатов

В целом морфологическая характеристика россыпного золота руч. Ветвистый свидетельствует о его поступлении в россыпь через промежуточный

коллектор: хорошая степень окатанности золота, отсутствие сростков золота с другими минералами.

Вещественный состав гипогенного золота (наличие золотин с существенно различным золото-серебряным соотношением), а также отсутствие корреляционных связей между пробностью, формой и размерами шлихового золота указывают на множественность коренных источников, в свое время питавших промежуточный коллектор (отложения уяндинской свиты).

Отсутствие корреляции между «пробностью/формой/крупностью» золотин и наличием высокопробных кайм указывает на гипергенную природу каемок на шлиховом золоте. Учитывая молодость долины руч. Ветвистый, это свидетельствует о поступлении золота в россыпь из промежуточного коллектора, который длительное время концентрировал в себе золото существенно различной пробности и морфологии. За время нахождения в промежуточном коллекторе шлиховое золото претерпело гипергенные преобразования. Этот вывод подтверждается высокой степенью окатанности золотин, нехарактерной для водотоков низких порядков.

В результате морфологического анализа россыпного золота участка Ветвистый установлено, что наиболее обогащенный золотом пласт песчаных неогеновых отложений, питавший россыпь, располагался в истоках руч. Рыжий.

Можно сделать предположение, что размыв источника золотороссыпных образований системы «руч. Рыжий — слияние — нижнее течение руч. Ветвистый» происходит и в настоящее время, о чем свидетельствуют высокие содержания россыпного золота в верховьях руч. Рыжий при фактическом отсутствии каких-либо ловушек, щеток и пр.

Несмотря на то что золото верховьев руч. Ветвистый значительно отличается по гранулометрической характеристике от золота руч. Рыжий и нижней части руч. Ветвистый, источником его поступления в аллювий также был промежуточный коллектор, что косвенно подтверждается его морфологическими особенностями. Разная крупность золота верховьев руч. Ветвистого и руч. Рыжего, скорее всего, обусловлена

особенностями распределения золота непосредственно в неогеновых отложениях уяндинской свиты, питающих ручей. Золотоносные пласты в промежуточных коллекторах, так же, как и в классических россыпях, могут иметь свою зональность, в том числе и по крупности золота.

В мире золотоносность палеоген-неогеновых отложений (третичных) известна достаточно широко [11, 13—15]. К месторождениям подобного типа можно отнести россыпи Пиренейского полуострова [15], Калифорнийские [13] и Новозеландские [14] россыпи. В России наиболее крупным среди промышленных объектов подобного типа является Куларская группа месторождений, приуроченная к палеогеновым корам выветривания и их продуктам перемыва [12].

Распространенные на значительной площади в богатейших золоторудных провинциях северо-востока России терригенные палеоген-неогеновые отложения также могут вмещать в себе золото, питая современные аллювиальные россыпи [1].

Заключение

Россыпям с источниками в виде промежуточных коллекторов в России уделяется незаслуженно малое внимание, однако в условиях необходимости восполнения минерально-сырьевой базы России, в том числе путем освоения Арктической зоны, становится очевидным, что прогнозирование и поиски новых объектов должны включать в себя не только традиционные прогнозно-поисковые модели, но и новые, в том числе нетипичные, к которым можно отнести россыпи с источниками в виде терригенных третичных отложений.

Важно, что промышленный потенциал скрывается не только в таких россыпях, но и непосредственно в их источниках — терригенных палеоген-неогеновых отложениях, которые в действительности остаются недостаточно изученными, находясь в окружении богатейших золотоносных провинций Арктической зоны России.

Дальнейшие исследования будут направлены на опробование непосредственно неогеновых отложений и более детальное изучение золота.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агибалов О.А. Россыпная золотоносность арктических приморских равнин Чукотки: металлогенические и структурно-геоморфологические предпосылки формирования россыпей, проблемы прогнозирования и поисков // Отечественная геология. 2019. № 6. С. 17—27.
2. Будилин Ю.С., Вашко Н.А., Джобадзе В.А. и др. Методика разведки россыпей золота и платиноидов. М.: ФГБУ ЦНИГРИ, 1992. 307 с.
3. Владимирцева О.В., Коноплев В.А., Березнев М.В.

- Состав и золотоносность неогеновых отложений среднего течения р. Селенных (Момский, Абыйский районы, Республика Саха (Якутия)) // Руды и металлы. 2023. № 1. С. 17—24.
4. Некрасов А.И. Геология и благороднометалльная минерализация Верхояно-Колымской складчатой области: дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 2017.
 5. Николаева Л.А., Гаврилов А.М., Некрасова А.Н. и др. Изучение самородного золота при геологоразведочных работах. Методические рекомендации. М.: ФГБУ ЦНИГРИ, 2023. 73 с.
 6. Петровская Н.В. Самородное золото. М.: Наука, 1973. 349 с.
 7. Прасолов А.М., Владимирцева О.В. Морфологический анализ россыпного золота при прогнозировании нетипичных источников аллювиальных россыпей // Тез. докл. Новое в познании процессов рудообразования ИГЕМ РАН. М., 2023. С. 169—172.
 8. Протопопов Г.Х., Трущелев А.М., Кузнецов Ю.В., Радудевич Я.А. и др. Государственная геологическая карта СССР м-ба 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Листы Q-54. Усть-Нера. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2020. 843 с.
 9. Словарь по геологии россыпей / Под ред. Н.А. Шило, Н.Н. Арманд, В.Д. Белоусова, Л.З. Быховского и др. М.: Недра, 1985. С. 197.
 10. Соловьев Г.Г., Сикорин В.В., Денисенко Н.М. Отчет о поисковых работах в нижнем течении р. Селенных в 1980—1983 гг. Батагай: Якутскгеология, 1983. С. 175.
 11. Третьяков А.В., Нигматова С.А., Габитова У.Б. Типы, размещение и перспективы палеогеновых и неогеновых россыпей золота в Западно-Калбинском золотоносном районе (Восточный Казахстан) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 4. 156—169.
 12. Borodyanskiy A.Sh., Miller V.G. Tertiary multilayer placers in Kular gold-bearing region (Yakut ASSR) // International Geology Review, 1970. No. 12(1). P. 24—25, 1970 DOI: 10.1080/00206817009475203
 13. Christensen O.D., Henry C.D., Wood J. Origin of gold in placer deposits of the Sierra Nevada foothills, California // Geological Society of Nevada, New Concepts and Discoveries / Eds. W.M. Pennell and L.J. Garside. Symposium Volume, Reno/Sparks, Nevada, 2015. P. 833—859.
 14. Craw D. Delayed accumulation of placers during exhumation of orogenic gold in southern New Zealand // Ore Geology Reviews 2010. No. 37. P. 224—235.
 15. Dos Santos Alves K., Barrios Sánchez, S., Gómez Barreiro J., Merinero Palomares R., Manuel Compañía Prieto J. Morphological and compositional analysis of alluvial gold: The Fresnedoso gold placer (Spain) // Ore Geology Reviews. 2020. No. 121(1039). P. 1—17.

REFERENCES

1. Agibalov O.A. Placer gold potential of the Arctic marine Chukotka plains: metallogenic and structural-geomorphological preconditions of placer formation, forecasting and prospecting iss // Domestic geology. 2019. No. 6. P. 17—27 (In Russian).
2. Budilin Yu.S., Vashko N.A., Dzhobadze V.A., et al. Methodology of exploration of gold and platinoids placers. Moscow: TSNIGRI, 1992. 307 p. (In Russian).
3. Vladimirtseva O.V., Konoplev V.A., Bereznev M.V. Composition and gold-bearing potential of Neogene deposits in the middle reaches of the Selennyakh river, Republic of Sakha (Yakutia) // Ores and metals. 2023. No. 1. P. 17—24 (In Russian).
4. Nekrasov A.I. Geology and noble-metal mineralogeny of the Verkhoyano-Kolyma folded region: diss. ... in Geology and Mineralogy, Moscow, 2017 (In Russian).
5. Petrovskaya N.V. Native gold. Moscow: Nauka, 1973. 349 p. (In Russian).
6. Nikolaeva L.A., Gavrilov A.M., Nekrasova A.N., et al. Study of nugget gold in geological exploration works. Methodical recommendations. Moscow: TSNIGRI, 2023. 73 p. (In Russian).
7. Prasolov A.M., Vladimirtseva O. V. Morphological analysis of placer gold in predicting non-topic sources of alluvial placers. New in knowledge of ore formation processes IGEM RAS. Moscow, 2023. P. 169—172 (In Russian).
8. Protopyopov G.H., Truschelev A.M., Kuznetsov Yu.V., Radulevich Ya.A., et al. State geologic map of the USSR 1:1 000 000 (third generation). Verkhoyan-Kolyma series. Sheets Q-54. Ust-Nera. Explanatory note. Saint-Peterburg: VSEGEI, 2020. 843 p. (In Russian).
9. Dictionary of placer geology / Eds by N.A. Shilo; N.N. Armand, V.D. Belousov, L.Z. Bykhovsky, et al. Moscow: Nedra, 1985. P. 197 (In Russian).
10. Solov'ev G.G., Sikorin V.V., Denisenko N.M. Report on prospecting in the lower reaches of the Selennyakh River in 1980—1983. Batagai: Yakutskgeologiya, 1983. P. 175 (In Russian).
11. Tretyakov A.V., Nigmatova S.A., Gabitova U.B. Types, location and prospects of Paleogene and Neogene gold placers in the West-Kalbinsk gold-bearing region (eastern Kazakhstan) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering 2020. T. 331. No. 4. P. 156—169 (In Russian).
12. Borodyanskiy A.Sh., Miller V.G. Tertiary multilayer placers in Kular gold-bearing region (Yakut ASSR) // International Geology Review, 1970. No. 12(1). P. 24—25, 1970 DOI: 10.1080/00206817009475203
13. Christensen O.D., Henry C.D., Wood J. Origin of gold in placer deposits of the Sierra Nevada foothills, California // Geological Society of Nevada, New Concepts and Discoveries / Eds. W.M. Pennell and L.J. Garside. Symposium Volume, Reno/Sparks, Nevada, 2015. P. 833—859.

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

14. Craw D. Delayed accumulation of placers during exhumation of orogenic gold in southern New Zealand // Ore Geology Reviews 2010. No. 37. P. 224—235.
15. Dos Santos Alves K., Barrios Sánchez, S., Gómez Barreiro J., Merinero Palomares R., Manuel Compañía Prieto J. Morphological and compositional analysis of alluvial gold: The Fresnedoso gold placer (Spain) // Ore Geology Reviews. 2020. No. 121(1039). P. 1—17.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Прасолов А.М. — подготовил фотографии золотых и описал характеристики золотин, выполнил минералогический анализ, оформил графические приложения. Разработал концепцию и подготовил текст статьи, окончательно утвердил публикуемую версию статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Владимирцева О.В. — провела сбор и анализ геологических данных о районе работ, составила графические приложения, провела полевые работы. Разработала концепцию и подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Prasolov A.M. — prepared photographs of gold and described the characteristics of gold specimens, performed mineralogical analysis, and prepared graphical appendices. Developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

Vladimirtseva O.V. — collected and analyzed geological data on the area of work, made graphic applications, carried out geological work. Developed the concept and prepared text of the article, finally approved the published version of the article and agree to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Прасолов Александр Михайлович* — аспирант ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»; лаборант-исследователь лаборатории Прогнозно-металлогенических исследований ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии» Российской академии наук.

23, ул. Миклухо-Маклая, г. Москва 117997, Россия
33, пер. Старомонетный, г. Москва 119017, Россия
e-mail: prasolov00@yandex.ru
SPIN-код: 8982-1743
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9330-260X>

Alexander M. Prasolov* — postgraduate student of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; laboratory researcher, Laboratory of Forecasting and Metallogeny Studies, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
33, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: prasolov00@yandex.ru
SPIN-code: 8982-1743
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9330-260X>

Владимирцева Ольга Владимировна — кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник лаборатории Прогнозно-металлогенических исследований ФГБУН «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии» Российской академии наук.

33, пер. Старомонетный, г. Москва 119017, Россия
e-mail: olga_9_4@mail.ru
SPIN-код: 5597-5730
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8420-2841>

Olga V. Vladimirtseva — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Junior Research Associate, Laboratory of Forecasting and Metallogeny Studies, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry Russian Academy of Sciences.

33, Staromonetny lane, Moscow 119017, Russia
e-mail: olga_9_4@mail.ru
SPIN-code: 5597-5730
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8420-2841>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-91-100>
УДК 561:551.734.3(470.323)



ЖИВЕТСКИЕ МЕГАСПОРОВЫЕ КОМПЛЕКСЫ МИХАЙЛОВСКОГО КАРЬЕРА (КУРСКАЯ ОБЛ.)

Д.И. МАРИНИНА*, О.А. ОРЛОВА

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
1, Ленинские горы, г. Москва 119991 Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Впервые изучены дисперсные мегаспоры из живетских отложений Михайловского карьера Курской области. После химической мацерации проб, отбора и определения было идентифицировано 12 видов, относящихся к 8 родам дисперсных мегаспор. На основании анализа послойного распределения дисперсных мегаспор в изученном обнажении установлено два мегаспоровых комплекса, характеризующих нижнюю (комплекс М1) и верхнюю (М2) части разреза. В обоих комплексах преобладают мелкоразмерные азонатные мегаспоры рода *Hystricosporites* McGregor, но различной видовой принадлежности. Верхний комплекс (М2) более разнообразный по таксономическому составу. Обнаруженные дисперсные мегаспоры, помимо живетских отложений Михайловского карьера, были ранее установлены в разновозрастных отложениях Канады и Ливии.

Цель: изучение дисперсных мегаспор из живетских отложений Михайловского карьера (Курская обл.) и установление мегаспоровых комплексов для данного разреза.

Материалы и методы. Для исследования были использованы образцы из глинистых отложений живетского яруса среднего девона Михайловского карьера (Курская обл., г. Железнодорожск), собранные сотрудниками Палеонтологического института РАН (далее ПИН РАН) летом 2017 г. Пробы мацерировались на кафедре палеонтологии с помощью концентрированной (55%) перекиси водорода. Сильно загрязненные образцы с мегаспорами дополнительно обрабатывались плавиковой кислотой и доочищались в горячих каплях технического спирта. Отбор, подсчет и определение отмацерированных проб дисперсных мегаспор проводились под стереомикроскопом Olympus CZ65 при увеличении в 20 и более раз. Микрофотографии получены на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega-3, ПИН РАН.

Результаты. Всего было определено 12 видов, относящихся к восьми родам: *Hystricosporites* McGregor, *Verrucisporites* Chi et Hills, *Nikitinsporites* Chaloner, *Biharisporites* Potonié, emend. Glasspool, *Ancyrospora* Richardson, *Contagisporites* Owens, *Grandispora* Hoffmeister, Staplin et Malloy, emend. McGregor и *Lagenicula* (Bennie et Kidston) Dybova-Jachowicz et al. На основе распределения по разрезу дисперсных мегаспор было выделено два мегаспоровых комплекса: М1 (нижний, сл. 7—12) и М2 (верхний, сл. 18—21).

Заключение. Установленные в живетских отложениях Михайловского карьера дисперсные мегаспоры ранее были описаны из разновозрастных отложений Арктической Канады. Большинство изученных мегаспор, скорее всего, продуцировались плауновидными, исходя из сравнения с идентичными инсидными мегаспорами, а также по ультратонкому строению спородермы, установленному ранее для некоторых видов. Следовательно, в живетских лесах изученного региона среди гетероспоровых растений произрастало достаточно много плауновидных, в том числе и древовидных, при незначительной роли древовидных археоптерисовых.

Ключевые слова: дисперсные мегаспоры, плауновидные, археоптерисовые, средний девон, живет, Курская область, комплексы

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Благодарности: О.А. Лебедеву (ПИН РАН) за предоставленный для исследований материал из Михайловского карьера, проф. А.С. Алексееву (МГУ) за ценные советы при написании

статьи, Р.А. Ракизову и Е.А. Жегалло (ПИН РАН) за помощь при работе со сканирующим электронным микроскопом, Д.А. Мамонтову (МГУ) за помощь при мацерации некоторых проб.

Для цитирования: Маринина Д.И., Орлова О.А. Живетские мегаспоровые комплексы Михайловского карьера (Курская обл.). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):91—100. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-91-100>

Статья поступила в редакцию 04.04.2024

Принята к публикации 06.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

GIVETIAN MEGASPORE ASSEMBLAGES OF THE MIKHAILOVSKY MINE (KURSK OBLAST)

DARIA I. MARININA*, OLGA A. ORLOVA

Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow 119991 Russia

ABSTRACT

Background. Disperse megaspores from the Givetian deposits of the Mikhailovsky mine, Kursk Oblast, were studied for the first time. Following chemical maceration of the samples, their selection and identification, 12 species belonging to 8 genera of disperse megaspores were identified. The conducted analysis of the layer-by-layer distribution of disperse megaspores in the studied outcrop, two megaspore assemblages were established, describing the lower (M1) and upper (M2) parts of the section. Both assemblages are dominated by small-sized azonate megaspores of the *Hystricosporites* McGregor genus, although belonging to different species. The upper assemblage (M2) is more diverse in terms of taxonomic composition. Along with the Givetian deposits of the Mikhailovsky mine, the identified disperse megaspores were previously found in coeval deposits of Canada and Libya.

Aim. To study of disperse megaspores from the Givetian deposits of the Mikhailovsky mine (Kursk Oblast) and to establish megaspore assemblages for this section.

Materials and methods. Samples of the clay deposits of the Givetian stage of the Middle Devonian from the Mikhailovsky mine (Kursk Oblast, Zheleznogorsk) were collected by employees of the Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences (PIN RAS) in the summer of 2017. The samples were macerated at the Department of Paleontology using concentrated (55%) hydrogen peroxide. The samples heavily contaminated with megaspores were additionally treated with hydrofluoric acid and further purified in hot drops of denaturated alcohol. Selection, counting, and determination of macerated samples of disperse megaspores were carried out using an Olympus CZ65 stereomicroscope at a 20x magnification or greater. Microphotographs were taken using a TESCAN Vega-3 scanning electron microscope (PIN RAS).

Results. A total of 12 species belonging to 8 genera were identified. These included *Hystricosporites* McGregor, *Verrucisporites* Chi et Hills, *Nikitinsporites* Chaloner, *Biharisporites* Potonié, emend. Glasspool, *Ancyrospora* Richardson, *Contagisporites* Owens, *Grandispora* Hoffmeister, Staplin et Malloy, emend. McGregor, and *Lagenicula* (Bennie et Kidston) Dybova-Jachowicz et al. On the basis of disperse megaspore distribution along the section, two megaspore assemblages were established: M1 (lower, layers 7–12) and M2 (upper, layers 18–21).

Conclusion. The disperse megaspores established in the Givetian deposits of the Mikhailovsky mine were early described in the Arctic Canada. The majority of the studied megaspores were most likely produced by lycopsids. This conclusion is based on their comparison with identical in-situ megaspores, as well as on the ultrathin structure of the sporoderm, previously established for some species. Consequently, the Givetian forests of the studied region were populated with numerous lycopsids, including tree-like ones, among heterosporous plants, with an insignificant role of archopteridalean tree-like species.

Keywords: disperse megasporae, lycopsids, archaeopterids, Middle Devonian, Givetian age, Kursk region, assemblages

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

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

Acknowledgments: the authors thank O.A. Lebedev (PIN RAS) for providing material from the Mikhailovskiy mine, prof. A.S. Alekseev (MSU) for valuable advice during the writing the manuscript, R. A. Rakitov and E.A. Zhegallo (PIN RAS) for their helping with using the scanning electron microscope, D.A. Mamontov (MSU) for helping with maceration of some samples.

For citation: Marinina D.I., Orlova O.A. Givetian megaspore assemblages of the Mikhailovskiy mine (Kursk oblast). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):91—100. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-91-100>

Manuscript received 04 April 2024

Accepted 06 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Дисперсные мегаспоры являются важным объектом исследований в палеонтологии, стратиграфии и других геологических отраслях. В среднедевонских отложениях земного шара они встречаются довольно часто и приурочены к терригенным углисто-глинистым прослоям. Среднедевонские отложения Воронежской антеклизы достаточно богаты дисперсными мегаспорами. Ранее они были обнаружены в скважинах Воронежской, Брянской и Липецкой областей [1, 2, 10]. Настоящая статья посвящена дисперсным мегаспорам Михайловского карьера Курской области. Они были обнаружены и изучены здесь впервые.

Материалы и методы

Михайловский карьер расположен недалеко от города Железногорска в Курской области (рис. 1). Летом 2017 г. во время полевых работ группой палеонтологов ПИН РАН был описан и опробован на разные группы ископаемых разрез живетских отложений, представленный в основном глинами и алевролитами с включениями углистого материала (рис. 2). На установление дисперсных мегаспор в разрезе нам было передано для обработки и дальнейшего изучения 10 проб (рис. 3).

Мацерация образцов проводилась в палеонтологической лаборатории кафедры палеонтологии геологического факультета МГУ. При обработке применяли методику И.В. Петровой с изменениями [3]. Недробленные пробы в навеске 50 г помещались в термостойкие стаканы и заливались концентрированной (55% медицинской)

перекисью водорода на 2 часа. По истечении двух часов мацерат промывался проточной водой в ситах с фракцией 0,1 мм. После просушенный порошок просматривался под биноклем. Обработка концентрированной перекисью водорода повторялась до тех пор (обычно 2—3 раза), пока дисперсные мегаспоры полностью не очищались. Сильноглинистые породы приходилось обрабатывать до 4—5 раз. Часто поверхность мелких мегаспор, особенно со сложной скульптурой, загрязнялась между выростами минеральными компонентами, поэтому их приходилось дополнительно обрабатывать с помощью плавиковой кислоты по методике Е.Г. Раевской и О.В. Шурековой [4]. Незначительные загрязнения удалялись с поверхности дисперсных мегаспор с помощью горячих капель технического спирта, в которых мегаспоры достаточно легко очищались.

Просмотр мацерата и отбор дисперсных мегаспор проводился под стереомикроскопом Olympus CZ65 при увеличении в 20 и более раз. Микрофотографии получены на сканирующем электронном микроскопе TESCAN Vega 3 и Vega 2, ПИН РАН.

Результаты и обсуждение

После химической обработки десяти образцов было установлено, что только четыре пробы содержали дисперсные мегаспоры хорошей и удовлетворительной сохранности (слои 7, 12, 18, 21). В результате определения и подсчета встреченных дисперсных мегаспор нами были выделены два мегаспоровых комплекса: нижний — М1 (слои 7—12) и верхний — М2 (слои 18—21). В нижнем



Рис. 1. Схема расположения Михайловского карьера (г. Железногорск, Курская область)
Fig. 1. The layout of the Mikhailovskiy mine (Zheleznogorsk, Kursk region)



Рис. 2. Фотография изученного обнажения живетских отложений в Михайловском карьере (Курская область).
Фото С.Е. Вдовиченко, 2023
Fig. 2. Photograph of the studied outcrop of Givetian deposits in the Mikhailovskiy mine (Kursk region). Photo by
S.E. Vdovichenko, 2023

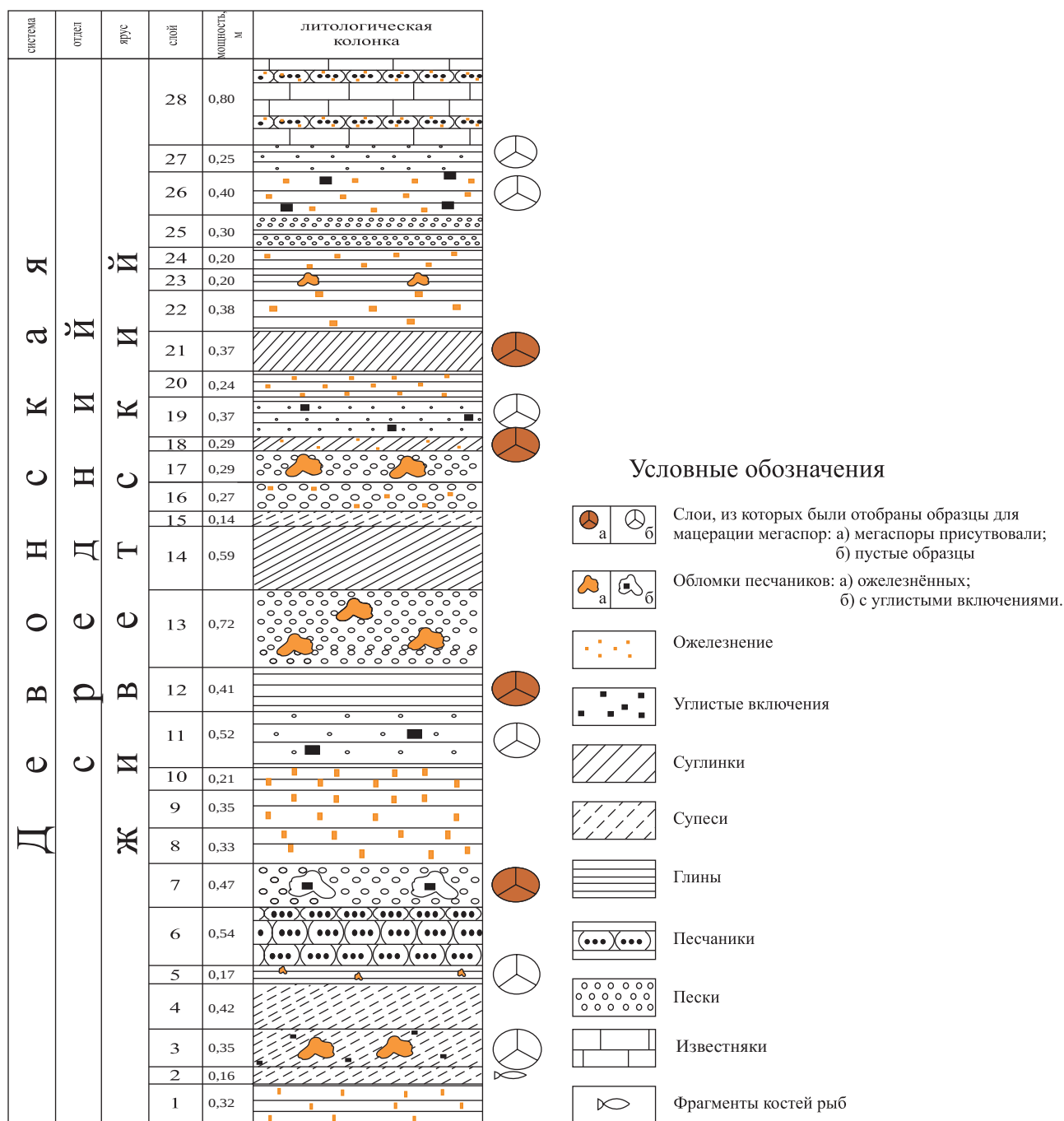


Рис. 3. Литологическая колонка разреза живетских отложений Михайловского карьера и интервал с образцами, исследуемыми на мегаспоровые комплексы (составлена по описанию разреза Е.С. Казанцевой, 2016)

Fig. 3. Lithological column of the Givetian deposits section of the Mikhailovskiy mine and the interval with samples studied for megaspore complexes (compiled from the description of the section by E.S. Kazantseva, 2016)

комплексе обнаружено 6 видов дисперсных мегаспор, относящихся к четырем родам: *Hystricosporites* McGregor, *Verrucisporites* Chi et Hills, *Nikitinsporites* Chaloner и *Biharisporites* Potonié, emend. Glasspool. Преобладают в комплексе округлые азонатные мио-мегаспоры рода *Hystricosporites*

(52,5% от общего числа встреченных мегаспор в комплексе) с суживающимися по направлению к апикальной части, бифуркирующими на концах выростами, слегка загнутыми назад. Такие сложные выросты распространены как на дистальной, так и на проксимальной сторонах споры.

В комплексе М1 род *Hystricosporites* представлен двумя видами: *H. gravis* Owens — 35% (рис. 4, фиг. 5, 6) и *H. elongatus* Chi et Hills — 17,5%

(рис. 4, фиг. 4). Следует отметить, что диаметр встречаемых миегаспор рода *Hystricosporites* не превышает 150 мкм.

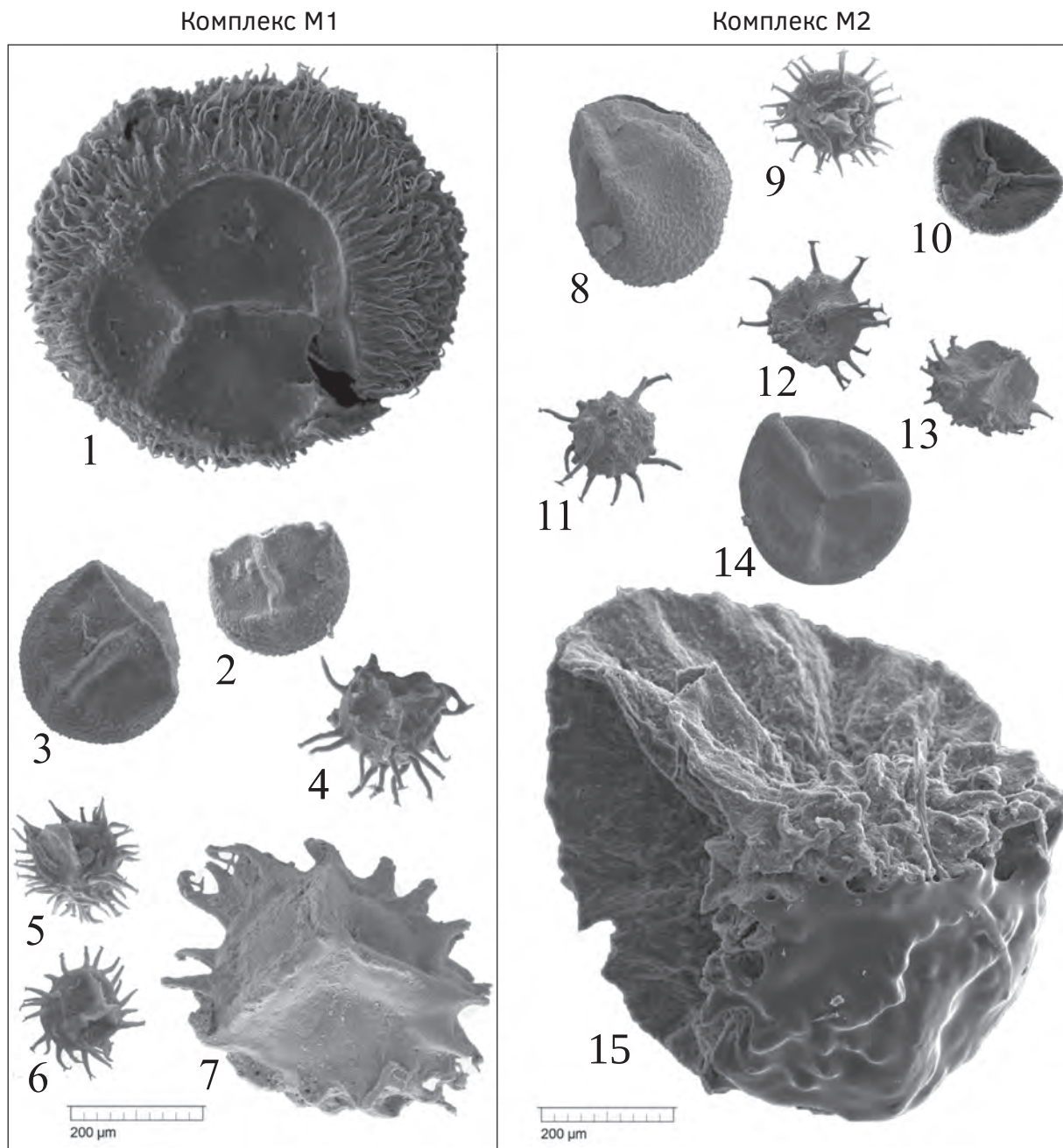


Рис. 4. Фототаблица мегаспоровых комплексов (комплекс М1 — слева; комплекс М2 — справа). Все изображённые экземпляры мегаспор происходят из среднего девона, живецкого яруса, Михайловского карьера, Курская область. Комплекс М1: фиг. 1. *Biharisporites arcticus* var. *productus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.8); фиг. 2. *Verrucisporites submamillarius* (McGregor) Chi et Hills, 1976, внешний вид в субэкваториальной проекции (обр. сл. 12.1); фиг. 3. *Verrucisporites medius* var. *medius* Chi et Hills, 1976, внешний вид в полярной проекции (обр. сл. 12.1); фиг. 4. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 5. *Hystricosporites gravis* Owens, 1971, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.4); фиг. 6. *Hystricosporites gravis* Owens, 1971, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.4); фиг. 7. *Hystricosporites gravis* Owens, 1971, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.4); Комплекс М2: фиг. 8. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 9. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 10. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 11. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 12. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 13. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 14. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5); фиг. 15. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 12.5).

фиг. 7. *Nikitinsporites canadensis* Chaloner, 1959, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 7-3).
Комплекс M2: фиг. 8. *Verrucisporites submamillarius* (McGregor) Chi et Hills, 1976, внешний вид в субэкваториальной проекции (обр. 21-1); фиг. 9. *Hystricosporites cf. delectabilis* McGregor, 1960, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 21-7); фиг. 10. *Grandispora* sp., внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 21-4); фиг. 11. *Hystricosporites cf. grandis* Owens, 1971, внешний вид экваториальной проекции (обр. сл. 21-12); фиг. 12. *Hystricosporites expandus* Chi et Hills, 1976, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 21-15); фиг. 13. *Ancyrospora furcula* Owens, 1971, внешний вид в проекции (обр. л. 21-5); фиг. 14. *Contagisporites optivus* Owens, 1971, внешний вид в экваториальной проекции (обр. сл. 21-15); фиг. 15. *Lagenicula milleri* Steemans et al 2011, внешний вид в боковой проекции (обр. сл. 18-1).

Длина масштабной линейки 200 мкм.

Fig. 4. Photo table of megaspore complexes (complex M1 — on the left; complex M2 — on the right). All megaspore specimens depicted come from the Middle Devonian, Givetian Stage, Mikhailovskiy mine, Kursk Region.

Complex M1: fig. 1. *Biharisporites arcticus* var. *productus* Chi et Hills, 1976, appearance in equatorial projection (sample l. 12.8); fig. 2. *Verrucisporites submamillarius* (McGregor) Chi et Hills, 1976, appearance in subequatorial projection (sample l. 12.1); fig. 3. *Verrucisporites medius* var. *medius* Chi et Hills, 1976, appearance in polar projection (sample l. 12.1); fig. 4. *Hystricosporites elongatus* Chi et Hills, 1976, appearance in equatorial projection (sample l. 12.5); fig. 5. *Hystricosporites gravis* Owens, 1971, appearance in equatorial projection (sample l. 12.4); fig. 6. *Hystricosporites gravis* Owens, 1971, appearance in equatorial projection (sample l. 17-3); fig. 7. *Nikitinsporites canadensis* Chaloner, 1959, appearance in equatorial projection (sample l. 17-3).

Complex M2: fig. 8. *Verrucisporites submamillarius* (McGregor) Chi et Hills, 1976, appearance in subequatorial projection (sample l. 21-1); fig. 9. *Hystricosporites cf. delectabilis* McGregor, 1960, appearance in equatorial projection (sample l. 21-7); fig. 10. *Grandispora* sp., appearance in equatorial projection (sample l. 21-4); fig. 11. *Hystricosporites cf. grandis* Owens, 1971, equatorial view (samples l. 21-12); fig. 12. *Hystricosporites expandus* Chi et Hills, 1976, appearance in equatorial projection (samples l. 21-15); fig. 13. *Ancyrospora furcula* Owens, 1971, projection (sample l. 21-5); fig. 14. *Contagisporites optivus* Owens, 1971, appearance in equatorial projection (sample l. 21-15); fig. 15. *Lagenicula milleri* Steemans et al 2011, lateral view (sample l. 18-1).

The length of the scale bar is 200 μ m.

Четверть обнаруженных в комплексе M1 мегаспор относится к роду *Verrucisporites* (25%), для которого характерны следующие признаки: неравномерно расположенные по поверхности тела спор бородавки и приподнятые губы, образующие верхушечный выступ. Встречено два вида мегаспор этого рода: *V. submamillarius* (McGregor) Chi et Hills — 17,5% (рис. 4, фиг. 2) и *V. medius* var. *medius* Chi et Hills — 7,5% (рис. 4, фиг. 3). Диаметр мегаспор от 270 до 285 мкм. 15% от общего числа обнаруженных мегаспор в нижнем комплексе представлено округлыми, относительно крупными (до 400 мкм в диаметре) мегаспорами рода *Nikitinsporites*. Встречен единственный вид — *N. canadensis* Chaloner (рис. 4, фиг. 7). Ранее этот вид был установлен из девонских отложений Арктической Канады [7, 8]. Для него характерна хорошо выраженная губастая, сильно возвышающаяся (до 120 мкм в высоту) трехлучевая щель разверзания. Наружная поверхность мегаспоры осложнена многочисленными хаотично расположенными тонкими выростами, некоторые из которых имеют общее основание или ветвятся у апекса, образуя якоревидное окончание.

В незначительном количестве (7,5%) в нижнем комплексе установлены округлые мегаспоры рода *Biharisporites* с отчетливо выраженной контактной ареей, ограниченной дугами курваты.

В комплексе M1 встречен один подвид — *B. arcticus* var. *productus* Chi et Hills (рис. 4, фиг. 1). Наружная поверхность мегаспор *B. arcticus* var. *productus* несет скульптурные элементы в виде длинных шипов с заостренным концом, часто к верхушке изогнутых, длиной от 40 мкм и более. Диаметр некоторых таких мегаспор достигает 680 мкм. Подобные мегаспоры ранее были найдены и изучены в живетских отложениях Воронежской области [10].

Таким образом, в комплексе M1 преобладают азотатные округлые мегаспоры с отчетливо выраженными губастыми щелями разверзания и длинными выростами наружной поверхности (*Hystricosporites*, *Biharisporites* и *Nikitinsporites*). Сохранность мегаспор нижнего комплекса отличается по слоям: дисперсные мегаспоры слоя 7 сильно повреждены, поверхность корродирована, из-за чего при определении таксонов возникали определенные трудности. Мегаспоры слоя 12 имели хорошую и удовлетворительную сохранность, эскина мегаспор была практически не повреждена, за исключением иногда обломанных длинных выростов. Это связано с различием в отложениях: 7 слой представлен грубообломочным материалом, в то время так 12 слой — преимущественно глинистый материал. Следует отметить, что все определенные в комплексе M1 таксоны ранее были встречены в средне-верхнедевонских отложениях Арктической Канады [8].

В верхнем комплексе М2 определены 7 видов дисперсных мегаспор, относящихся к шести родам: *Hystricosporites* McGregor, *Verrucisporites* Chi et Hills, *Ancyrospora* Richardson, *Contagisporites* Owens, *Grandispora* Hoffmeister, Staplin et Malloy, emend. McGregor и *Lagenicula* (Bennie et Kidston) Dybova-Jachowicz et al. Доминируют в верхнем комплексе, так же как и в нижнем, мелкие азональные мегаспоры рода *Hystricosporites* — 63,5%, однако в ином видовом составе: *H. cf. delectabills* McGregor — 25% (рис. 4, фиг. 9), *H. expandus* Chi et Hills — 22% (рис. 4, фиг. 12), *H. cf. grandis* Owens — 16,5% (рис. 4, фиг. 11). Чуть менее 15% в комплексе М2 встречено не крупных зонатных мегаспор рода *Contagisporites* (14%). Отличительной особенностью этого рода является то, что трилетные лучи щели разверзания достигают в длину практически экватора мегаспоры.

Определен один вид рода *C. optivus* Owens (рис. 4, фиг. 14). Менее 10% в комплексе М2 бородавчатых мегаспор рода *Verrucisporites*. Для сравнения, в нижнем комплексе четверть мегаспор относилась к этому роду. Был определен один вид, найденный ранее в нижнем комплексе, — *V. submamillarius* — 9% (рис. 4, фиг. 8). Единично обнаружены в верхнем комплексе мелкие зонатные мегаспоры рода *Ancyrospora* (4,5%). Мегаспоры этого рода имеют определенное сходство, выраженное присутствием сложных выростов на наружной поверхности, с мегаспорами родов *Hystricosporites* и *Nikitinsporites*, отличаясь от последних наличием зоны и характером выростов. Был определен один вид рода *Ancyrospora*: *A. furcula* Owens (рис. 4, фиг. 12), для которого характерно субконцентрическое расположение мультифуркирующих выростов. Диаметр мегаспор *A. furcula* не более 170 мкм. Также единично в верхнем комплексе были отмечены мелкие треугольно-округлые зонатные мегаспоры *Grandispora* sp. (4,5%) (рис. 4, фиг. 10). Очень крупные (до 850 мкм) дисперсные мегаспоры рода *Lagenicula* (4,5%) с ярко выраженным верхушечным выступом в виде гологулы (до 480 мкм высотой) представлены видом *L. milleri* Steemans et al. (рис. 4, фиг. 15).

Таким образом, в комплексе М2 также преобладают разнообразные азональные мегаспоры с бифуркирующими выростами. На втором месте по количеству встреченных форм здесь зонатные мегаспоры рода *Contagisporites*, в отличие от нижнего комплекса, где вторыми по количеству были дисперсные мегаспоры рода *Verrucisporites*. Сохранность дисперсных мегаспор,

обнаруженных в верхнем комплексе, в основном удовлетворительная, многие экземпляры были поврежденными, что связано с наличием в изученных слоях включений грубообломочного материала. Все таксоны, определенные в мегаспоровом комплексе М2, ранее были встречены в среднедевонских отложениях Ливии [9, 12] и Арктической Канады [8]. Следует отметить, что оба выделенных здесь комплекса имеют доминирующими мелкие мегаспоры рода *Hystricosporites*, однако представлены они разными видами. Кроме того, верхний комплекс М2 немного богаче по таксономическому составу по сравнению с нижним М1 (7 видов из 6 родов против 6 видов из 4 родов).

Заключение

На основе проведенных ранее исследований интактных и дисперсных мегаспор, в том числе по результатам изучения ультратонкого строения их оболочки, для некоторых встреченных нами дисперсных мегаспор можно предположить их материнские растения. Так, найденные в изученном разрезе дисперсные мегаспоры *Verrucisporites submamillarius* ранее были обнаружены в спорангиях гетероспорового древовидного плауновидного *Protolepidodendropsis pulchra* Нøег [6]. У дисперсных мегаспор *Biharisporites arcticus* var. *productus*, встреченных нами также только в нижнем комплексе М1, ранее было изучено ультратонкое строение оболочки спор [10], в результате чего было показано, что наружный слой спородермы состоит из трехмерно ветвящихся элементов, что характерно для наружного слоя спородермы плауновидных, а значит, по всей видимости, мегаспоры *B. arcticus* var. *productus* продуцировались плауновидными. В верхнем комплексе М2 единично были найдены крупные мегаспоры рода *Lagenicula*, ранее описанные из спорангиев плауновидных (древовидных лепидодендровых). Также в верхнем комплексе М2 были обнаружены дисперсные мегаспоры рода *Contagisporites*, которые неоднократно описывались из спорангиев археоптерисовых [11]. По данным А.Л. Юриной, в верхнем ярусе среднедевонских лесов доминировали равноспоровые (?) кладосилиевые папоротниковидные [5]. Средний ярус леса был представлен аневрофитовыми прогимноспермовыми, а нижний — редкими плауновидными. Наши результаты показывают, что среди гетероспоровых растений в лесах среднего девона было достаточно много плауновидных, в том числе и древовидных, кроме того, произрастали редкие древовидные археоптерисовые.

ЛИТЕРАТУРА

1. Канаркина А.О., Маринина Д.И., Орлова О.А., Завьялова Н.Е. Первые результаты изучения комплекса дисперсных мегаспор из среднедевонских отложений скв. Шигры-16 (Курская обл.) // Современная палеонтология: классические и новейшие методы. Шестнадцатая всероссийская научная школа молодых ученых-палеонтологов. М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, 2019. С. 14.
2. Маринина Д.И., Орлова О.А. Первые данные о дисперсных мегаспорах из среднедевонских отложений скважины Трубчевск-13, Брянская область // Современная палеонтология: классические и новейшие методы: девятнадцатая всероссийская научная школа молодых ученых-палеонтологов. М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, 2023. С. 30—31.
3. Ошуркова М.В. Мегаспоры карбона. Систематика. Биостратиграфическое значение. СПб.: ВСЕГЕИ, 2001. 112 с.
4. Раевская Е.Г., Шурекова О.В. Современные технологии и оборудование в обработке карбонатно-терригенных пород для палинологического анализа // Проблемы современной палинологии. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2011. С. 103—107.
5. Юрина А.Л. Первые девонские леса на земле: появление, состав растений, типы лесных экосистем и их распространение // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2024. № 1. С. 38—46.
6. Berry C., Marshall J. Lycopside forests in the early Late Devonian paleoequatorial zone of Svalbard // *Geology*, 2015. Vol. 43. No. 12. P. 1043—1046.
7. Chaloner W. G. Devonian Megaspores from Arctic Canada // *Palaeontology*. 1959. Vol. 1. Part 4. P. 312—332.
8. Chi B.I., Hills L.V. Biostratigraphy and taxonomy of devonian megaspores, Arctic Canada // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. 1976. Vol. 24. No. 4. P. 640—818.
9. de Ville de Goyet F., Breuer P., Gerrienne P. et al. Middle Devonian (Givetian) megaspores from Belgium (Ronquières) and Libya (A1-69 borehole). In: Steemans, P., Javaux, E.J. (Eds.), *Recent advances in Palynology: Carnets de Géologie // Notebooks in Geology*. Brest. 2007. P. 68—73.
10. Kanarkina A., Zavialova N., Orlova O., Joshi A. Sporoderm ultrastructure of some Devonian and Permian representatives of Biharisporites and their botanical affinity // *Palynology*, 2022. Vol. 46. No. 4. P. 1—20.
11. Marshall J., Holterhoff P., El-Abdallah S. The archaeopterid forests of Lower Frasnian (Upper Devonian) westernmost Laurentia: biota and depositional environment of the Maywood formation in northern Wyoming as reflected by palynoflora, macroflora, fauna, and sedimentology // *International Journal of Plant Science*, 2022. Vol. 183. P. 465—492.
12. Steemans P., Breuer P., Petuset E. et al. Diverse assemblages of Middle Devonian megaspores from Libya // *Rev. Palaeobot. Palynol.* 2011. Vol. 165. P. 154—174.

REFERENCES

1. Kanarkina A.O., Marinina D.I., Orlova O.A., Zav'yalova N.E. The first results of studying a complex of dispersed megaspores from the Middle Devonian deposits of the well. Shchigry-16 (Kursk region) // *Modern paleontology: classical and newest methods. sixteenth all-Russian scientific school of young scientists-paleontologists*. Moscow: PIN RAS, 2019. P. 14. (In Russian).
2. Marinina D.I., Orlova O.A. First data on dispersed megaspores from the Middle Devonian deposits of the Trubchevsk-13 well, Bryansk region // *Modern paleontology: classical and newest methods: xix All-Russian scientific school of young paleontologists*. Moscow: PIN RAS. 2023. P. 30—31 (In Russian).
3. Oshurkova M.V. Carboniferous megaspores. Taxonomy. Biostratigraphic significance. St. Petersburg: VSEGEI. 2001. 112 p. (In Russian).
4. Raevskaya E.G., Shurekova O.V. Modern technologies and equipment in the processing of carbonate-terrigenous rocks for palynological analysis. *Problems of modern palynology*. Syktyvkar: IG Komi Scientific Center Ural Branch RAS, 2011. P. 103—107 (In Russian).
5. Yurina A.L. The first Devonian forests on earth: appearance, composition of plants, types of forest ecosystems and their distribution // *Vestn. Moscow un-ty. Ser. 4. Geology*. 2024. No. 1. P. 38—46 (In Russian).
6. Berry C., Marshall J. Lycopside forests in the early Late Devonian paleoequatorial zone of Svalbard // *Geology*, 2015. Vol. 43. No. 12. P. 1043—1046.
7. Chaloner W. G. Devonian Megaspores from Arctic Canada // *Palaeontology*. 1959. Vol. 1. Part 4. P. 312—332.
8. Chi B.I., Hills L.V. Biostratigraphy and taxonomy of devonian megaspores, Arctic Canada // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. 1976. Vol. 24. No. 4. P. 640—818.
9. de Ville de Goyet F., Breuer P., Gerrienne P. et al. Middle Devonian (Givetian) megaspores from Belgium (Ronquières) and Libya (A1-69 borehole). In: Steemans, P., Javaux, E.J. (Eds.), *Recent advances in Palynology: Carnets de Géologie // Notebooks in Geology*. Brest. 2007. P. 68—73.
10. Kanarkina A., Zavialova N., Orlova O., Joshi A. Sporoderm ultrastructure of some Devonian and Permian representatives of Biharisporites and their

- botanical affinity // *Palynology*, 2022. Vol. 46. No. 4. P. 1—20.
11. Marshall J., Holterhoff P., El-Abdallah S. The archaeopterid forests of Lower Frasnian (Upper Devonian) westernmost Laurentia: biota and depositional environment of the Maywood formation in northern Wyoming as reflected by palynoflora, macroflora, fauna, and sedimentology // *International Journal of Plant Science*, 2022. Vol. 183. P. 465—492.
12. Steemans P., Breuer P., Petuset E. et al. Diverse assemblages of Middle Devonian megaspores from Libya // *Rev. Palaeobot. Palynol.* 2011. Vol. 165. P. 154—174.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Маринина Д.И. — провела мацерацию проб, отбор и фотографирование мегаспор, определение таксонов и выделение комплексов, разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Орлова О.А. — провела определение таксонов и выделение комплексов, разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Daria I. Marinina — carried out maceration of samples, selection and photographing of megaspores, identification of taxa and isolation of complexes, contributed 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 assume responsibility for all aspects of the work.

Olga A. Orlova — carried out the identification of taxa and identification of complexes, contributed 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 assume responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Маринина Дарья Ильинична* — магистр геологии, аспирант кафедры палеонтологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия

e-mail: dimarinina@mail.ru

SPIN-код: 4548-9492

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7394-930X>

Daria I. Marinina* — Master of Geology, postgraduate student of the Department of Paleontology of the Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University.

1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

e-mail: dimarinina@mail.ru

SPIN-code: 4548-9492

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7394-930X>

Орлова Ольга Александровна — кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры палеонтологии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия

e-mail: oowood@mail.ru

SPIN-код: 4724-7055

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4696-6076>

Olga A. Orlova — Cand. Sci. (Geol.-Min.), Associate Professor of the Department of Paleontology of the Faculty of Geology, Lomonosov Moscow State University.

1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

e-mail: oowood@mail.ru

SPIN-code: 4724-7055

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4696-6076>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



<https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-101-111>
УДК 549.623.1



ЛИЗАРДИТ-«КОЛЬСКИТ» ИЗ ЩЕЛОЧНО-УЛЬТРАОСНОВНОГО МАССИВА ЛЕСНАЯ ВАРАКА (КОЛЬСКИЙ ПОЛУОСТРОВ): НОВЫЕ ДАННЫЕ

М.О. БУЛАХ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»
1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Работа посвящена редкой морфологической разновидности магнезиального серпентина, описанной в 1939 г. в жилах щелочно-ультраосновного массива Лесная Варака (Кольский полуостров) под названием «кольскит» и долгое время считавшейся антигоритом.

Цель. Диагностика полиморфной модификации, выявление кристаллохимических особенностей и определение возможного генезиса «кольскита».

Материалы и методы. Образцы изучены методами электронно-зондового анализа и сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Jeol JSM-IT500, оснащенный энергодисперсионным спектрометром INCA X-Max), порошковой рентгенографии, инфракрасной спектроскопии (ИК-Фурье спектрометр ФСМ-1201) и рамановской спектроскопии (прибор EnSpectr R532).

Результаты. Показано, что серпентин-«кольскит» представлен лизардитом с эмпирической формулой $(\text{Mg}_{2.79}\text{Al}_{0.04}\text{Fe}^{3+}_{0.01})_{\Sigma 2.84}[\text{Si}_{2.06}\text{O}_5](\text{OH})_4$. Рассчитанные параметры тригональной элементарной ячейки: $a = 5,32(1) \text{ \AA}$, $c = 7,88(2) \text{ \AA}$, $V = 193,0(1) \text{ \AA}^3$. Увеличение параметра c по сравнению с таковым у типичного для ультраосновных массивов лизардита, развитого по оливину, указывает на расширение межслоевого расстояния и связано с гидратацией серпентина.

Заключение. Формирование «червеобразных» агрегатов лизардита могло происходить либо путем замещения вермикулита под действием низкотемпературных щелочных гидротерм, либо в результате гипергенного изменения более раннего апооливинового серпентина.

Ключевые слова: серпентин, лизардит, ИК-спектр, КР-спектр, массив Лесная Варака

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование выполнено в рамках госбюджетной темы кафедры минералогии Геологического факультета МГУ № 4-2-2021.

Благодарности: автор благодарит руководство и сотрудников Кольского научного центра РАН за предоставленную возможность посещения массива Лесная Варака, Ф.Д. Сандалова за выполнение электронно-зондовых анализов, а также Д.А. Ксенофонтова за съемку порошковой рентгенограммы.

Для цитирования: Булах М.О. Лизардит-«кольскит» из щелочно-ультраосновного массива Лесная Варака (Кольский полуостров): новые данные. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):101—111. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-101-111>

Статья поступила в редакцию 23.01.2024

Принята к публикации 27.06.2024

Опубликована 28.06.2024

LIZARDITE “KOLSKITE” FROM THE LESNAYA VARAKA ALKALINE ULTRABASIC MASSIF (KOLA PENINSULA): NEW DATA

MARIA O. BULAKH

Lomonosov Moscow State University
1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia

ABSTRACT

Background. A rare morphological variety of magnesian serpentine, described in 1939 in the veins of the Lesnaya Varaka alkaline ultrabasic massif (Kola Peninsula) under the name “kolskite” is studied. For a long time, this variety has been considered an antigorite.

Aim. Identification of the polymorphic modification of “worm-like” serpentine; determination of its crystal chemical features and possible genesis.

Materials and methods. Samples were studied using electron probe analysis and scanning electron microscopy by a Jeol JSM-IT500 scanning electron microscope equipped with an INCA X-Max energy dispersion spectrometer; powder X-ray diffraction; infrared spectroscopy using a FSM-1201 IR Fourier spectrometer; and Raman spectroscopy using a EnSpectr R532 spectrometer.

Results. Serpentine “kolskite” is represented by lizardite with the empirical formula $(\text{Mg}_{2.79}\text{Al}_{0.04}\text{Fe}^{3+}_{0.01})_{\Sigma 2.84}[\text{Si}_{2.06}\text{O}_5](\text{OH})_4$. The calculated parameters of the trigonal unit cell are as follows: $a = 5.32(1) \text{ \AA}$, $c = 7.88(2) \text{ \AA}$, $V = 193.0(1) \text{ \AA}^3$. An increase in parameter c compared to that of apoolivine lizardite typical of ultrabasic objects indicates an expansion of the interlayer distance and is associated with serpentine hydration.

Conclusion. The formation of “worm-like” lizardite aggregates could occur either by replacing vermiculite under the action of low-temperature alkaline hydrothermal solutions, or as a result of hypergenic alteration in the earlier apoolivine serpentine.

Keywords: serpentine, lizardite, IR spectrum, Raman spectrum, Lesnaya Varaka massif

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

Financial disclosure: the research was carried out on the subject of the State Assignment of the Department of Mineralogy of the Faculty of Geology of MSU 4-2-2021.

Acknowledgements: the author thanks the employees of the KSC RAS for the opportunity to visit the Lesnaya Varaka massif, F.D. Sandalov for performing electron probe analyses, as well as D.A. Ksenofontov for obtaining a powder X-ray.

For citation: Bulakh M.O. Lizardite “kolskite” from the Lesnaya Varaka alkaline ultrabasic massif (Kola peninsula): new data. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):101—111. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-101-111>

Manuscript received 23 January 2024

Accepted 27 June 2024

Published 28 June 2024

Введение

Минералы подгруппы серпентина (группы серпентина-каолинита) являются слоистыми силикатами с общей формулой $M_3[T_2O_5](OH)_4$, где M — катионы в октаэдрической координации (видообразующие: Mg, Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ni, Al), T — Si и Al в тетраэдрической координации. Наиболее распространенными минералами этой подгруппы, которые в основном и объединяют под названием «серпентин», являются гидросиликаты магния

с идеализированной формулой $\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5](OH)_4$, представленные несколькими структурными модификациями: лизардитом, клинохризотилом, парохризотилом, ортохризотилом и антигоритом [10, 12]. Кристаллическая структура серпентина образована слоями, каждый из которых состоит из кремнекислородной (тетраэдрической) и бруситоподобной (октаэдрической) сеток, соединенных общими атомами кислорода. Взаимодействие между слоями осуществляется за счет водородной связи, воз-

никающей между O^{2-} в вершинах тетраэдров и OH-группами бруситоподобной сетки. Из-за разницы в величинах ионных радиусов Mg^{2+} и Si^{4+} латеральные размеры октаэдрической сетки превышают латеральные размеры тетраэдрической. Компенсация такой несоразмерности происходит путем: 1) искривления сеток (в антигорите), 2) изоморфизма / появления вакансий (в лизардите) или 3) скручивания слоев в цилиндр (в хризотилах). Способ компенсации (следовательно, появление той или иной структурной модификации) определяется условиями минералообразования [10—12]. Кроме того, описан и так называемый полигональный серпентин (или повлен-хризотил) с переходной между лизардитом и хризотилом структурой, в котором скрученные слои располагаются в ядрах кристаллов [5, 6]. Как известно, в массивных агрегатах разные полиморфные модификации трудноразличимы между собой без приборной диагностики; кроме того, нередко они находятся в тесном срастании друг с другом, и тогда для достоверного определения полиморфного состава серпентиновых масс требуется применение целого комплекса исследований.

Многообразие морфологических форм выделения серпентина привело к выделению многочисленных разновидностей, большая часть которых была описана в XIX — первой половине XX в., когда методы исследования кристаллической структуры минералов только начинали развиваться, да и правила минералогической номенклатуры еще не сложились. В работе [10], например, приводится 30 примеров таких наименований, среди которых есть как общеизвестные *бовенит* и *бастит*, так и не употребляемые уже *антиллит*, *мармолит*, *неолит* и другие. В массиве Лесная Варак на Кольском полуострове в 1939 г. Н.Е. Ефремовым была описана одна из подобных разновидностей, получившая название *кольскит* и представляющая собой тонкочешуйчатые массы с удлинёнными червеобразно искривленными кристаллами. В 1950-е гг. как сам «кольскит», изначально считавшийся самостоятельным минералом, так и минеральные ассоциации, в которых он находится, изучались Л.Н. Бельковой [1] и С.С. Ильгиным [3]. В те годы были выполнены морфологические описания данной разновидности серпентина, определены химический состав, удельный вес, оптические свойства. Согласно сведениям из работы [3], порошковая рентгенограмма «кольскита» оказалась очень близка к рентгенограмме только что на тот момент описанного

лизардита из Корнуолла (Англия) [16]; тем не менее, ссылаясь на физические и оптические свойства, Л.Н. Белькова относила его к антигориту. Кроме того, ею было высказано предположение о том, что образование «кольскита» происходит путем гипергенного замещения вермикулита, а тот, в свою очередь, развивается по амфиболу с образованием флогопита на промежуточном этапе процесса [1].

Следующие шесть десятилетий серпентиновые жилы массива Лесная Варак оставались вне области минералогических исследований, да и в целом по минералогии данного массива с 1960-х гг. опубликовано очень мало работ. Между тем отнесение «кольскита» к антигориту не согласуется с представлениями о его гипергенном происхождении, поскольку антигорит является наиболее высокотемпературной из полиморфных модификаций $Mg_3[Si_2O_5](OH)_4$ и образуется при температуре выше $250^\circ C$ [9]. В настоящей статье постараемся более точно охарактеризовать серпентин из жил массива Лесная Варак с использованием современных методов исследования и определить его генетический тип.

Геологическое строение массива Лесная Варак

Массив Лесная Варак, расположенный в юго-западной части Кольского полуострова, относится к Хабозерской группе Салма-Ковдорского пояса щелочно-ультраосновных интрузивов северо-восточной части Фенноскандинавской щелочной провинции. Данный интрузив залегает среди фенитизированных гнейсов и амфиболитов беломорской серии архея и в плане имеет форму вытянутого в северо-западном направлении овала площадью $\sim 9 \text{ км}^2$. Центральную часть массива составляют оливиниты, которые занимают до 85—90 % объема интрузива и состоят главным образом из форстерита For_{85-89} . С юга и юго-запада тело оливинитов окаймляется маломощной зоной пироксенитов, образованной собственно диопсид-авгитовыми пироксенитами, а также нефелиновыми, оливиновыми, меланитовыми и полевошпатовыми пироксенитами. Эти породы рассеяны жилами и дайками щелочных сиенитов, тингуаитов, ийолитов, ийолит-пегматитов и доломитовых карбонатитов. В центральной, южной и восточной частях массива интенсивно проявились процессы гидротермального изменения оливинитов и пород дайкового комплекса, в результате чего сформировались тремолитовые, клиногумит-тремолитовые, тремолит-доломитовые, флогопитовые и серпентиновые «кольскитовые» жилы [3].

Материалы и методы

В настоящей работе приведены результаты изучения десяти образцов «кольскита», собранных автором в оливинитовом карьере Лесной Вараки в сентябре 2023 г. Описания и фотографии прозрачно-полированных шлифов выполнены с помощью микроскопа “Axioplan 2 Imaging” на кафедре минералогии Геологического факультета МГУ. Данные по химическому составу серпентина получены электронно-зондовым методом с помощью энергодисперсионного спектрометра “INCA X-Max”, установленного на сканирующем электронном микроскопе “Jeol JSM-IT500”, в Лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ (аналитик Ф.Д. Сандалов). Линии профилей характеристического рентгеновского излучения оптимизированы и нормализованы с использованием стандартов природных силикатов. Железо в анализах принято трехвалентным в связи с предполагаемой высокоокислительной обстановкой минералообразования, что подтверждается и данными «мокрых» химических анализов середины XX в.

Съемка порошковой рентгенограммы серпентина проведена на дифрактометре “STOE-STADI MP” с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения на кафедре кристаллографии и кристаллохимии Геологического факультета МГУ (аналитик Д.А. Ксенофонтов).

Инфракрасные (ИК) спектры получены автором на ИК-Фурье-спектрометре ФСМ-1201 в диапазоне $400\text{—}4000\text{ см}^{-1}$ в режиме «пропускание».



Рис. 1. Жила серпентина-«кольскита» в оливинитах. Оливинитовый карьер, массив Лесная Варака, Кольский полуостров

Fig. 1. The vein of serpentine “kolskite” in olivinites. Olivinite quarry, Lesnaya Varaka massif, Kola Peninsula

Рамановские (КРС) спектры сняты на спектрометре EnSpectr R532 с зеленым лазером (длина волны 532 нм) в диапазоне $300\text{—}4000\text{ см}^{-1}$ (время накопления сигнала — 1 с , усреднение по 100 сканам). В первом случае пробы готовились в виде суспензии на вазелиновом масле, во втором съемка проводилась на ориентированных образцах. Оба прибора установлены на кафедре минералогии Геологического факультета МГУ.

Результаты

В оливинитовом карьере Лесной Вараки можно выделить две макроскопически различимых разновидности серпентиновых агрегатов. Первая — это типичные для ультраосновных массивов, но по какой-то причине не описанные здесь апооливинитовые хризотил-лизардитовые серпентиниты, состоящие из пластинчатого и гребенчатого серовато-оливково-зеленого лизардита с многочисленными параллельными и пересекающимися черными магнетит-хризотиловыми жилками. Подобные серпентиниты не имеют широкого распространения в массиве Лесная Варака, и форма их тел неясна.

Другой тип — сам «кольскит», слагающий многочисленные жилы мощностью в большинстве своем от $0,5$ до $30\text{—}35\text{ см}$, расположенные субпараллельно друг другу или под углом, близким к 90° , и выделяющиеся на фоне темно-серых оливинитов бледно-желтым цветом (рис. 1). Такой серпентин представляет собой тонкокристаллические фарфоровидные агрегаты цвета слоновой кости, пронизанные тонкими светло-желтыми или бесцветными прерывистыми жилками (рис. 2а), которые являются, по-видимому, искаженными длинностолбчатыми кристаллами, получившими у Л.Н. Бельковой и С.С. Ильгина [1, 3] образное определение «червеобразных» или «гельминтоподобных». Поперечное сечение их обычно округлое, без четко выраженных геометрических форм; вдоль удлинения они покрыты сетью продольных бороздок. Эти обособления ориентированы, в целом, параллельно друг другу, но некоторые из них довольно существенно искривлены. Размер их в изученных образцах не превышает 2 мм в поперечном сечении (а чаще $<0,5\text{ мм}$), длина же варьирует от 1 мм до $2\text{—}3\text{ см}$. Л.Н. Бельковой [1] описаны выделения, достигающие $4\text{—}5\text{ см}$ в поперечнике. В прозрачно-полированных шлифах видно, что основная масса жильного серпентина сложена разновеликими (длиной от 10 мкм) хаотично ориентированными индивидами такой же формы. Очень характерны для подобных кристаллов многочисленные трещины

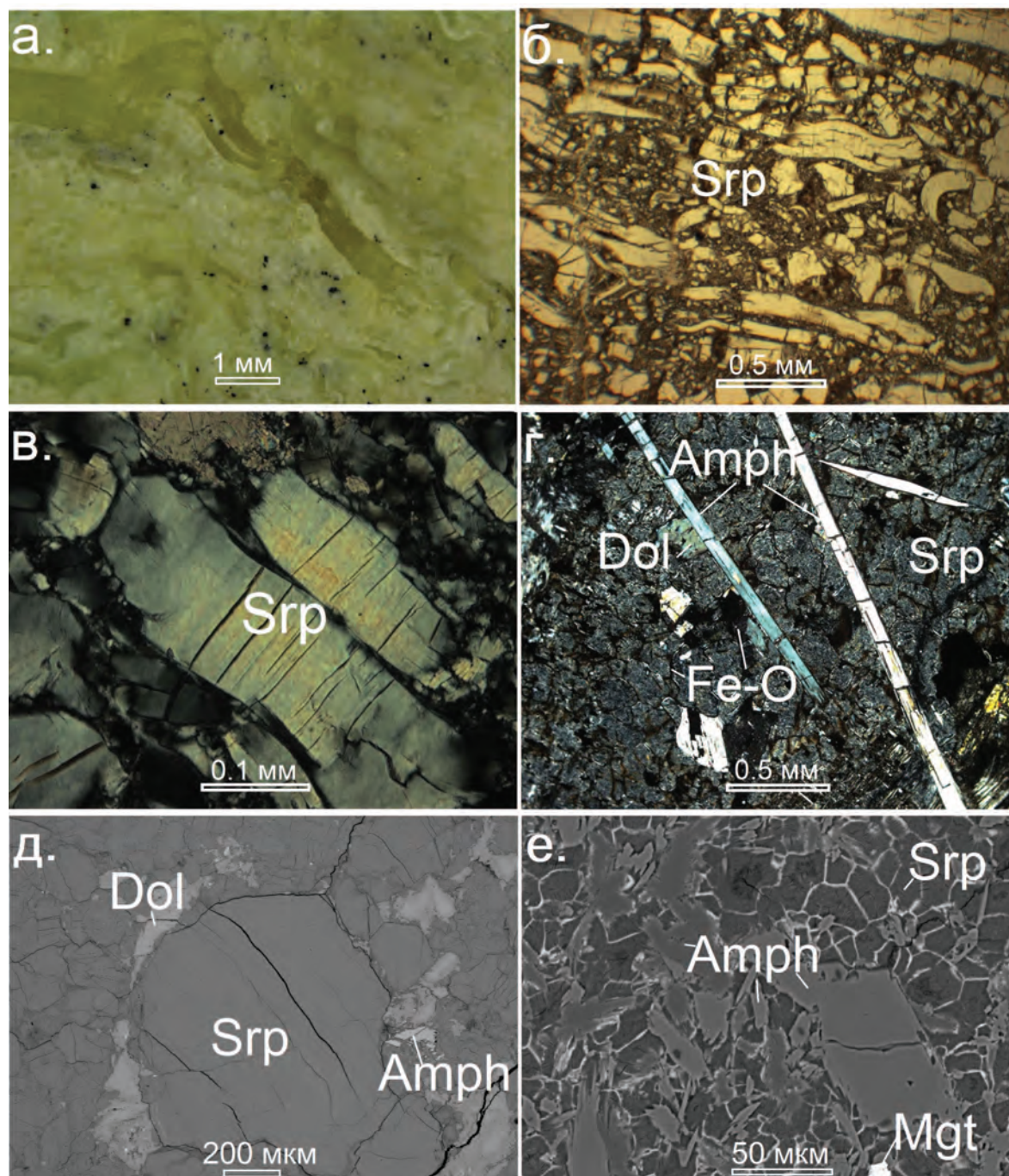


Рис. 2. а—в — «червеобразные» кристаллы серпентина (Srp) в тонкозернистой основной массе; г— агрегат серпентина, рассеченный сетью прожилков оксидов и гидроксидов железа (Fe-O), с кристаллами рихтерита (Amph) и доломита (Dol), составляющий коричневые участки жил; д— включения доломита и рихтерита в «кольскитовом» агрегате; е— ячеистый агрегат серпентина с вростками рихтерита (различия в контрасте обусловлены вариациями содержания Fe) и магнетита (Mgt); б — фото в проходящем свете без анализатора, в—г — с анализатором; д—е — РЭМ-фото в отраженных электронах

Fig. 2. а—в — “worm-like” serpentine crystals (Srp) in a fine-grained bulk; г— a serpentine aggregate dissected by a network of veins of iron oxides and hydroxides (Fe-O), with crystals of richterite (Amph) and dolomite (Dol), composing brown sections of veins; д— inclusions of dolomite and richterite in aggregate of “kolskite”; е— a serpentine cellular aggregate with richterite and magnetite (Mgt); б — in passing light without an analyzer, в—г — with an analyzer; д—е — SEM (BSE) images

спайности перпендикулярно направлению удлинения (рис. 2б, в).

Светлоокрашенные центральные части жил практически мономинеральные — серпентиновые; количество прочих минералов составляет обычно <5 об.%, а представлены они преимущественно ксеноморфными зернами Sr-содержащего доломита (величиной 0,2—2 мм), кристаллами рихтерита (до 0,5 мм), а также редкими мельчайшими (до 10 мкм) кристаллами частично окисленного магнетита (рис. 2д). В зальбандах серпентиновая масса достаточно резко сменяется массивным охристо-коричневым агрегатом с обильным рихтеритом, образующим бутылкочно-зеленые шестоватые и игольчатые кристаллы длиной до 2 см и волокнистые асбесто-подобные выделения. Охристо-коричневая масса тоже состоит преимущественно из мелкого пластинчатого, иногда «червеобразного» серпентина, ассоциирующего с неидентифицированным магнезиальным гидросиликатом с атомным соотношением $Mg:Si = 1:1$. Местами серпентиновый агрегат разбит сетью тонких (в несколько микрон) прожилков гидроксидов железа (которые и придают агрегату характерный цвет) таким образом, что образуются своеобразные полигональные ячейки (рис. 2г, е). В этой зоне распространены доломит, магнетит, хромит, пирротин и пентландит.

Химический состав светлого «червеобразного» серпентина, определенный электронно-зондовым методом, варьирует в очень небольших пределах; в среднем он таков (мас.%): 44,29 SiO_2 , 40,13 MgO , 0,67 Al_2O_3 , 0,34 Fe_2O_3 , рассчитанное по стехиометрии количество H_2O — 12,84. Эмпирическая формула в расчете на 7 атомов O: $(Mg_{2.79}Al_{0.04}Fe^{3+}_{0.01})_{\Sigma 2.84}[Si_{2.06}O_5](OH)_4$. Эти данные хорошо согласуются с результатами «мокрых» химических анализов «кольскита» из работы [1]. Серпентин, слагающий бурые участки породы и ассоциирующий с рихтеритом, содержит 3—7 мас.% Fe_2O_3 , его типичная формула: $(Mg_{2.62}Fe^{3+}_{0.18})_{\Sigma 2.80}[Si_{2.06}O_5](OH)_4$.

Порошковая рентгенограмма «кольскита» (табл.) является типичной для серпентинов и в целом отвечает lizardиту. Диагностические отражения антигорита — интенсивный 2,52, дублет 2,15—2,16, сочетание рефлексов 1,55, 1,52, 1,51, 1,50 (Å) [16] — не проявлены. Тем не менее привлекают внимание отсутствие рефлексов 3,89 и 2,15 (Å), а также очень низкая интенсивность рефлекса 2,49 Å, что для lizardита наиболее распространенных в природе полиморфов нехарактерно. Рассчитанные параметры тригональной элементарной ячейки: $a = 5,32(1)$ Å, $c = 7,88(2)$ Å, $V = 193,0(1)$ Å³. Если

параметр a хорошо соответствует ячейке lizardита [11], то параметр c заметно больше: как правило, его величина находится в пределах 7,23—7,33 Å. По-видимому, расширение ячейки по оси c связано с увеличением межслоевого расстояния.

Полиморфные модификации серпентина хорошо диагностируются методами рамановской и ИК-спектроскопии. Согласно данным работ [4, 13] отличия в ИК-спектрах lizardита, антигорита и хризотила проявлены в первую очередь в области 900—1100 см⁻¹, соответствующей валентным антисимметричным колебаниям связей Si—O и Si—O—Si (ν_{as}): для антигорита характерен четко выраженный дублет 985 и 1080 см⁻¹. У lizardита из-за нарушения симметрии тетраэдров компоненты дублета сливаются, а максимум первой полосы смещается в низкочастотную сторону до 950—960 см⁻¹, для волокнистого хризотила же в связи с проявлением эффекта поляризации типичен триплет 955, 1020 и 1080 см⁻¹. Полоса деформационных колебаний Mg—O близ 560 см⁻¹ отчетливо выражена в спектрах антигорита, тогда как у lizardита и хризотила вследствие искажения октаэдров она слабая или вовсе отсутствует.

Кроме того, ИК-спектры полиморфных модификаций серпентина различаются значениями частот и профилем в области валентных колебаний OH-групп. На рисунке 3 приведены ИК-спектры «кольскита» и «обычного» апооливинового lizardита из того же массива Лесная Варака. Максимум поглощения в области 900—1100 см⁻¹ для обоих разновидностей приходится на 960 см⁻¹, но в случае «кольскита» отмечается небольшое плечо 1020 см⁻¹. Отсутствие полосы деформационных колебаний Mg—O близ 560 см⁻¹ в спектре червеобразного серпентина свидетельствует о большей степени искажения октаэдров по сравнению с гребенчатым lizardитом. Широкая малоинтенсивная полоса в районе 3400 см⁻¹, которую относят к валентным колебаниям OH-групп в молекулах воды [7], свидетельствует о присутствии в пробах «кольскита» небольшого количества молекулярной H_2O (типичная для нее полоса деформационных колебаний близ 1640 см⁻¹ проявлена слабо; на рисунке 3 эта область вырезана).

Рамановские спектры антигорита отличаются от спектров lizardита и хризотила отчетливым расщеплением полосы валентных симметричных колебаний Si—O—Si и смещением ее наиболее интенсивной компоненты в область более низких частот, а также профилем спектра в диапазоне частот валентных колебаний OH-групп [8, 14]. Таким образом, КР-спектроскопия тоже показывает,

Таблица. Данные порошковых рентгенограмм серпентина-«кольскита» и гребенчатого лизардита из массива Лесная Варака в сравнении с рентгенограммой лизардита-1Т из базы данных WWW-МИНКРИСТ (<https://mincryst.iem.ac.ru/rus/>)

Table. Powder X-ray diffraction data of serpentine “kolskite” and combed lizardite from the Lesnaya Varaka massif in comparison with the radiograph lizardite-1T from the database WWW-MINCRYST

<i>hkl</i>	«Кольскит», Лесная Варака		Лизардит, Лесная Варака		Лизардит-1Т (МИНКРИСТ, карта № 2624)	
	<i>d</i> , Å	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> , Å	<i>I</i> / <i>I</i> ₀	<i>d</i> , Å	<i>I</i> / <i>I</i> ₀
001	7,31	100	7,36	100	7,31	85
100	4,55	55	4,60	23	4,61	35
101			3,89	1	3,89	45
002	3,63	56	3,65	52	3,66	49
102	2,88	7	2,86	5	2,86	16
110	2,66	2	2,65	5	2,66	4
203	2,59	2	2,60	2		
111	2,487	7	2,501	80	2,498	100
003	2,443	3	2,440	10	2,437	4
201	2,186	2	2,193	3	2,195	3
103			2,155	3	2,154	4
112			2,150	18	2,150	46
202			1,950	3	1,948	4
004	1,825	2	1,826	2	1,828	2
113	1,799	3	1,796	26	1,796	29
210			1,740	4	1,740	4
211			1,691	5	1,693	6
212			1,572	3	1,571	4
300	1,533	5	1,535	25	1,535	28
301	1,503	2	1,502	11	1,502	13
005	1,459	1	1,460	1	1,462	2
	<i>a</i> = 5,32(1) Å, <i>c</i> = 7,88(2) Å, <i>V</i> = 193,0(1) Å ³		<i>a</i> = 5,32(1) Å, <i>c</i> = 7,32(5) Å, <i>V</i> = 179,2(2) Å ³		<i>a</i> = 5,325 Å, <i>c</i> = 7,259 Å, <i>V</i> = 178,26 Å ³	

что серпентин Лесной Варакы однозначно не является антигоритом. С другой стороны, КР-спектр «кольскита» (рис. 4а) отличается от спектра «обычного» лизардита рядом признаков — в первую очередь очень низкой интенсивностью полосы ν O—H по сравнению с таковой в спектре гребенчатого лизардита (рис. 4б) и некоторым ее смещением в высокочастотную сторону до 3694 см⁻¹. Стоит отметить, что спектр «кольскита» был снят с ориентированного образца при направлении лазерного луча по нормали к поперечному сечению кристалла, т.е. параллельно удлинению. Как недавно показано в работе [15], такое поведение указанной компоненты спектра свидетельствует

о том, что луч ориентирован параллельно оси с серпентинового кристалла. С ориентировкой, по-видимому, связано смещение и других полос в сторону высоких частот, появление отчетливого плеча 710 см⁻¹ и полосы 768 см⁻¹, что хорошо согласуется с данными работы [8] по изучению анизотропии в полиморфах серпентина.

Обсуждение результатов и выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что серпентин-«кольскит» определенно относится не к антигориту, как считалось ранее, а к лизардиту, главной кристаллохимической особенностью которого является

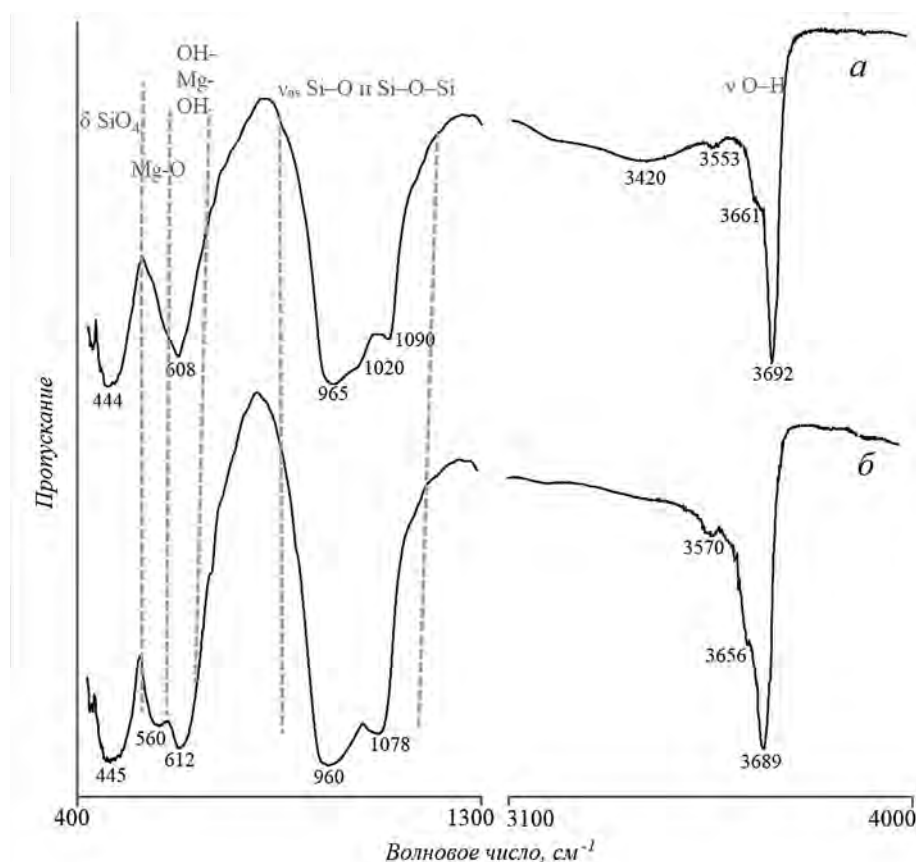


Рис. 3. ИК-спектры: а — «кольскита»; б — гребчатого lizardита из массива Лесная Варакка
Fig. 3. Infrared spectra of: a — “kolskite”; б — lizardite from the Lesnaya Varaka massif

увеличенное расстояние между электронейтральными слоями в структуре, куда, по-видимому, входит некоторое количество молекулярной воды. Ее присутствие устанавливается, во-первых, методом ИК-спектроскопии (рамановская спектроскопия в данном случае менее чувствительна); во-вторых, прямым определением при химическом анализе (около 2 мас.%) и данными дифференциально-термического исследования из работы [1] (потеря массы в районе 100 °С). Расстояние между слоями в «обычном» lizardите близко к 2 Å, а величина молекулы H₂O составляет около 2,8 Å, так что вхождение воды в межслоевое пространство в отдельных участках структуры приводит к некоторому расширению этого пространства и ослаблению связей между электронейтральными пакетами. Последним обуславливается наблюдаемая у «червеобразных» кристаллов слюдоподобная спайность. В целом, присутствие воды между слоями свидетельствует о низкотемпературных условиях формирования (или же последующего изменения) такого lizardита.

Реликты вермикулита (как и прочих минералов группы смектита и других слоистых силикатов) в изученных агрегатах не выявлены ни наблюдениями под сканирующим электронным микроскопом, ни рентгенодифракционным анализом, поэтому предположение Л.Н. Бельковой о развитии серпентина по вермикулиту подтвердить не удастся. Косвенно на такой способ образования указывает только своеобразная морфология «кольскита» и присутствие в нем Al при отсутствии значимых количеств этой примеси в апооливиновом серпентине. Стоит отметить, что подобный тренд — вынос глинозема и увеличение атомной доли Mg относительно Si — для зоны гипергенеза в целом нетипичен; вероятно, смена вермикулита серпентином происходила под действием низкотемпературных щелочных гидротерм.

Возможен и иной способ образования lizardита-«кольскита». Так, Н.Н. Зинчуком [2] на основании данных изучения коры выветривания кимберлитов показано, что начальные гипергенные преобразования серпентина (lizardита)

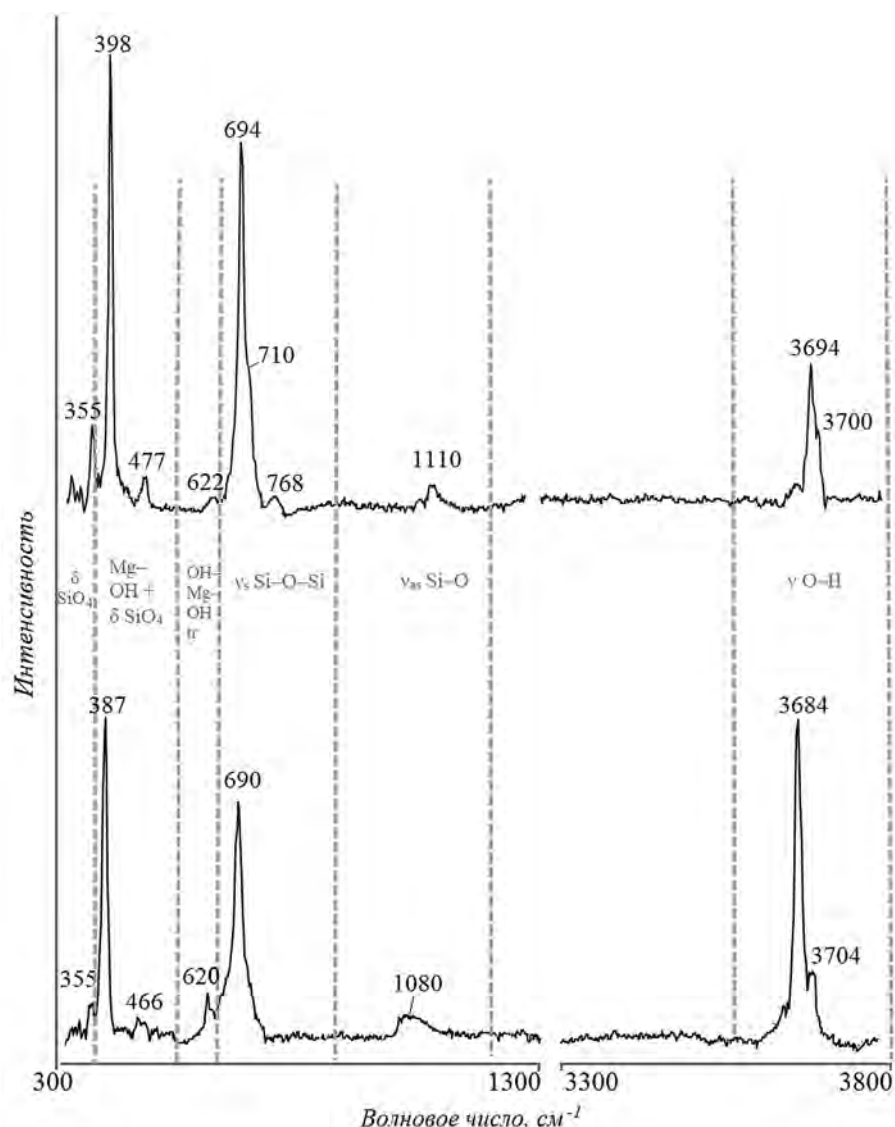


Рис. 4. Рамановские (KPC) спектры: а — «кольскита»; б — апооливинового лизардита из массива Лесная Варакка
Fig. 4. Raman spectra of а — “kolskite”; б — lizardite from the Lesnaya Varaka massif

выражены его политипными превращениями и изменением морфологии. По сведениям этого автора, гипергенные новообразования лизардита представлены глобулами, сочленяющимися в втянутые червеобразные сростки, что очень

напоминает форму выделения «кольскита». Таким образом, изученная разновидность лизардита может являться продуктом гипергенного преобразования более раннего апооливинового серпентина.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белькова Л.Н. Антигорит Лесной Варакки // К минералогии постмагматических процессов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1959. С. 152—169.
2. Зинчук Н.Н. Особенности строения и состава коры выветривания на кимберлитовых породах // Вестник Пермского университета. Геология. 2016. Вып. 1. С. 60—76. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.30.60>
3. Кухаренко А.А., Орлова М.П., Булах А.Г., Багдасаров Э.А., Римская-Корсакова О.М., Нефедов Е.И., Ильинский Г.А., Сергеев А.С., Абакумова Н.Б. Каледонский комплекс ультраосновных, щелочных пород и карбонатитов Кольского полуострова и Северной Карелии. М.: «Недра», 1965. 772 с.
4. Balan E., Fritsch E., Radtke G., Paulatto L., Juillot F., Petit S. First-principles modeling of infrared spectrum

- of antigorite // *European Journal of Mineralogy*. 2021. Vol. 33. P. 389—400. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-389-2021>
5. Barale L., Capitani G., Castello P., Compagnoni R., Cossio R., Fiore G., Pastero L., Mellini M. Late metamorphic veins with dominant PS-15 polygonal serpentine in the Monte Avic ultramafite // *European Journal of Mineralogy*. 2023. Vol. 35. No. 3. P. 347—360. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-347-2023>
 6. Baronnet A., Devouard B. Microstructures of common polygonal serpentine from axial HTREM imaging, electron diffraction, and lattice-simulation data // *Canadian Mineralogist*. 2005. Vol. 43. P. 513—542.
 7. Chukanov N.V., Vidasina M.F. *Vibrational (Infrared and Raman) Spectra of Minerals and Related Compounds*. Springer International Publishing, 2020. 1376 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26803-9>
 8. Compagnoni R., Cossio R., Mellini M. Raman anisotropy in serpentine minerals, with a caveat on identification // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2021. Vol. 52. No. 7. P. 1—12. <https://doi.org/10.1002/jrs.6128>
 9. Evans B.W. The serpentinite multisystem revisited: chrysotile is metastable // *International Geology Review*. 2004. Vol. 46. P. 479—506.
 10. Faust G.T., Fahey J.J. *The serpentine-group minerals*. Washington: Geological Survey Professional Paper, 1964. 92 p.
 11. Mellini M. The crystal structure of lisardite 1T: hydrogen bonds and politipism // *American Mineralogist*. 1982. Vol. 67. P. 587—598.
 12. Mellini M. Structure and microstructure of serpentine minerals // *Minerals at the Nanoscale* / Eds. Nieto F., Livi K.J.T., Oberti R. European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, 2013. Chap. 5. P. 1—27. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.14.5>
 13. Sakaguchi I., Kouketsu Y., Michibayashi K., Wallis S.R. Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy of antigorite, chrysotile, and lizardite // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2020. Vol. 115. No. 4. P. 303—312. <https://doi.org/10.2465/jmps.190807>
 14. Tarling M.T., Rooney J.S., Viti C., Smith S.A.F., Gordon K.C. Distinguishing the Raman spectrum of polygonal serpentine // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2018. Vol. 49. No. 15. P. 1—7. <https://doi.org/10.1002/jrs.5475>
 15. Tarling M.S., Demurtas M., Smith S.A.F., Rooney J.S., Negrini M., Viti C., Petriglieri J.R., Gordon K.C. Crystallographic orientation mapping of lizardite serpentinite by Raman spectroscopy // *European Journal of Mineralogy*. 2022. Vol. 34. P. 285—300. <https://doi.org/10.5194/ejm-34-285-2022>.
 16. Whittaker E.J.F., Zussman J. The characterization of serpentine minerals by X-ray diffraction // *Mineralogical Magazine*. 1956. Vol. 31. P. 107—126.

REFERENCES

1. Belkova L.N. Antigorite of the Forest Varaki. / In Book: To mineralogy of postmagmatic processes. Leningrad, LSU Publishing House, 1959. P. 152—169 (In Russian).
2. Zinchuk N.N. Specific features of structure and composition of the weathering crust of kimberlite rocks // *Bulletin of Perm University (Geology)*. 2016. No. 1. P. 60—76 (In Russian). <https://doi.org/10.17072/psu.geol.30.60>
3. Kukhareno A.A., Orlova M.P., Bulakh A.G., Bagdasarov E.A., Rinskaya-Korsakova O.M., Nefedov E.I., Ilyinsky G.A., Sergeev A.S., Abakumova N.B. Caledonian complex of ultramafic, alkaline rocks and carbonatites of the Kola Peninsula and North Karelia. Moscow: Nedra Publ., 1965. 772 p. (In Russian)
4. Balan E., Fritsch E., Radtke G., Paulatto L., Juillot F., Petit S. First-principles modeling of infrared spectrum of antigorite // *European Journal of Mineralogy*. 2021. Vol. 33. P. 389—400. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-389-2021>
5. Barale L., Capitani G., Castello P., Compagnoni R., Cossio R., Fiore G., Pastero L., Mellini M. Late metamorphic veins with dominant PS-15 polygonal serpentine in the Monte Avic ultramafite // *European Journal of Mineralogy*. 2023. Vol. 35. No. 3. P. 347—360. <https://doi.org/10.5194/ejm-35-347-2023>
6. Baronnet A., Devouard B. Microstructures of common polygonal serpentine from axial HTREM imaging, electron diffraction, and lattice-simulation data // *Canadian Mineralogist*. 2005. Vol. 43. P. 513—542.
7. Chukanov N.V., Vidasina M.F. *Vibrational (Infrared and Raman) Spectra of Minerals and Related Compounds*. Springer International Publishing, 2020. 1376 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26803-9>
8. Compagnoni R., Cossio R., Mellini M. Raman anisotropy in serpentine minerals, with a caveat on identification // *Journal of Raman Spectroscopy*. 2021. Vol. 52. No. 7. P. 1—12. <https://doi.org/10.1002/jrs.6128>
9. Evans B.W. The serpentinite multisystem revisited: chrysotile is metastable // *International Geology Review*. 2004. Vol. 46. P. 479—506.
10. Faust G.T., Fahey J.J. *The serpentine-group minerals*. Washington: Geological Survey Professional Paper, 1964. 92 p.
11. Mellini M. The crystal structure of lisardite 1T: hydrogen bonds and politipism // *American Mineralogist*. 1982. Vol. 67. P. 587—598.
12. Mellini M. Structure and microstructure of serpentine minerals // *Minerals at the Nanoscale* / Eds. Nieto F., Livi K.J.T., Oberti R. European Mineralogical Union Notes in Mineralogy, 2013. Chap. 5. P. 1—27. <https://doi.org/10.1180/EMU-notes.14.5>
13. Sakaguchi I., Kouketsu Y., Michibayashi K., Wallis S.R. Attenuated total reflection infrared (ATR-IR)

- spectroscopy of antigorite, chrysotile, and lizardite // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2020. Vol. 115. No. 4. P. 303—312. <https://doi.org/10.2465/jmps.190807>
14. Tarling M.T., Rooney J.S., Viti C., Smith S.A.F., Gordon K.C. Distinguishing the Raman spectrum of polygonal serpentine // Journal of Raman Spectroscopy. 2018. Vol. 49. No. 15. P. 1—7. <https://doi.org/10.1002/jrs.5475>
 15. Tarling M.S., Demurtas M., Smith S.A.F., Rooney J.S., Negrini M., Viti C., Petriglieri J.R., Gordon K.C. Crystallographic orientation mapping of lizardite serpentine by Raman spectroscopy // European Journal of Mineralogy. 2022. Vol. 34. P. 285—300. <https://doi.org/10.5194/ejm-34-285-2022>.
 16. Whittaker E.J.F., Zussman J. The characterization of serpentine minerals by X-ray diffraction // Mineralogical Magazine. 1956. Vol. 31. P. 107—126.

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Булах М.О. — собрала каменный материал, выполнила его описание, провела спектроскопическое изучение, участвовала в электронно-зондовых и рентгенографических исследованиях, интерпретировала результаты, подготовила текст статьи и графические материалы. Согласно принять ответственность за все аспекты работы.

Bulakh M.O. — collected the samples, performed its description, conducted a spectroscopic study, participated in electron probe and X-ray studies, interpreted the results, prepared the text of the article and graphic materials, accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Булах Мария Олеговна — кандидат геолого-минералогических наук, младший научный сотрудник кафедры минералогии Геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.
1, Ленинские горы, г. Москва 119991, Россия
e-mail: aregon27@mail.ru
SPIN-код: 9929-8312
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5100-4687>

Maria O. Bulakh — Cand. Sci. (Geol.-Min.), junior researcher, Department of Mineralogy, Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University.
1, Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia
e-mail: aregon27@mail.ru
SPIN-code: 9929-8312
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5100-4687>



ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ, ВКЛЮЧЕНИЙ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СИНИХ КОРУНДОВ ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СТАЖ-2, ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ПАМИР

А.К. ЛИТВИНЕНКО¹, Д.Б. ВАНДАНОВА², О.А. ШИЛОВА², С.Б. ПАХОМОВА^{2*}

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

² Гохран России
14, 1812 года ул., г. Москва 121170, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Месторождение синего корунда Стаж-2 является представительным объектом на постсоветской территории с перспективами на добычу ювелирного кристаллосырья. По своему геологическому положению оно отнесено к контактово-реакционному (биметасоматическому), сформировавшемуся в контактах гранитных жил и магнезитов, и может быть сопоставлено со всемирно известным кашмирским месторождением Сумджем. На месторождении в ходе его изучения в конце прошлого века не были выполнены минералогические исследования синего корунда с использованием прецизионных методов: не были получены данные по ИК-, КР-спектрам и спектрам поглощения, КВ-люминесценции, закономерностям в распределении окраски, твердым и газовой-жидким включениям, деформациям и химическом составе. Определение этих параметров могло бы послужить основой для вовлечения кристаллосырья данного месторождения в ювелирную сферу.

Целью является исследование ИК-, КР-спектров, спектров поглощения, КВ-люминесценции, распределения окраски внутри кристаллов, твердых и газовой-жидких включений, деформаций и химического состава синего корунда месторождения Стаж-2.

Объектом исследования являются синие корунды с месторождения Стаж-2, расположенного в архейских магнезитовых мраморах горанской метаморфической серии Юго-Западного Памира.

Материалы и методы. Нами были изучены 4 полированные пластины массой от 0,48 до 0,76 карата, площадью около 1 см², толщиной 1,5–2 мм и две ограненные вставки: «Овал» 2,86 карата, 9,5×7,5 мм и «Круг» 1,35 карата, 9 мм. Пластины и вставки изготовлены из образцов коллекции кафедры минералогии и геммологии МГРИ.

Исследование проводилось шестью методами: 1) оптической микроскопией на стереомикроскопе «Leica S9D»; 2) инфракрасной спектроскопией в среднем ИК-диапазоне от 400 до 4500 см⁻¹ с ИК-Фурье спектрометром «Nicolet iS50 FT-IR Thermo Scientific», детектор DTGS KBr, диафрагма 200, разрешение 4 см⁻¹, приставка «PIKE DRIFTS»; 3) спектроскопией комбинационного рассеяния света с помощью конфокального КР-микроспектрометра «Renishaw InVia Qontor» с возбуждающим твердотельным лазером 532 нм, номинальной мощностью 100 мВт и дифракционной решеткой 1800 линий/мм; 4) УФ-Вид-БЛИК спектроскопией, зарегистрированной спектрометром «PerkinElmer Lambda 1050WB» в диапазоне 270–1200 нм, со спектральным разрешением 0,5 нм, скоростью сканирования 56,7 нм/мин; 5) микрорентгенофлуоресцентным анализом на микро-РФА-спектрометре «Bruker TORNADO M4» с мощностью рентгеновской трубки 20 Вт и режимом вакуума 20 мбар, диаметром рентгеновского пучка 50 мкм; 6) люминесцентной визуализацией в коротковолновом излучении 225 нм, зафиксированной на приборе Diamond View. Инструментальное изучение проводилось в лаборатории исследования драгоценных камней Гохрана России.

Результаты. 1. Впервые были получены спектрометрические данные синих корундов из месторождения Стаж-2 методами ИК-, КР- и УФ-Вид-БЛИК-спектроскопии, а также микро-РФА. 2. В синем корунде было установлено локальное (очаговое) содержание хрома — элемента, чужеродного для гранитов, по которым образовались метасоматиты с корундом. Участки с хромом имеют резкие прямолинейные границы. 3. В составе синего корунда были определены циркон, диаспор, бемит, мусковит, кальцит и газовой-жидкие включения с CO₂. 4. Выявлены две

генерации окрасок, обусловленные новообразованными трещинами и минералами. 5. Включения диаспора, бемита, мусковита и кальцита являются результатом реакции гидратации и карбонатизации, протекавшими между корундом и анортитом на позднем этапе развития месторождения. 6. В составе синего корунда были установлены Ti и Fe с преобладанием титана над железом, что является отличительной особенностью месторождения Стаж-2 от многих других месторождений синих корундов и сапфиров.

Заключение. Полученные материалы могут быть использованы Гохраном России для идентификации сапфиров контактово-реакционного (биметасоматического) генезиса, к которому также относятся самые качественные кашмирские сапфиры, и в учебном процессе кафедры минералогии и геммологии.

Ключевые слова: Юго-Западный Памир, месторождение, Стаж-2, синий корунд, ИК-спектроскопия, КР-спектроскопия, РФА, зональная окраска, газовой-жидкие включения, диаспор, бемит, титан, железо, хром, ванадий, галлий

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Литвиненко А.К., Ванданова Д.Б., Шилова О.А., Пахомова С.Б. Особенности оптических свойств, включений и химического состава синих корундов из месторождения Стаж-2, Юго-Западный Памир. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):112—123. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-112-123>

Статья поступила в редакцию 28.02.2024

Принята к публикации 25.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

OPTICAL PROPERTIES, INCLUSIONS, AND CHEMICAL COMPOSITION OF BLUE CORUNDUM FROM THE STAZH-2 DEPOSIT, SOUTH-WESTERN PAMIR

ANDREI K. LITVINENKO¹, DARIMA B. VANDANOVA², OKSANA A. SHILOVA², SVETLANA B. PAKHOMOVA^{2,*}

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

² Gokhran of Russia
14, 1812 goda str., Moscow 121170, Russia

ABSTRACT

Background. The Stazh-2 deposit of blue corundum is a representative object in the post-Soviet territory with prospects for mining of jewelry crystal raw materials. In terms of its geological position, the deposit can be classified as a contact-reaction (bimetasomatic) deposit formed in the contacts of granite veins and magnesites, being comparable to the world-famous Kashmir Sumjam deposit. During its study at the end of the last century, no mineralogical studies of blue corundum were conducted using precision methods, such as IR, Raman and absorption spectra, DiamindView luminescence, in order to establish patterns in color distribution, solid and gas-liquid inclusions, deformations and chemical composition. Determination of these parameters could serve as a basis for the involvement of crystal from this deposit in the jewelry industry.

Aim. Examination of blue corundum from the Stazh-2 deposit located in Archean magnesite marbles of the Goran metamorphic series of the South-West Pamir using IR, Raman spectra, absorption spectra, and DiamindView luminescence to establish color distribution within crystals, solid and gas-liquid inclusions, deformations, and their chemical composition.

Materials and methods. Four polished plates weighing from 0.48 to 0.76 carats with an area of about 1 cm² and a thickness of 1.5—2 mm, as well as two faceted inserts — “Oval” 2.86 carats,

9.5x7.5 mm, and “Circle” 1.35 carats, 9 mm. The inserts were prepared from samples from the collection of the Department of Mineralogy and Gemology, Russian State Geological Prospecting University (MGRI). The research methodology comprised (1) optical microscopy using a Leica S9D stereomicroscope; (2) infrared spectroscopy in the mid-IR range from 400 cm⁻¹ to 4500 cm⁻¹ with a Nicolet iS50 FT-IR Thermo Scientific FT-IR spectrometer, detector DTGS KBr, aperture 200, resolution 4 cm⁻¹, PIKE DRIFTS attachment; (3) Raman spectroscopy using a confocal Renishaw InVia Qontor Raman-microspectrometer with an excitation solid-state laser 532 nm, nominal power 100 mW and diffraction grating 1800 lines/mm; (4) UV-Vis-NIR absorption spectroscopy by a PerkinElmer Lambda 1050WB spectrometer in the range of 270–1200 nm, a spectral resolution of 0.5 nm, a scanning speed of 56.7 nm/min; (5) micro-X-ray fluorescence analysis using a Bruker TORNADO M4 micro-XRF spectrometer with an X-ray tube power 20 W and a vacuum mode of 20 mbar, an X-ray beam diameter of 50 µm; (6) luminescence imaging in short-wave radiation 225 nm, recorded using a Diamond View device. Instrumental studies were carried out at the Gemstone Research Laboratory of Gokhran of Russia.

Results. (1) For the first time, spectrometric data of blue corundum from the Stazh-2 deposit were obtained by IR-, Raman, and UV-Vis-NIR spectroscopy methods, as well as micro-XRF. (2) In blue corundum, a local (focal) content of chromium, an element alien to granites, was established. Here, metasomatites with corundum were formed. Areas with chromium exhibit sharp rectilinear boundaries. (3) Zircon, diaspore, boehmite, muscovite, calcite, as well as gas-liquid inclusions with CO₂, were determined in the composition of blue corundum. (4) Two color generations due to newly formed fractures and minerals were identified. (5) The inclusions of diaspore, boehmite, muscovite, and calcite are the result of the hydration and carbonation reactions that occurred between corundum and anorthite at later development stages. (6) The blue corundum samples contained Ti and Fe with a predominance of Ti over Fe, which is a distinctive feature of the Stazh-2 deposit from other deposits of blue corundum and sapphires.

Conclusion. The obtained materials can be used by Gokhran of Russia for identifying sapphires of the contact-reaction (bimetasomatic) genesis, which include Kashmir sapphires of the highest quality, as well as for educational purposes.

Keywords: South-West Pamir, deposit, Stazh-2, blue corundum, IR spectroscopy, Raman spectroscopy, XRF, zonal coloring, gas-liquid inclusions, diaspore, boehmite, titanium, iron, chromium, vanadium, gallium

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

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

For citation: Litvinenko A.K., Vandanova D.B., Shilova O.A., Pakhomova S.B. Optical properties, inclusions, and chemical composition of blue corundum from the Stazh-2 deposit, South-Western Pamir. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):112–123. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-112-123>

Manuscript received 28 February 2024

Accepted 25 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Геологическое положение месторождения Стаж-2

Месторождение с разной степенью интенсивности изучалось в 60–80-х годах прошлого столетия [2]. В непосредственной близости с ним известны его участки Стаж-1 и Стаж-3. Месторождение расположено в верхней части горанской серии (AR₂), претерпевшей три цикла регионального метаморфизма от гранулитовой до зеленосланцевых фаций. Объект исследования представляет линзовидное тело магнетитовых мраморов 100×20 м,

рассеченных 6 жилами корундовых плагиоклазитов с синим корундом и двумя согласными жилами с розовым корундом, залегающими со стороны гнейсов.

Генезис синего корунда является результатом диффузионного биметасоматического процесса, протекавшего в контактах гранитных жил с магнетитами [3]. Жилы имеют концентрически зональное строение. Вокруг них сформированы разнообразные минеральные агрегаты,

образованные одним-двумя минералами, позволившие составить метасоматическую колонку из 9 зон [2]. Центральная зона представлена корунд-плагиоклазовой. Рассматриваемое месторождение отнесено к магнезиально-скарновой формации [1]. Генезис месторождения определен как контактово-реакционный, биметасоматический. При его образовании происходило движение химических элементов как в самих жилах, так и по их карбонатной (магнезитовой) периферии.

Синий корунд чаще всего наблюдается в форме гексагональной дипирамиды, осложненной пинакоидом. Реже встречаются бочонковидные и еще реже — призматические кристаллы с гексагональным сечением. Грани часто зеркальные и ровные, иногда со следами растворения. Для них характерна штриховка в двух направлениях, пересекающихся под углом близким к 90° . Максимальная длина кристаллов составляет 7 см, в поперечнике до 2,5 см.

По геологической позиции и условиям образования Стаж-2 имеет много общего с месторождением сапфира Сумджем (Кашмир). Одно из первых описаний этого месторождения и его сапфиров приведено в [7].

Идентификация корунда

Исследования проводились на 6 кристаллах синего корунда. Из четырех перпендикулярно удлинению были изготовлены отполированные пластины толщиной 1—1,5 мм и площадью около 1 см^2 и две вставки: кабошон и фасетная (рис. 1).

Все исследованные образцы идентифицированы с помощью ИК- и КР-спектроскопии. Со всех образцов были сняты ИК-спектры, которые имели одинаковую картину. Характерный ИК-спектр приведен на рисунке 2А. В диапазоне $400\text{—}1200\text{ см}^{-1}$ полученные ИК-спектры отражают колебания связей кристаллической структуры корунда [6] и аналогичны спектрам корундов других месторождений. Диапазон $1200\text{—}4500\text{ см}^{-1}$

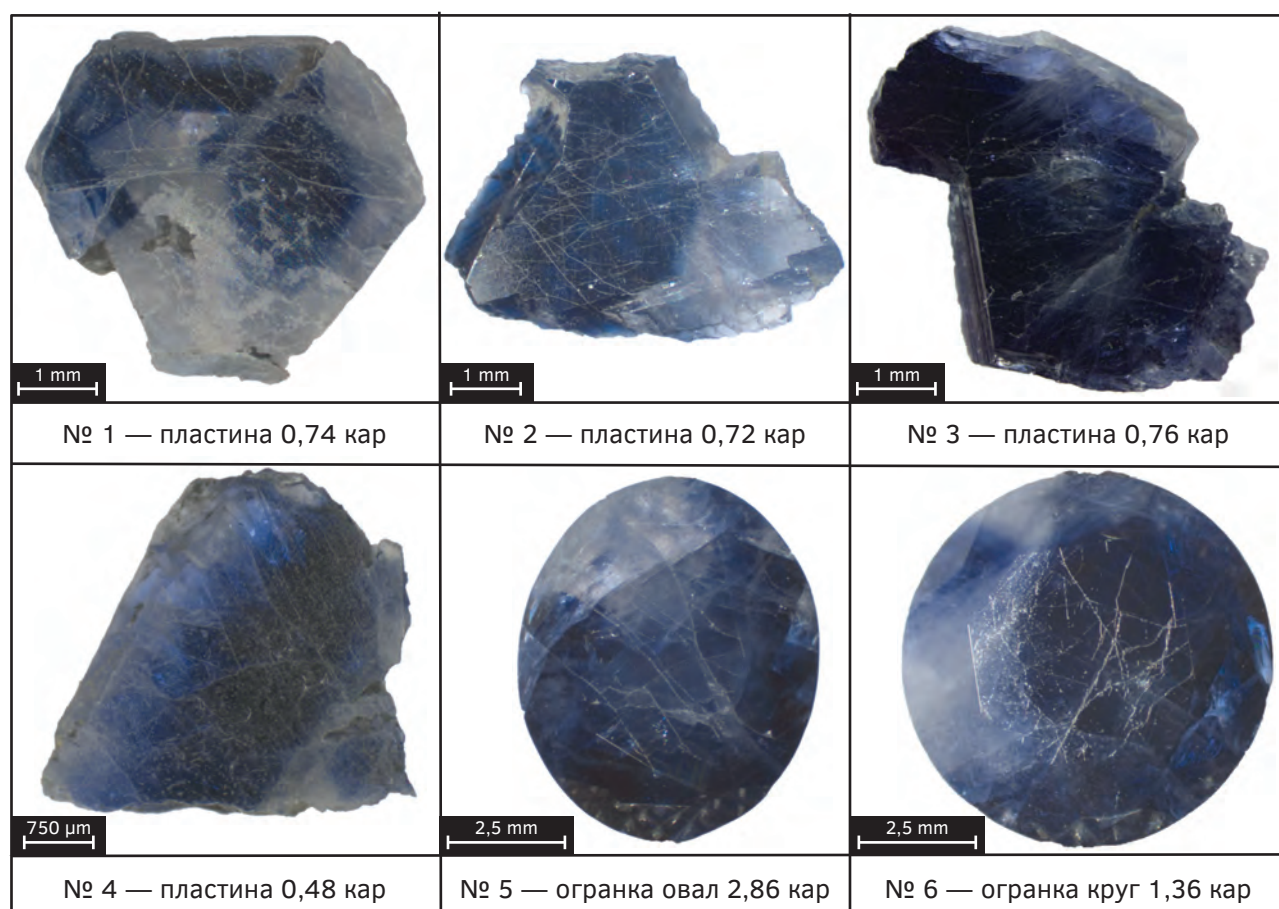


Рис. 1. Исследуемые синие корунды: пластины и вставки

Fig. 1. Investigated blue corundums: plates and inserts

в ИК-спектре (рис. 2А) относится к газовой-жидким и минеральным включениям в корундах [8].

КР-спектры всех пластин дали одинаковую картину. Один из спектров приведен на рисунке 2Б. Центром спектрального диапазона выбрана точка 1010 см^{-1} для выявления основных фоновых мод. Привязка КР-спектров исследуемых образцов к КР-спектру эталонного корунда осуществлялась путем сравнения пиков 381, 418, 578, 646, 709, 751 см^{-1} в минералогической базе [10].

Оптические особенности корунда

Нами были произведены замеры показателей преломления синих и бесцветных корундов. При этом оказалось, что показатели преломления синих и бесцветных разновидностей имеют одинаковые значения: $n_g = 1,770$, $n_p = 1,762 \pm 0,002$. Рассчитанное двупреломление составило 0,008. На этом основании можно сделать вывод, что окраска синих корундов Стаж-2 не влияет на показатель преломления, или, возможно, это не улавливается геммологическим рефрактометром с погрешностью измерения равной $\pm 0,002$.

Корунд неравномерно, часто зонально, окрашен в синий цвет различных оттенков с чередующимися бесцветными зонами (рис. 1). Зональность иногда нарушается синими пятнами, пирамидками и одиночными полосами с заливообразными краями. Окрашенные участки распределяются параллельно граням (рис. 3А) и/или полисинтетическим двойникам (рис. 3Б). Полисинтетические двойники иногда наблюдаются при одном никеле благодаря параллельно-полосчатой окраске (рис. 3Б). Можно отметить, что интенсивная цветовая зональность

проявлена параллельно граням, двойникам, а также в форме пятен с хаотичным или неправильным геометрическим рисунком. Иногда наблюдается усиление окраски вдоль швов отдельности и трещин (рис. 3А). Это может свидетельствовать о возникновении наложенных, более поздних центров окраски и представляет ее разные генерации — генерации окраски: первичные и более поздние.

В отдельных пластинах корунда отчетливо прослеживается некая динамика окраски, проявляющаяся в постепенном ее изменении от индигово-синего к темно-синему, синему, бледно-синему голубому и бесцветному. Это можно трактовать как цветовой профиль, природа которого, вероятно, связана с геохимической неоднородностью минерала (рис. 4А), рассмотренной ниже. В бесцветной зоне выделяемых цветовых профилей наблюдаются многочисленные минеральные и газовой-жидкие включения.

Методом спектроскопии УФ-Вид-БЛИК получен спектр поглощения наиболее сильно и однородно окрашенной пластины № 3 (рис. 5). Широкий максимум $683,5\text{ нм}$ является результатом наложения цветообразующей полосы поглощения $\text{Fe}^{2+}/\text{Ti}^{4+}$ (580 нм) и полосы люминесценции хрома Cr^{3+} (693 нм). Также проявлены полосы поглощения Fe^{3+} ($387,2\text{ нм}$) и Cr^{3+} ($412,2\text{ нм}$) в виде плеч с низкой интенсивностью относительно максимума $683,5\text{ нм}$.

Визуально локальное (очаговое) размещение хрома в составе кристаллов синих корундов подтверждено зонами красной люминесценции в коротких волнах, установленными на приборе Diamond View. Локальные участки красного

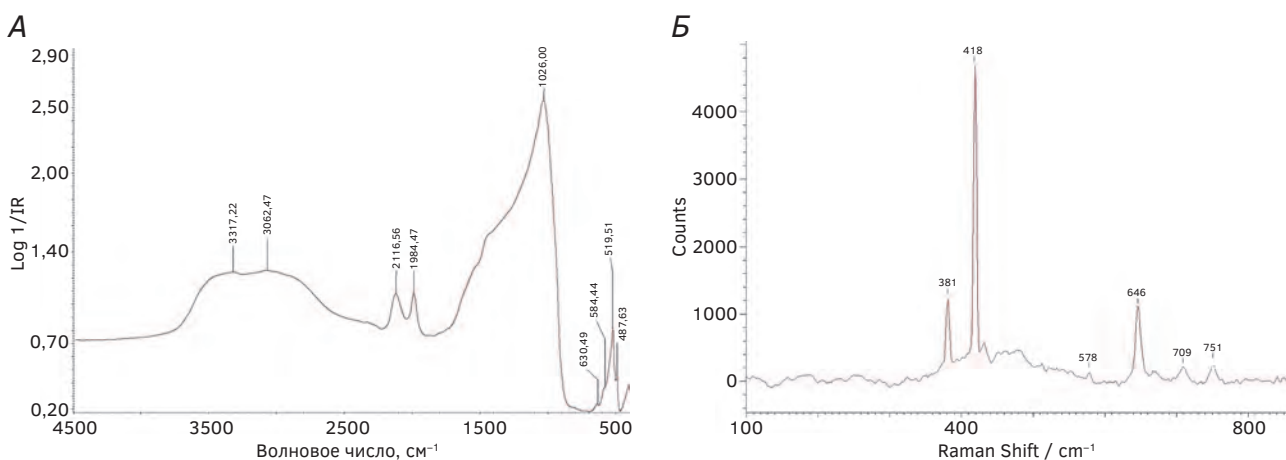


Рис. 2. ИК- и КР-спектры синего корунда: А — фрагмент ИК-спектра, пластина № 2; Б — фрагмент КР-спектра, пластина № 4

Fig 2. IR and Raman spectra of blue corundum: А — fragment of IR spectrum, plate №.2; Б — fragment of Raman spectrum, plate №.4

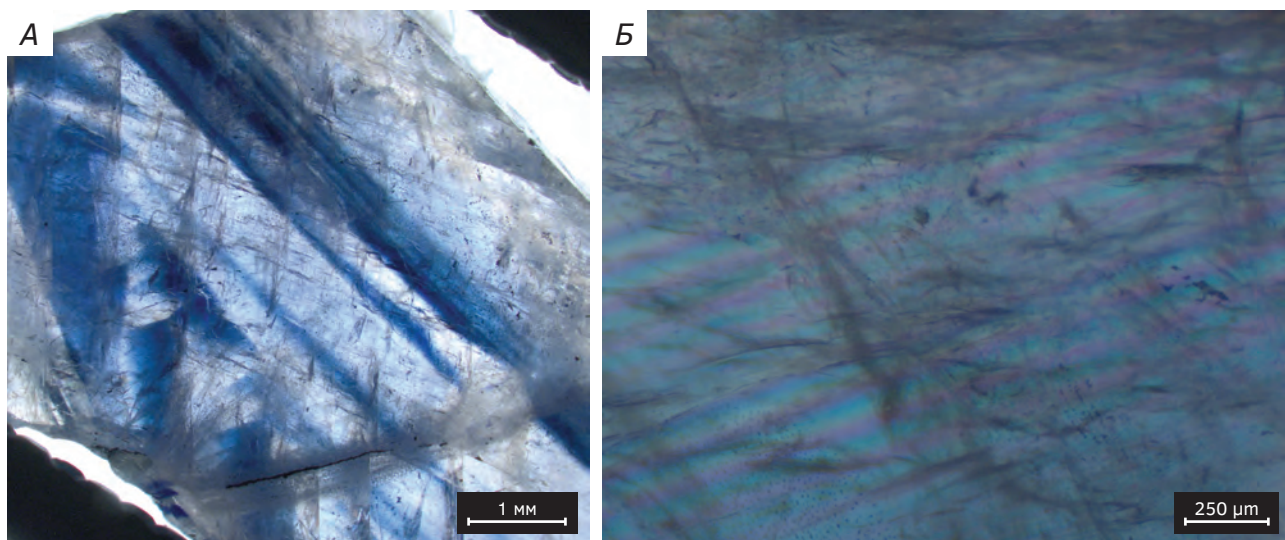


Рис. 3. Зональное распределение окраски в корунде: А — по зонам роста, линиям отдельности и секущим трещинам; Б — по полисинтетическим двойникам

Fig 3. Zonal distribution of colouration in corundum: А — by growth zones, lines of separateness and secant cracks; В — by polysynthetic twins

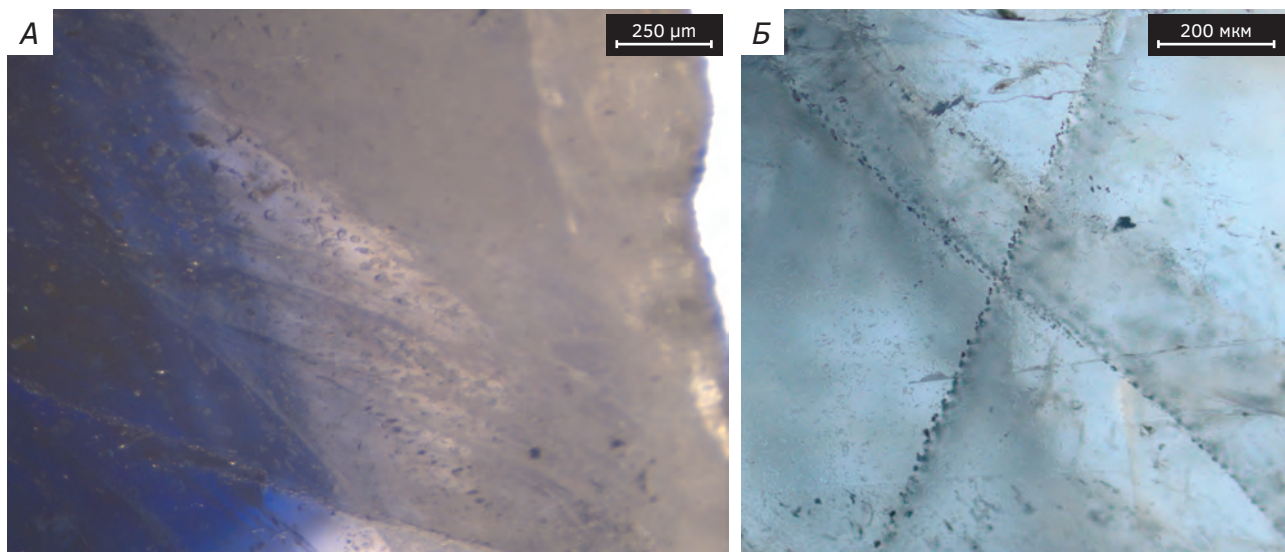


Рис. 4. Внутренние неоднородности в корундах. А — цветовой профиль в кристалле с многочисленными газовой-жидкими включениями; Б — две пересекающиеся «залеченные» трещины, выполненные включениями диаспора

Fig 4. А — colour profile in a crystal with numerous gas-liquid inclusions; Б — two intersecting «healed» cracks made by diaspore inclusions

цвета имеют резкие, контрастные границы на синем фоне, где также фиксируется ростовая зональность, выраженная резкой сменой синих и бесцветных полос (рис. 6).

Твердые включения в корунде

В синих корундах рассматриваемого месторождения твердые включения встречаются относительно

но редко. Чаще всего наблюдался рутил неправильной, округлой формы размером до 2 мм в поперечнике. Конфокальной КР-спектроскопией были установлены труднодиагностируемые в стереомикроскопе, очень мелкие кристаллы циркона (рис. 7). Эти 4 кристалла циркона с четкими кристаллографическими формами, но очень мелких размеров до 30 мкм, мы рассматриваем как эти

4 кристалла. Кристаллы образовались до возникновения корунда в жилах апогранитов, которые являлись субстратом для образования зональных плагиоклазитов с корундом.

Более широко развиты поздние включения, сформировавшиеся по корунду. Например, по пересекающимся линиям трещин, часто «залеченным» и невидимым, наблюдаются многочисленные мелкие минеральные включения, формируя жилы длиной до 2 мм, мощностью до 0,4 мм (рис. 4Б). Жилки выполнены диаспором короткостолбчатой и ромбической формы размером около 16 мкм (рис. 8).

Диаспор $\text{AlO}(\text{OH})$ идентифицирован методом конфокальной КР-спектроскопии. При исследовании было установлено образование осветленных линий в корунде. Осветленные участки возникают вокруг зерен диаспора и всегда его сопровождают (рис. 8). Зерна диаспора, очевидно, образовались в результате локальной гидратации

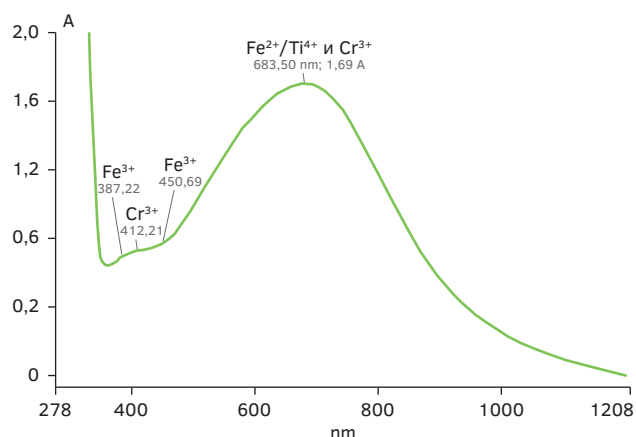


Рис. 5. Спектр оптического поглощения с пластины № 3

Fig. 5. Optical absorption spectrum from plate No.3

корунда, проявившейся по трещинам, где произошло падение давления, способствовавшее

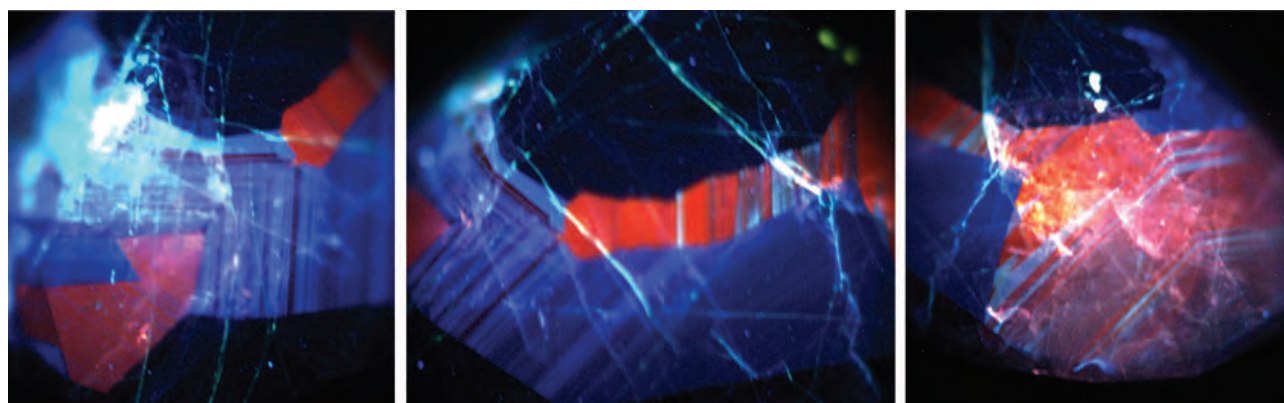


Рис. 6. Фрагментарная КВ-люминесценция ограненной вставки овал № 5 с красными «очаговыми» зонами, содержащими хром, на фоне ростовой зональности синего кристалла

Fig. 6. Fragmentary DiamondView images of luminescence of faceted insert oval No. 5 with red "focal zones containing chromium against the background of growth zonality of the blue crystal

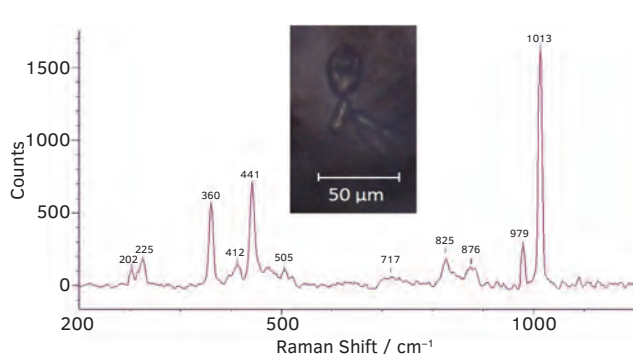


Рис. 7. КР-спектр циркона с фотографией группы его кристаллов

Fig. 7. Raman spectrum of zircon with a photograph of a group of its crystals

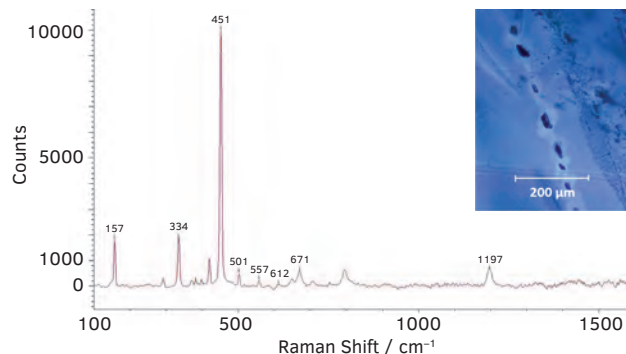


Рис. 8. КР-спектр диаспора. На вкладке представлена его линейная группа, окруженная зонами осветления

Fig. 8. Raman spectrum of the diaspore. In the tab its linear band surrounded by brightening zones

следующей реакции: $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{AlO}(\text{OH})$. Результатом реакции является также изменение цвета в корунде от синего к голубому (рис. 8).

При исследовании пластин № 1—4 в ИК-спектрах в области 1970—3600 см^{-1} при сопоставлении их с данными [8] были идентифицированы следы бемита $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ (рис. 9). Визуально под увеличением включения бемита не фиксировались.

Выявленные КР-спектроскопией (рис. 10) поверхностные включения зерен кальцита и чешуек мусковита в трещине корунда являются одними из самых поздних минералов. Их образование обусловлено низкотемпературным метасоматическим замещением корунда, более сложным, чем простая гидратация.

Газово-жидкие включения в корунде

Под микроскопом в пластинах корунда наблюдаются обильные газово-жидкие включения разнообразной формы (рис. 4А). При увеличении $\times 100$ наблюдались группы включений в форме

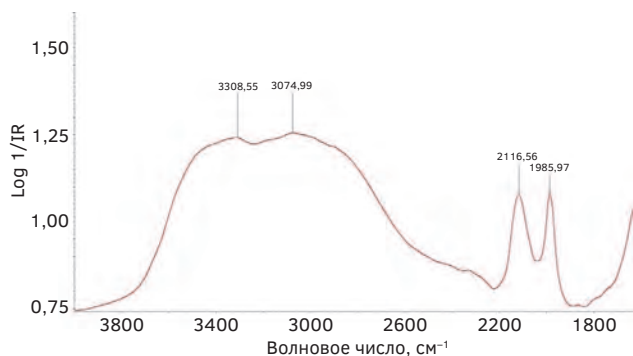


Рис. 9. ИК-спектр бемита

Fig. 9. IR spectrum of boehmite

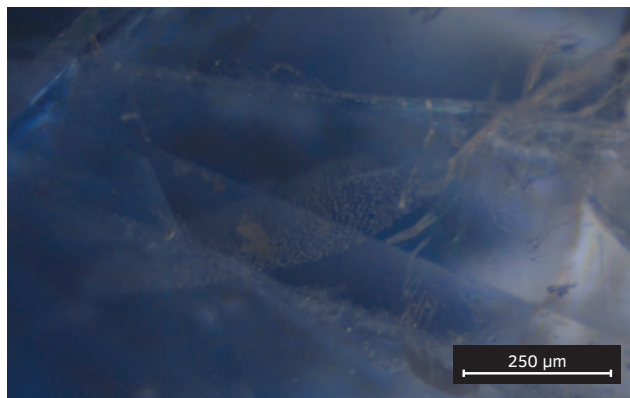


Рис. 11. Сгущения мелких газово-жидких включений в форме «отпечатка пальца»

Fig. 11. Clusters of small gas-liquid inclusions in the form of a "fingerprint"

«отпечатков пальца» — линзовидные вытянутые газово-жидкие вуали с ровными, четкими краями (рис. 11).

Двухфазные газово-жидкие включения занимают призматические полости со скошенными краями, которые можно рассматривать как отрицательные кристаллы до 50 мкм длиной, заполненные жидкостью и газовым пузырьком CO_2 (рис. 12). Помимо КР-пику 1265, 1284, 1390, 1411 см^{-1} , соответствующих углекислому газу, присутствуют спектральные значения матрицы корунда.

Некоторые особенности химического состава корунда

В составе синего корунда обнаружены незначительные содержания химических элементов Fe, Ti, V и Ga, из которых Fe и Ti являются хромофорами, V и Ga — важными геохимическими реперами.

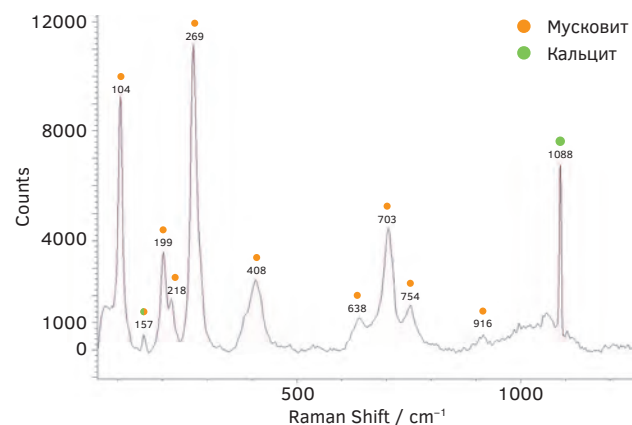


Рис. 10. Общий КР-спектр мусковита и кальцита в области 100—1200 см^{-1}

Fig. 10. Overall Raman spectrum of muscovite and calcite in the region 100—1200 см^{-1}

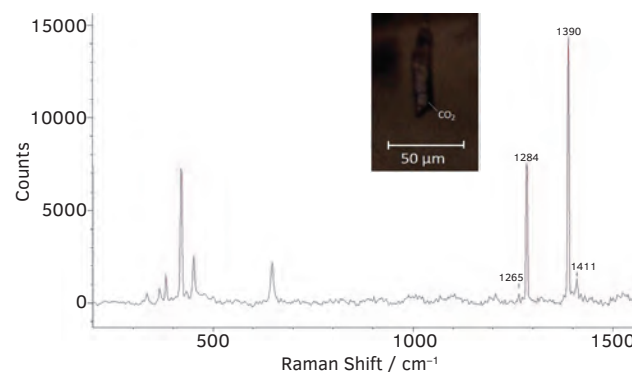


Рис. 12. КР-спектр газовой фазы CO_2 в отрицательном кристалле

Fig. 12. Raman spectrum of gas phase CO_2 in the negative crystal

Исследование химического состава пластин и вставок корунда по разным зонам и профилям показало незначительные его изменения. Наиболее значимы содержания Ti — до 0,14, Fe — до 0,05, Ga — до 0,02 и V — до 0,002 мас.% (табл. 1).

Анализ содержаний рассматриваемых элементов демонстрирует существенное преобладание титана над железом. Отношение Ti/Fe составляет от 2 до 3. Это отношение для других месторождений мира характеризуется обратной зависимостью, с существенным преобладанием железа [8]. Возможно, отмеченная особенность является отличительным признаком синих корундов месторождения Стаж-2.

Также нами наблюдались необычные флуктуации содержаний рассматриваемых элементов от бесцветных к синим зонам (табл. 2). Было установлено, что бесцветные зоны корунда также содержат элементы-хромофоры титан и железо, как и окрашенные, но титана в бесцветных зонах несколько меньше (табл. 2). Содержание ванадия оказалось выше в бесцветных зонах, нежели в синих, что может свидетельствовать, что он не участвует в окраске синих корундов. Галлий равномерно распределен по всем зонам исследуемых пластин, а иногда отсутствует.

Обсуждение

Прозрачные, хорошо развитые призматические кристаллы циркона (рис. 7) мы рассматриваем как протогенетические. Они образовались еще в магматическую стадию в гранитах. При их десиликации и кристаллизации корунда цирконы были «захвачены» им.

Многочисленные цепочки бесцветных кристаллических включений короткостолбчатой и ромбической форм идентифицированы как диаспор

Таблица 1. Химический состав синего корунда по пяти образцам, в мас. %

Table 1. Chemical composition of blue corundum from five samples, in wt. %

№ образца	Ti	V	Fe	Ga
1	0,10	0,002	0,05	0,01
3	0,14	0,002	0,05	0,01
4	0,09	0,002	0,05	0,01
5	0,11	0,001	0,04	0,01
6	0,08	0,001	0,04	0,02
Среднее значение	0,10	0,002	0,05	0,01

Примечание: приведены средние значения по 8 определениям.

AlO(OH). Мы считаем, что зерна диаспора и мельчайшие частицы бемита возникли в корунде по трещинам на регрессивной стадии последнего кайнозойского цикла регионального метаморфизма благодаря реакции гидратации.

В вакуолях, в форме отрицательных кристаллов, установлена углекислота и, вероятно, вода.

Кальцит и мусковит являются включениями, расположенными на стенках трещин, которые, мы считаем, являются более поздними, чем корунд. Кальцит мог образоваться за счет кальция, возникшего при альбитизации анортита. При этом освободившийся оксид кальция мог вступать в реакцию с углекислотой, реликты которой мы наблюдаем в газовой-жидких включениях корунда по реакции: $\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$ (кальцит). Мусковит также возник при замещении плагиоклазов и корундов щелочными растворами, содержащими калий.

Общеизвестно, что синяя окраска корунда обусловлена ионами железа и титана. В исследуемых образцах их среднее содержание составляет, соответственно, 0,05% и 0,10 мас.% (табл. 1). Содержание этих элементов в корунде значительно ниже кларковых: железа в 77 раз, титана — почти в 2 раза. Дополнительно к этим изоморфным элементам в корунде установлены галлий и ванадий, соответственно, 0,01% и 0,002 мас.%. Содержание галлия в 10 раз выше кларкового,

Таблица 2. Химический состав бесцветных и синих зон корунда в пластине № 1, в мас. %

Table 2. Chemical composition of colourless and blue corundum zones in plate No.1, in wt. %

№ зоны	Ti	V	Fe	Ga
1 — б/ц	0,09	0,002	0,04	0,01
2 — б/ц	0,03	0,005	0,06	—
3 — б/ц	0,07	0,004	0,04	0,01
4 — б/ц	0,08	0,002	0,10	0,01
Среднее	0,07	0,003	0,06	0,01
5 — синяя	0,13	0,001	0,05	0,01
6 — синяя	0,13	0,001	0,05	0,01
7 — синяя	0,09	0,003	0,05	—
8 — синяя	0,13	0,001	0,05	0,01
9 — синяя	0,12	0,001	0,12	—
Среднее	0,12	0,001	0,06	0,01

Примечание: б/ц — бесцветная; «—» — ниже предела определения. В каждой зоне было произведено 5 измерений. Химические анализы выполнены главным экспертом лаборатории исследования драгоценных камней Гохрана России И.В. Бузиным.

а ванадия — наоборот, в три раза ниже. Для изверженных пород характерен V^{3+} , который может изоморфно замещать Fe и Ti в их минералах [5]. В нашем случае мы наблюдаем сильно рассеянный элемент ванадий.

Красная КВ-люминесценция связана с хромом, фиксируемым в УФ-Вид-БЛИК-спектре. Это подтверждается данными рентгеноспектрально-локального микроанализа [4], в котором были установлены колебания Cr_2O_3 в синем корунде от 0 до 0,18 мас.%. Появление хрома в апогранитных синих корундах является неожиданным фактом.

В существующей классификации месторождений сапфиров [8, 9] наш объект исследования не находит места. Поэтому наряду с выделенными метаморфическим и магматическим генетическими типами мы предлагаем дополнить классификацию контактово-реакционным (биметасоматическим), к которому мы также относим кашмирские сапфиры.

Заключение

1. Были получены первые спектрометрические данные синих корундов с месторождения Стаж-2 методами ИК-, КР- и УФ-Вид-БЛИК-спектроскопии, а также микро-РФА.

2. В синем корунде было установлено локальное (очаговое) содержание хрома — элемента чужеродного для гранитов, по которым образовались исследуемые метасоматиты с корундом. Участки с хромом имеют резкие прямолинейные границы.

3. В составе синего корунда были определены циркон, диаспор, бемит, мусковит, кальцит и газо-жидкие включения с CO_2 .

4. Неравномерность окраски корунда от темно-синей до бесцветной обусловлена бедностью минералообразующих растворов этими элементами. Выявленные нами две генерации окрасок корунда обусловлены энергией, вызванной возникновением трещин и реакциями образования новых, низкотемпературных минералов (диаспора и бемита).

5. Установленные в составе корунда включения диаспора, бемита, мусковита и кальцита являются результатом реакции гидратации и карбонатизации между корундом и анортитом с привнесением калия и натрия на позднем этапе развития минеральных ассоциаций.

6. В химическом составе исследуемых кристаллов синего корунда было установлено преобладание титана над железом в 2—3 раза, что является отличительной особенностью месторождения Стаж-2 от многих других месторождений синих корундов и сапфиров.

7. Предложено расширить классификацию месторождений сапфиров [8, 9] контактово-реакционным (биметасоматическим) типом.

8. Полученные материалы могут быть использованы: 1 — Гохраном России для идентификации сапфиров контактово-реакционного генезиса, с которым связано образование самых высококачественных кашмирских сапфиров; 2 — в учебном процессе кафедры минералогии и геммологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселёв В.И., Буданов В.И. Месторождения докембрийской магнезиально-скарновой формации Юго-Западного Памира. Душанбе: Дониш, 1986. 223 с.
2. Литвиненко А.К. Минерагенция сапфира- и рубиноносных метасоматитов Юго-Западного Памира. Липецк: ЛГПУ, 2006. 128 с.
3. Литвиненко Д.А., Литвиненко А.К. О биметасоматическом сапфире с месторождения Стаж-2, Юго-Западный Памир // Минерально-сырьевая база алмазов, благородных и цветных металлов — от прогноза к добыче. М.: ЦНИГРИ, 2021. С. 88—91.
4. Литвиненко Д.А., Литвиненко А.К. Особенности химического состава сапфира с месторождения Стаж 2, Юго-Западный Памир // X Международная конференция молодых ученых «Молодые — Научкам о Земле»: тезисы докладов. 2022. Т. II. С. 157—161.
5. Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.
6. Плюснина И.И. Инфракрасные спектры минералов. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1977. 175 с.
7. Atkinson D., Kotthavala R.Z. Kashmir sapphire // Gem & Gemmology (summer). 1983. V. 19. No. 2. P.64—76.
8. Hughes R.W., Manorotkul W., Huges E.B. Ruby and Sapphire: A Gemologist's Guide. LOTUS new direction in Gemology. Bangkok, Thailand, 2017. 816 p.
9. Palke A.C., Saeseaw S., Renfro N.D., Sun Z., McClure F. Geographic Origin Determination of Blue Sapphire // Gem & Gemmology, Winter 2019, Vol. 55, no. 4. P. 536—579.
10. Database of Raman spectroscopy [Electronic resource]. URL: <https://rruff.info/> (дата обращения: 29.06.2023).

REFERENCES

1. Kiselev V.I., Budanov V.I. Deposits of Precambrian igneous-scarne formation of the South-West Pamir. Dushanbe: Donish, 1986. 223 p. (In Russian).
2. Litvinenko A.K. Mineralogeny of sapphire- and ruby-bearing metasomatites of the South-West Pamir. Lipetsk: LSPU, 2006. 128 p. (In Russian).
3. Litvinenko D.A., Litvinenko A.K. About bimetasomatic sapphire from the deposit Stazh-2, South-West Pamir // Mineral raw material base of diamonds, noble and non-ferrous metals — from forecast to production. Moscow: CNIGRI, 2021. P. 88—91 (In Russian).
4. Litvinenko D.A., Litvinenko A.K. Peculiarities of the chemical composition of sapphire from the deposit Stazh 2, South-West Pamir // X International Conference of Young Scientists "Young Earth Scientists". Theses of reports. 2022. Vol. II. P. 157—161 (In Russian).
5. Perelman A.I. Geochemistry. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989. 528 p. (In Russian).
6. Plusnina I.I. Infrared spectra of minerals. Moscow: Moscow university publ., 1977. 175 p. (In Russian).
7. Atkinson D., Kotthavala R.Z. Kashmir sapphire // Gem & Gemmology (summer). 1983. Vol. 19. No. 2. P. 64—76.
8. Hughes R.W., Manorotkul W., Huges E.B. Ruby and Sapphire: A Gemologist's Guide. LOTUS new direction in Gemology. Bangkok, Thailand, 2017. 816 p.
9. Palke A.C., Saeseaw S., Renfro N.D., Sun Z., McClure F. Geographic Origin Determination of Blue Sapphire // Gem & Gemology, Winter. 2019. Vol. 55, no. 4. P. 536—579.
10. Database of Raman spectroscopy [Electronic resource]. URL: <https://rruff.info/> (date of reference: 29.06.2023).

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.

Ванданова Д.Б. — получила и проанализировала данные КР-спектроскопии, исследовала и описала минеральные включения, подготовила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Шилова О.А. — получила и проанализировала данные ИК-спектроскопии, исследовала образцы под стереомикроскопом, составила геммологическое описание, подготовила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Пахомова С.Б. — получила и проанализировала данные УФ-Вид-БЛИК-спектроскопии, ИК-спектроскопии, проанализировала данные микроРФА, подготовила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Andrei K. Litvinenko — developed the concept and 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.

Darima B. Vandanova — obtained and analysed the Raman spectroscopy data, investigated and described the mineral inclusions, prepared the published version of the paper and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Oksana A. Shilova — received and analysed the IR spectroscopy data, examined the samples under stereomicroscope, prepared the gemological description, prepared the published version of the article and agreed to take responsibility for all aspects of the work.

Svetlana B. Pakhomova — received and analysed UV-Vis-NiR spectroscopy, IR spectroscopy data, analysed microXRF data, prepared the published version of the article and agreed 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 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 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1779-5391>

Andrei K. Litvinenko — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Professor of the Department of Mineralogy 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>

Ванданова Дарима Баировна — ведущий эксперт лаборатории исследования драгоценных камней научно-исследовательского отдела Научно-технического управления Гохрана России.

14, 1812 года ул., г. Москва 121170, Россия

e-mail: vandanovad@gmail.com

тел.: +7 (999) 679-62-34

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2017-3606>

Шилова Оксана Андреевна — главный эксперт лаборатории исследования драгоценных камней научно-исследовательского отдела Научно-технического управления Гохрана России.

14, 1812 года ул., г. Москва 121170, Россия

e-mail: oshilova@gokhran.ru

тел.: +7 (903) 233-00-50

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7343-2870>

Пахомова Светлана Борисовна* — главный эксперт лаборатории исследования драгоценных камней научно-исследовательского отдела Научно-технического управления Гохрана России.

14, 1812 года ул., г. Москва 121170, Россия

e-mail: spahomova@gokhran.ru

тел.: +7 (910) 407-65-97

ORCID: <https://orsid.org/0009-0001-5008-5220>

Darima B. Vandanova — Leading Expert of the Gemstone Research Laboratory of the Research Department of the Scientific and Technical Department of Gokhran of Russia.

14, 1812 Goda str., Moscow 121170, Russia

e-mail: vandanovad@gmail.com

tel.: +7 (999) 679-62-34

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2017-3606>

Oksana A. Shilova — Chief Expert of the Gemstone Research Laboratory of the Research Department of the Scientific and Technical Department of Gokhran of Russia.

14, 1812 Goda str., Moscow 121170, Russia

e-mail: oshilova@gokhran.ru

tel.: +7 (903) 233-00-50

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7343-2870>

Svetlana B. Pakhomova* — Chief Expert of Gemstone Research Laboratory of the Research Department of the Scientific and Technical Department of Gokhran of Russia.

14, 1812 Goda str., Moscow 121170, Russia

e-mail: spahomova@gokhran.ru

tel.: +7 (910) 407-65-97

ORCID: <https://orsid.org/0009-0001-5008-5220>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА И НАГРУЗКИ, СВЯЗАННЫЕ С АНТРОПОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА СРЕДУ

Э.М. АЛИЕВ¹, В.Ю. КЕРИМОВ^{1,2,*}, Ю.А. ЛОБАНОВ²

¹ Институт нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской Республики
9, ул. Ф. Амирова, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Современное состояние и нагрузки на окружающую среду Каспийского региона связаны с антропогенным воздействием. Каспийское море, окруженное пятью прибрежными странами — Республикой Азербайджан, Российской Федерацией, Республикой Казахстан, Туркменистаном и Исламской Республикой Иран — является самым большим бессточным водоемом на земле. Изолированность Каспийского моря, которое отличается особыми климатическими условиями и градиентами солености, привела к образованию уникальной экосистемы.

Цель исследования. Оценка состояния окружающей среды Каспийского региона и нагрузок, связанных с антропогенным воздействием на среду.

Материалы и методы. В качестве методики оценки антропогенных процессов, влияющих на окружающую среду Каспийского моря и прилегающей территории, была использована концепция DPSIR: «движущие силы — нагрузки — состояние — воздействия — реакция», которая определяет связи между деятельностью человека и состоянием и тенденциями окружающей среды. Разработанный Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) процесс комплексного анализа окружающей среды (в особенности Глобальной экологической перспективы) основан на этой методике.

Результаты. Проведенные исследования позволили определить масштабы и географию дегазации парниковых газов, объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по компонентам, структуру выбросов парниковых газов и динамику выбросов диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и оксида азота (N_2O), генерируемых из стационарных источников на территории Каспийского региона. По результатам деятельности антропогенные выбросы парниковых газов, загрязняющих атмосферу и морскую акваторию, генерируемых из стационарных источников, образуются в результате производственной деятельности ряда отраслей: добыча полезных ископаемых, обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха, обрабатывающие производства, водоснабжение, очистка сточных вод, строительная индустрия, сельское и лесное хозяйство, транспорт хранение и связь, ремонт автотранспортных средств и мотоциклов, а также других видов деятельности.

Заключение. Доля предприятий топливно-энергетического комплекса, выбрасывающих парниковые газы, которые загрязняют атмосферу, составляет около 60%. Показана структура выбросов парниковых газов и динамика выбросов диоксида углерода (CO_2), метана (CH_4) и оксида азота (N_2O), генерируемых из стационарных источников на территории Каспийского региона. Каспийское море является одним из важнейших бессточных бассейнов в мире, и, поскольку оно окружено со всех сторон сушей, в нем отсутствует проточность, помогающая самоочищению. Загрязнители, попадающие в воду, остаются в ней за отсутствием механизмов их удаления. Чрезвычайно важно иметь полную информацию об уровне поступления загрязнителей, что позволит выбирать наилучшие из известных и наиболее эффективные средства экологической компенсации или уменьшения загрязнения. Крупнейшими загрязняющими отраслями являются сельское хозяйство, промышленность, включая нефтегазовую, и урбанизация.

Ключевые слова: экология, окружающая среда, Каспийский регион, экосистема, нефтегазовые месторождения, антропогенная деятельность, транспорт, экономика, дегазация

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Алиев Э.М., Керимов В.Ю., Лобанов Ю.А. Оценка состояния окружающей среды Каспийского региона и нагрузки, связанные с антропогенным воздействием на среду. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):124—140. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-124-140>

Статья поступила в редакцию 20.05.2024

Принята к публикации 27.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT IN THE CASPIAN REGION

EMIN M. ALIYEV¹, VAGIF YU. KERIMOV^{1,2,*}, YURY A. LOBANOV²

¹ *Institute of Oil and Gas of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan
9, F. Amirov str., Baku, AZ1000, Azerbaijan*

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

ABSTRACT

Background. The current state and pressures associated with the anthropogenic impact on the Caspian region environment are examined. Surrounded by five coastal countries, including the Republic of Azerbaijan, the Russian Federation, the Republic of Kazakhstan, Turkmenistan, and the Islamic Republic of Iran, the Caspian Sea is the world's largest endorheic water body. The isolation of the Caspian Sea, which is characterized by special climatic conditions and salinity gradients, has led to the formation of a unique ecosystem.

Aim. Environmental impact assessment of the Caspian region and the associated anthropogenic load.

Materials and methods. The anthropogenic processes affecting the environment of the Caspian Sea and the surrounding area were assessed using the DPSIR concept. This concept includes the components of driving forces, pressures, state, impacts, and response in order to inclusively determine the connections between human activities and the environment. This concept was used as by the European Environmental Agency as the basis for integrated environmental analysis.

Results. The conducted study determined the scale and geography of greenhouse gas degassing, the volume of pollutant emissions into the atmosphere by components, the structure of greenhouse gas emissions, and the dynamics of emissions of carbon dioxide, methane, and nitrogen oxide generated from stationary sources in the Caspian region. Anthropogenic emissions of greenhouse gases that pollute the atmosphere and sea waters, generated from stationary sources, are formed as a result of the production activities of a number of industries: mining; electricity, gas, and steam generation; air conditioning; manufacturing; water supply; wastewater treatment; construction industry; agriculture and forestry; transport storage and communications; repair of vehicles and motorcycles; as well as other activities.

Conclusion. The share of enterprises in the fuel and energy complex that emit greenhouse gases is about 60%. The structure of greenhouse gas emissions and the dynamics of CO₂, CH₄, and N₂O emissions generated from stationary sources in the Caspian region are shown. The Caspian Sea is one of the most important endorheic basins in the world. Being surrounded by land on all sides, the Caspian Sea lacks flows that would maintain its self-purification. Pollutants that enter the Sea remain there due to the lack of mechanisms for their removal. Complete information about the level

of pollutant inputs is crucial for selecting the most effective means of environmental compensation or pollution reduction. The largest polluting sectors are agriculture, industry, including oil and gas, and urbanization.

Keywords: ecology, environment, Caspian region, ecosystem, oil and gas fields, anthropogenic activities, transport, economics, degassing

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

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

For citation: Aliyev E.M., Kerimov V.Yu., Lobanov Yu.A. Environmental impact assessment in the Caspian region. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):124—140. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-124-140>

Manuscript received 20 May 2024

Accepted 27 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Современная экологическая ситуация в Каспийском регионе характеризуется нестабильностью, обусловленной совместным действием ряда природных и антропогенных факторов. Антропогенная деятельность в регионе может привести к значительным экологическим рискам, и поэтому уменьшение и предотвращение таких воздействий имеют первостепенное значение. Одной из основных задач является охрана окружающей среды Каспийского моря и прилегающей территории суши, защита стратегически важных объектов предприятий по добыче и переработке нефти и газа, терминалов, магистральных трубопроводов, от стихийных бедствий и техногенных аварий. Особое внимание уделяется ликвидации источников загрязнения окружающей среды (рис. 1) и устранению экологических проблем Каспийского моря и прилегающих территорий прикаспийских государств. Каспийское море, окруженное пятью прибрежными странами — Республикой Азербайджан, Российской Федерацией, Республикой Казахстан, Туркменистаном и Исламской Республикой Иран, является самым большим бессточным водоемом на Земле. Изолированность Каспийского моря, которое отличается особыми климатическими условиями и градиентами солёности, привела к образованию уникальной экосистемы [1].

Освоение морских нефтегазовых месторождений в Каспийском море влечет за собой повышение антропогенной нагрузки на природные ландшафты и экосистемы и тем самым может способствовать дальнейшей дестабилизации экологической обстановки в регионе. Динамика региональной экономики демонстрирует четкую зависимость

от спроса на энергоносители [2]. Транспортировка углеводородов и нефтепродуктов значительно увеличена с использованием танкерных флотилий и трубопроводов. Разведка новых нефтяных и газовых месторождений, так же как и эксплуатация уже известных, будет, вместе с ростом транспортных систем, вести к росту региональной экономики, но при этом неизбежно приведет и к увеличению нагрузки на окружающую среду, которая и так уже находится в состоянии существенной деградации.

Методика оценки антропогенных процессов

В качестве методики оценки антропогенных процессов, влияющих на окружающую среду Каспийского моря и прилегающих территорий, была использована концепция DPSIR: «движущие силы — нагрузки — состояние — воздействия — реакция», которая определяет связи между деятельностью человека и состоянием и тенденциями окружающей среды. Концепция DPSIR широко используется для анализа экологических проблем комплексного управления морской средой (рис. 2).

Разработанный Программой ООН по окружающей среде (ЮНЕП) процесс комплексного анализа окружающей среды (в особенности Глобальной экологической перспективы) основан на этой методике. У нее есть ряд преимуществ: она учитывает данные простого, интуитивного анализа взаимосвязей между людьми и средой, а также всестороннего вовлечения заинтересованных сторон, интегрирует социальные и естественные науки, политику и законодательство. В данной статье рассмотрены современное состояние и нагрузки, связанные



Рис. 1. Источники загрязнения окружающей среды в Каспийском море и прилегающих территориях прикаспийских государств

Fig. 1. Sources of environmental pollution in the Caspian Sea and adjacent territories of the Caspian states

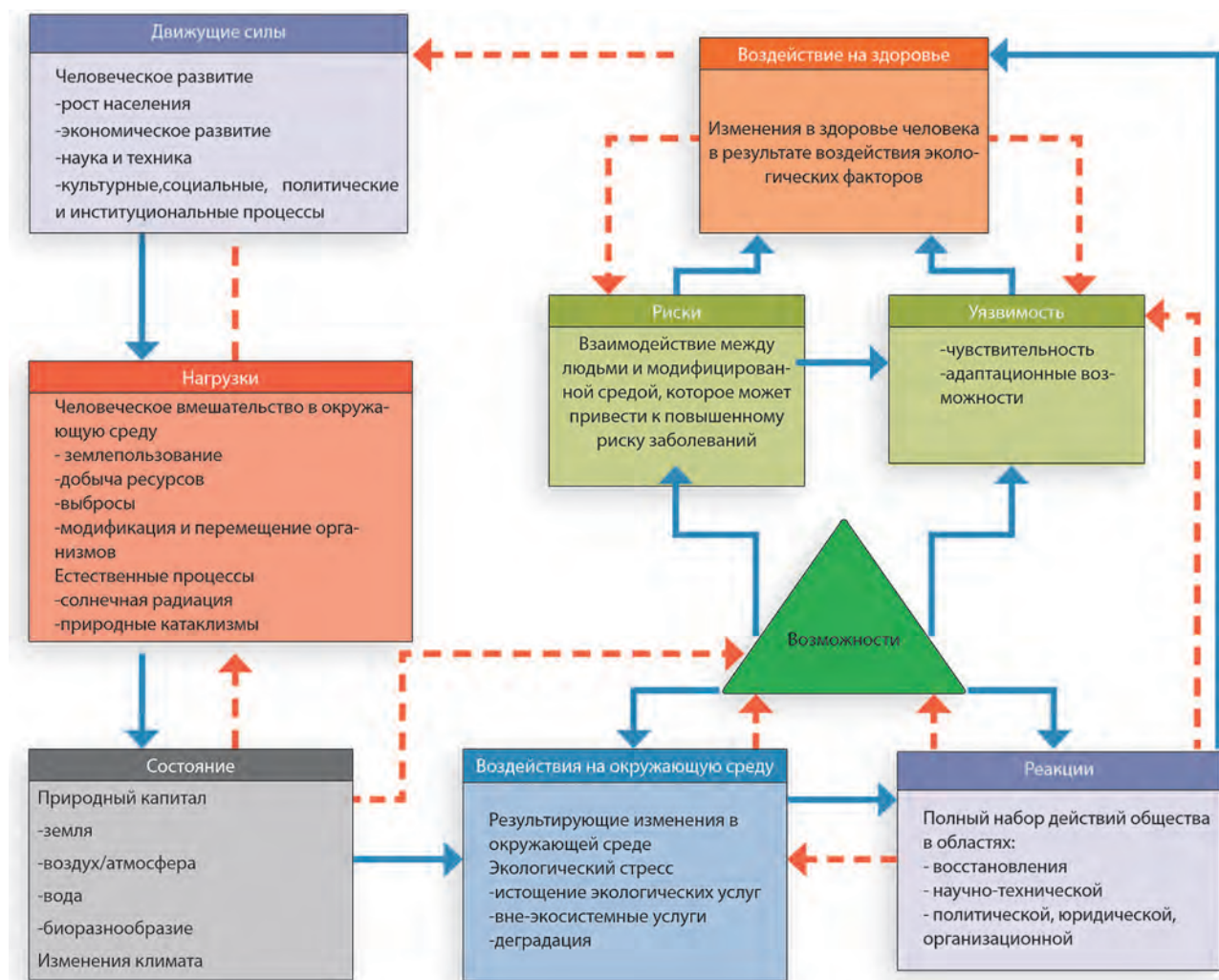


Рис. 2. Схема методик DPSIR (Источник: UNEP, *Global Environment Outlook: environment for development (GEO-4)*, 2007)

Fig. 2. Diagram of the DPSIR methodology (Source: UNEP, *Global Environment Outlook: environment for development (GEO-4)*, 2007)

с антропогенным воздействием на окружающую среду Каспийского региона.

Состояние окружающей среды и нагрузки, связанные с антропогенным воздействием на среду нефтегазовым сектором

В результате анализа индикаторов можно сделать вывод о том, что наиболее важными факторами, оказывающими воздействие на состояние окружающей среды, являются урбанизация, нефтегазовый сектор, а также браконьерство и сельское хозяйство. Указанные выше движущие силы за последние 10 лет внесли существенные изменения в состояние биологических ресурсов в Каспийском море. Обследования, проводившиеся в последние годы, показали,

что биологическое разнообразие находится под существенным антропогенным воздействием.

Нефтегазовый сектор остается одной из главных движущих сил экономического развития государств региона, оказывая существенное воздействие на окружающую среду Каспийского моря. Все прикаспийские страны планируют продолжить разведку месторождений и добычу нефти и газа как на шельфе Каспийского моря, так и в прибрежной зоне. Увеличение добычи нефти и газа, а также объемов транспортировки вызывают определенную озабоченность в связи с возможными экологическими рисками. Каспийское море уже подверглось загрязнению, вызванному деятельностью нефтегазовой отрасли, и в настоящее время наблюдается некоторое увеличение уровня

загрязнения, вызванное такими видами деятельности, как бурение, техническое обслуживание буровых установок, транспортировка нефти и выброс нефти и газа при осуществлении буровых работ. Помимо случайных разливов, переработка, транспорт и другие отрасли также увеличивают нагрузку на окружающую среду путем загрязнения воды и воздуха. Сравнение основных показателей загрязнения морской воды вокруг зон нефте- и газодобычи показало увеличение концентрации загрязняющих веществ.

Крупнейшими объектами добычи нефти в Азербайджане являются комплексы «Азери — Чираг — глубоководный Гюнешли» и «Шахдениз», последний из которых — одно из крупнейших газоконденсатных месторождений в мире, которое в скором времени начнет наращивать объемы поставок на турецкий рынок. Кроме того, структура «Шафаг-Асиман» находится в процессе геологоразведочных изысканий, поддерживаемых Соглашением о разделе продукции между BP и SOCAR (BP Azerbaijan, 2017).

Развитие и состояние нефтедобычи позволяют классифицировать Казахстан как традиционно нефтегазодобывающую страну, а нефтегазовую промышленность — как одну из ведущих отраслей экономики Казахстана. На территории Республики Казахстан расположено 202 нефтяных и газовых месторождения. Прогнозные извлекаемые ресурсы нефти оцениваются в размере 7,8 млрд т, а природного газа — 7,1 трлн м³. Около 70% этих ресурсов сосредоточено в западных областях Казахстана. Причем потенциальные запасы нефти и газа на морском шельфе равны их суммарным запасам на суше (Kazakhstan Business Magazine, 2018).

На шельфе российского сектора Каспийского моря открыто более десяти многопластовых нефтегазоконденсатных месторождений. ПАО «ЛУКОЙЛ» в акватории Каспия принадлежат лицензии на разработку 8 месторождений углеводородного сырья, суммарные извлекаемые запасы которых оцениваются в 386,3 млн т нефти и газового конденсата и более 650 млрд м³ газа. Это месторождения им. Ю. Корчагина, им. В. Филановского, им. Ю. Кувыкина, Ракушечное, Западно-Ракушечное, Хвалынское, Центральное и месторождение 170-й км. Освоение месторождений осуществляет ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть».

На открытом в 2000 году и введенном в эксплуатацию в 2010 году месторождении им. Ю. Корчагина действуют 16 эксплуатационных скважин. Месторождение им. Ю. Корчагина расположено

в 180 км от Астрахани и 240 км от Махачкалы. Глубина моря в районе месторождения составляет 11—13 метров. Месторождение им. В. Филановского расположено в акватории Каспийского моря. Открыто в 2005 году. Проектная добыча нефти должна составить 6 млн т/год. В октябре 2016 года месторождение им. В. Филановского введено в промышленную эксплуатацию. Ракушечное месторождение расположено в российской части на шельфе Северного Каспия. Месторождение открыто в 2001 году поисковой скважиной № 1.

Основным нефтеносным регионом Туркменистана является расположенный на западе страны Балканский веляят. Разработка нефтяных месторождений началась в конце 1890 годов, а регулярная промышленная добыча нефти — в 1933 году. В Туркменистане разведано около 200 месторождений нефти и газа. Потенциальные ресурсы углеводородов страны оцениваются в 71,2 млрд т нефтяного эквивалента, из которых 53 млрд тонн находятся на суше, а 18,2 млрд т — в морских акваториях (Геологические ресурсы, 2018). В Марыйском веляйте резервы месторождения «Галкыныш» совместно с расположенным рядом «Яшлар» оцениваются в 26,2 трлн м³ газа, а с учетом запасов вновь открытого связанного с ними месторождения «Гаракель», которое является частью этого блока, этот объем увеличивается до 27,4 трлн м³ газа.

Компании-недропользователи пользуются различными технологиями и техническими средствами ППБУ, СПБУ, применяют морские основания, буровые судна и баржи. На прикаспийских территориях производится активная нефтегазодобыча и переработка углеводородного сырья. В регионе хорошо развита нефтегазотранспортная инфраструктура, как танкерная, так и трубопроводная, которая связывает центры добычи сырья с потребителями.

Проблема нефтяного загрязнения Каспийского моря приобрела особую остроту и злободневность в связи с крупномасштабным освоением углеводородных запасов его шельфа всеми прикаспийскими государствами одновременно.

Заметное ухудшение экологического состояния отмечено в последние годы и в прибрежных водах Туркменистана, Казахстана и России (Дагестан), где в организмах гидробионтов обнаружены паразитарные и патогенные бактерии, а многоядерные ооциты с цитотомией уже стали обычным явлением, присущим не отдельным локальным участкам Каспия, а едва ли не всей акватории моря.

Антропогенная дегазация долгоживущих парниковых газов

Главной причиной выбросов газов в атмосферу является антропогенная деятельность. Изменение климата связано с увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере, в число которых входят метан (CH_4), диоксид углерода (CO_2), оксид азота (N_2O), гексафторид серы (SF_6), перфторуглероды (ПФУ) и гидрофторуглероды (ГФУ) (Бюллетень ВМО по парниковым газам, 2015) [13—17].

Вклад *диоксида углерода* в увеличение радиационного воздействия долгоживущих парниковых газов за последнее десятилетие составляет примерно 82%, а за последние пять лет — порядка 81%. Глобально усредненная молярная доля CO_2 в 2018 г. составила $407,8 \pm 0,1$ млн⁻¹. Из всего объема выбросов в результате человеческой деятельности в период с 2009 по 2018 гг. около 44% аккумулировалось в атмосфере, 23% — в океане и 29% — на суше; не соотнесенный ни с чем остаток баланса составляет 4% [19].

Глобально усредненная молярная доля *метана*, рассчитанная на основании наблюдений *in situ*, достигла в 2018 г. нового максимума, составившего 1869 ± 2 млрд⁻¹, что является увеличением на 10 млрд⁻¹ по отношению к предыдущему году. Это значительно превышает прирост молярной доли метана в размере 7 млрд⁻¹ в период с 2016 по 2017 гг., а также среднегодовое увеличение за последнее десятилетие [21, 22].

Глобально усредненная молярная доля *оксида азота* в 2018 г. достигла $331,1 \pm 0,1$ млрд⁻¹, что на 1,2 млрд⁻¹ выше показателя предыдущего года и на 123% больше доиндустриального уровня (270 млрд⁻¹). Вероятные причины увеличения концентрации N_2O в атмосфере заключаются в расширении использования удобрений в сельском хозяйстве и увеличении объема N_2O , высвобождающегося из почв из-за избыточного осаждения атмосферного азота в связи с загрязнением воздуха.

Содержание в атмосфере некоторых гидрохлорфторуглеродов и гидрофторуглеродов растет относительно высокими темпами даже при том, что степень их концентрации находится на низком уровне — трлн⁻¹.

Диоксид углерода является наиболее важным антропогенным парниковым газом в атмосфере, доля которого в радиационном воздействии составляет приблизительно 66%. Доля выбросов CO_2 в результате сжигания ископаемого топлива, которая остается в атмосфере (атмосферная фракция), изменяется каждый год вследствие

значительной естественной изменчивости поглотителей CO_2 . Продукты сжигания ископаемого топлива от природных источников CO_2 можно отличать, воспользовавшись измерением концентрации радиоактивного углерода (^{14}C) в составе атмосферного углекислого газа. Измерение изотопного состава CO_2 в атмосфере помогает идентифицировать и количественно определять его источники и поглотители. В природных системах присутствуют три изотопа углерода: ^{12}C (~99% всего объема углерода), ^{13}C (~1%) и ^{14}C (~1 часть на триллион). Все изотопы углерода живут на протяжении всего углеродного цикла, однако относительная доля каждого изотопа в различных накопителях углерода варьируется, создавая уникальные «отпечатки» для каждого накопителя. Концентрация ^{14}C является важным показателем для обнаружения CO_2 в результате сжигания ископаемого топлива и в настоящее время выступает в качестве основного метода оценки выбросов CO_2 в результате сжигания ископаемого топлива при производстве измерений в атмосфере. Одновременные наблюдения за CO_2 и ^{14}C свидетельствуют о снижении содержания ^{14}C в атмосферном CO_2 , вызванном выбросом в атмосферу дополнительных объемов CO_2 в результате сжигания ископаемого топлива. Например, модели расположения мест с высокой концентрацией CO_2 в результате сжигания ископаемого топлива были определены в большинстве стран мира благодаря пробам атмосферного ^{14}C , взятым непосредственно в воздухе и растительном материале [20].

В таблице 1 представлены показатели выбросов углекислого газа CO_2 по странам мира по данным Всемирного банка (ВБ). Самыми крупными эмитентами CO_2 являются Китай и США. Только на эти две страны вместе приходится более 40% общемировых выбросов CO_2 . Другим показателем является эмиссия CO_2 на душу населения, который используется в климатологии и экологии для оценки уровня выброса парниковых газов (см. табл. 1). В связке с валовым национальным продуктом данный показатель характеризует энергетическую зависимость страны от углеводородов. С точки зрения климатологии высокие значения эмиссии CO_2 , ведущие к росту содержания парниковых газов в атмосфере Земли, являются основной причиной глобального потепления. Весьма интересна информация о показателях выбросов углекислого газа в прикаспийских государствах. Согласно показателям, выбросы углекислого газа составляют в России 1,909, Иране — Казахстане 686, Туркменистане 70 и Азербайджане 37 млн т/год.

Таблица 1. Показатели выбросов углекислого газа CO₂ по странам мира по данным Всемирного банка
Table 1. CO₂ emissions by country according to the World Bank

Доля в % от общих выбросов CO ₂				Эмиссии CO ₂ на душу населения		
№	Страна	2022, млн т/год	2022, %	№	Страна	2022, %
1	 Китай	12,667	32,884	1	 Палау	59,00
2	 США	4,853	12,600	2	 Катар	35,52
3	 Индия	2,693	6,991	3	 Кувейт	24,90
4	 Россия	1,909	4,956	15	 Россия	13,31
7	 Иран	686	1,782	16	 Казахстан	12,85
27	 Казахстан	246	0,638	22	 Туркменистан	11,27
49	 Туркменистан	70	0,181	34	 Иран	8,08
69	 Азербайджан	37	0,096	86	 Азербайджан	3,62
	 Европейский союз	2804,8	7,281		 Европейский союз	6,30
	Всего в мире	38 521,9	100,0		Среднее в мире	4,80

Информация о динамике выбросов диоксида углерода, генерируемых из стационарных источников на территории Азербайджана, показана на рисунке 3а. По выбросам CO₂ Азербайджан находится на 69-м, а по эмиссии CO₂ на душу населения — на 86-м месте (см. табл. 1). Выбросы углекислого газа в Азербайджане в 2022 г. сократились на 7,5% по сравнению с 2019 г.

Доля метана в радиационном воздействии дурнопахнущих газов (ДПГ) составляет примерно 17%. Приблизительно 40% метана поступает в атмосферу из естественных источников (например, глубинный метан, водно-болотные угодья и термитники) и около 60% — из антропогенных (например, использование ископаемого топлива, захоронение отходов и сжигание биомассы, разведение скота, выращивание риса и др.). Информация о динамике выбросов метана CH₄ на территории Азербайджана показана на рисунке 3б.

Доля оксида азота в радиационном воздействии ДПГ составляет примерно 6%. Так, N₂O поступает в атмосферу как из естественных (около 60%), так и из антропогенных источников (приблизительно 40%), включая океаны, почву, сжигание биомассы, использование удобрений и различные промышленные процессы. Информация о динамике выбросов оксида азота, генерируемых из стационарных источников на территории Азербайджана, показана на рисунке 4а. В целом структура выбросов ДПГ на территории Азербайджана показана на рисунке 4б.

Из прочих парниковых газов вклад хлорфторуглеродов, разрушающих стратосферный озоновый слой, вместе с менее значимыми галогенированными газами в радиационное воздействие ДПГ составляет ~11%. Содержащиеся в атмосфере гидрохлорфторуглероды и гидрофторуглероды также являются активными парниковыми газами. Гексафторид серы, содержание которого в атмосфере находится на таком же низком уровне, является чрезвычайно активным ДПГ. Он производится химической промышленностью, главным образом, в качестве электроизоляционного материала в оборудовании для распределения электроэнергии. В настоящее время его молярная доля более чем в два раза превышает уровень, который наблюдался в середине 1990-х гг.

Проведенные исследования позволили определить объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в Азербайджане по компонентам (рис. 5, табл. 2) и географию дегазации парниковых газов на территории Азербайджана (рис. 6).

По видам экономической деятельности антропогенные выбросы парниковых газов, загрязняющих атмосферу, генерируемых из стационарных источников в Азербайджане, образуются в результате производственной деятельности ряда отраслей (табл. 3). При этом доля предприятий топливно-энергетического комплекса (рис. 7), выбрасывающих парниковые газы и загрязняющих атмосферу, составляет около 60%.

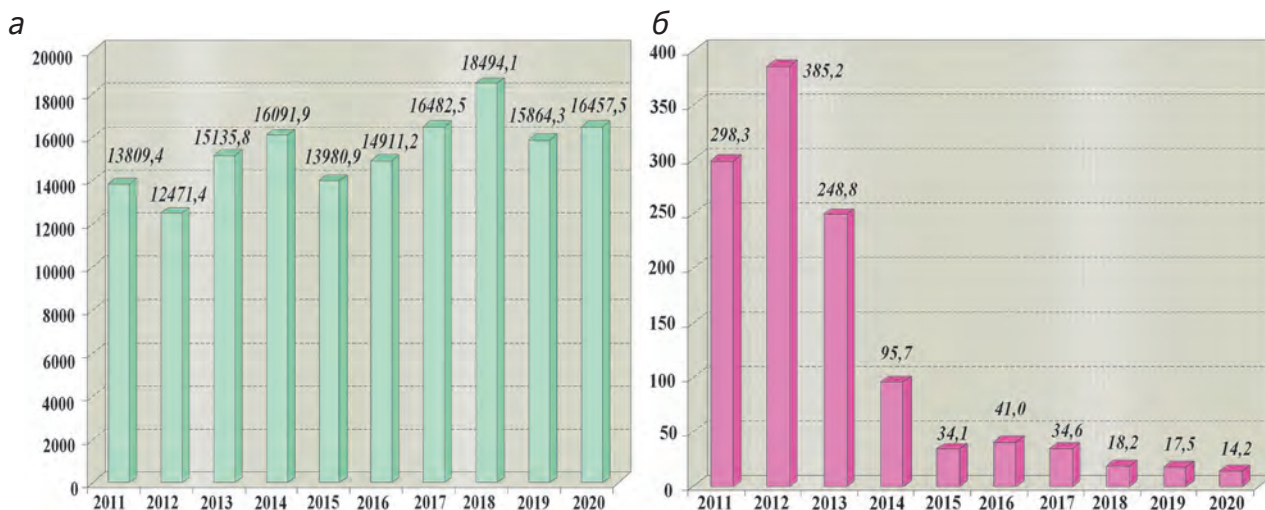


Рис. 3. Динамика выбросов диоксида углерода (а) и метана (б) в тыс. т, генерируемых из стационарных источников на территории Азербайджана (Государственный статистический комитет Азербайджанской Республики, 2022)

Fig. 3. Dynamics of emissions of carbon dioxide (a) and methane (b) in thousand tons, generated from stationary sources on the territory of Azerbaijan (State Statistical Committee of the Azerbaijan Republic, 2022)

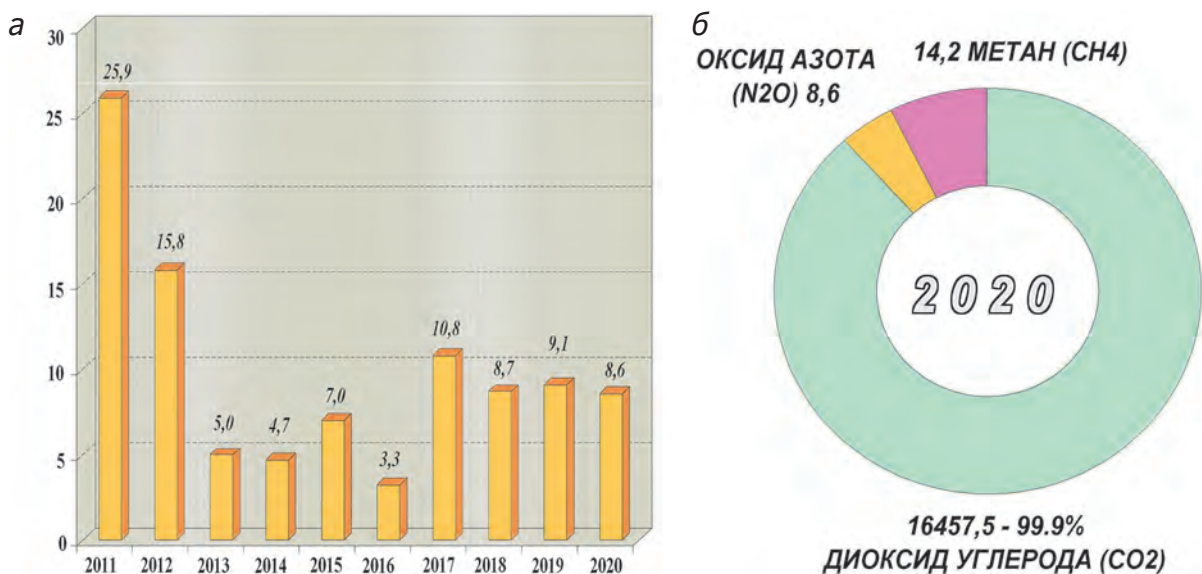


Рис. 4. Динамика выбросов оксида азота (а) и структура выбросов ДПГ (б) на территории Азербайджана (Государственный статистический комитет Азербайджанской Республики, 2022)

Fig. 4. Dynamics of emissions of nitrogen oxide (a) and structure of emissions of BNG (b) on the territory of Azerbaijan (State Statistical Committee of the Azerbaijan Republic, 2022)

Общий выброс парниковых газов (ПГ) Казахстана в 2005 г. составил 243 млн тонн в углеродном эквиваленте. Сектор энергетики ответствен за около 81% от общего количества ПГ, из которых преобладающим является CO₂, за ним следуют метан и закись азота.

Принимая во внимание высокий уровень экономического роста и ускоренное развитие

в топливно-энергетической и горнодобывающей отраслях, ожидалось, что среднегодовые выбросы ПГ будут расти и впоследствии увеличатся в пределах от 340 до 390 млн тонн к 2015 г. (ПРООН 2007/2008). Большая часть атмосферных выбросов Казахстана в прикаспийских Атырауской и Мангистауской областях имеют происхождением нефтегазовую отрасль. Свыше

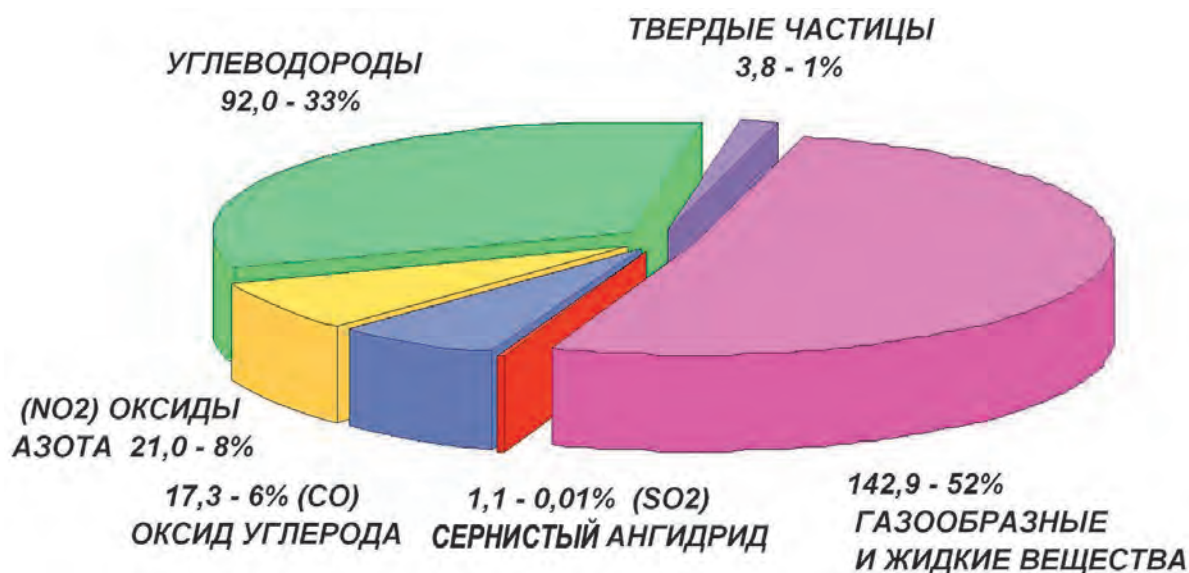


Рис. 5. Объемы выбросов загрязняющих веществ в атмосферу в Азербайджане по компонентам (Государственный статистический комитет Азербайджанской Республики, 2022)

Fig. 5. Volumes of pollutant emissions into the atmosphere in Azerbaijan by components (State Statistical Committee of the Azerbaijan Republic, 2022)



Рис. 6. Карта дегазации на территории Азербайджана (автор В.Ю. Керимов)

Fig. 6. Map of degassing on the territory of Azerbaijan (author V.Yu. Kerimov)

Таблица 2. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, генерируемых парниковыми газами из стационарных источников, тыс. т

Table 2. Emissions of pollutants into the atmosphere generated by greenhouse gases from stationary sources, thousand tons

Загрязняющие вещества	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Диоксид углерода	17 664,4	14 828,8	16 013,3	15 293,1	14 399,6	13 809,4	12 471,4	15 135,8
Оксид азота	0,8	1,7	6,4	10,4	11,8	25,9	15,8	5,0
Метан	16,6	24,3	49,5	24,2	18,3	298,3	385,2	248,8
Промышленные газы с большим периодом жизни								
Гидро-фторуглероды	0,6	0,5	0,2	7,0	6,8	0,0	6,4	3,9
Гексафторид серы (<i>стой- кий парниковый газ</i>)	0,1	0,1	0,2	0,6	0,3	0,7	0,6	0,2
Перфторированные орга- нические соединения	0,9	0,6	0,3	6,4	5,6	0,1	5,6	2,4
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	
Диоксид углерода	16 091,9	13 980,8	14 911,2	16 482,5	18 494,1	15 864,3	16 457,5	
Оксид азота	4,7	7,0	3,3	10,8	8,7	9,1	8,6	
Метан	95,7	34,1	41,0	34,6	18,2	17,5	14,2	
Промышленные газы с большим периодом жизни								
Гидро-фторуглероды	1,8	0,7	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5	
Гексафторид серы (стой- кий парниковый газ)	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
Перфторированные органические соединения	0,0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	

800 м³ попутного газа сжигалось ежегодно (ЕЭК 2008). Были приняты некоторые меры по улучшению положения: крупнейшие нефтяные компании предприняли действия по защите окружающей среды от нынешних и прошлых загрязнений.

Выбросы нефтегазовой отрасли Туркмении составляют 95% от общего объема вредных веществ, производимых в стране. В эту величину входят углеводороды, двуокись серы, углекислый газ, оксиды азота и твердые вещества. В 2001 г. выбросы ПГ снизились на 46% по сравнению с 1999 г. за счет того, что попутный нефтяной газ на месторождениях западного Туркмении утилизировался, а не сжигался или не выбрасывался в атмосферу, как это было раньше. В настоящее время этот газ либо закачивают в магистральный трубопровод, либо закачивают в нефтяные пласты для стимуляции извлечения нефти.

Загрязнение акваторий и территорий Каспийского региона

Каспийское море является одним из важнейших бессточных бассейнов в мире и, поскольку оно окружено со всех сторон сушей, в нем

отсутствует проточность, помогающая самоочищению. Загрязнители, попадающие в воду, остаются в ней за отсутствием механизмов их удаления. Поэтому чрезвычайно важно иметь полную информацию об уровне поступления загрязнителей и таким образом выбирать наилучшие из известных и наиболее эффективные средства экологической компенсации или уменьшения загрязнения. Приток воды из рек является ключевым фактором в Каспийском бассейне, что усиливает необходимость количественного мониторинга загрязняющих веществ, принесенных водотоком. Крупнейшими загрязняющими отраслями являются сельское хозяйство, промышленность, включая нефтегазовую, и урбанизация.

Что касается сельского хозяйства, то химические материалы, используемые в удобрениях и пестицидах, включают хлорсодержащие пестициды, в особенности ДДТ (дихлордифенилтрихлорэтан) и ГХЦГ (гексахлорциклогексаны). Эти вещества преимущественно используются в малых фермерских хозяйствах вдоль побережья Каспийского моря и в его пресноводных дельтах в Азербайджане, Иране и Туркменистане.

Таблица 3. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников по видам экономической деятельности и компонентам в 2020 г., тыс. т

Table 3. Emissions of pollutants into the atmosphere from stationary sources by type of economic activity and components in 2020, thousand tons

Виды экономической деятельности	Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, всего	Включая					
		Твердые частицы	Газообразные и жидкие вещества	Сернистый ангидрид	Оксид углерода	Оксид азота	Углеродороды
ВСЕГО	146,7	3,8	142,9	1,1	17,3	21,0	92,0
Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	0,2	0,0	0,2	0,0	0,1	0,0	0,0
Добыча полезных ископаемых	60,5	2,7	57,8	0,2	6,6	9,5	41,0
Обрабатывающие производства	25,1	0,9	24,2	0,8	2,2	2,7	8,8
Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха	24,5	–	24,5	0,0	7,3	8,2	8,4
Водоснабжение, очистка сточных вод	0,4	0,0	0,4	0,0	0,1	0,3	0,0
Строительная индустрия	1,2	0,2	1,0	0,1	0,3	0,1	0,1
Розничная и оптовая торговля, ремонт автотранспортных средств и мотоциклов	0,6	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,5
Транспортировка, хранение и связь	34,2	0,0	34,2	0,0	0,7	0,2	33,2
Предоставление прочих видов услуг	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Вследствие этого увеличились стоки этих загрязнителей в Каспийское море. Недавнее нашествие саранчи в Российской Федерации и Казахстане привело в этих странах к распылению с самолетов пестицидов на основе ДДТ. Промышленные стоки вносят заметный вклад в загрязнение Каспийского моря (рис. 8).

Нефтяное загрязнение представляет собой серьезную проблему на всем Апшеронском полуострове Азербайджана, в водах близ Хазара в Туркменистане и в Атырау в Казахстане. Для предотвращения утечек из старых или заброшенных нефтяных скважин крайне необходима модернизация технологии и инфраструктуры. В целом принято считать, что основная часть общего загрязнения поступает в Каспий из рек Волги, Урала и Куры. Доля загрязнения из Атрека, Самура и других рек в Иране относительно мала, хотя их воздействие на региональном уровне весьма значительно в силу особенностей

водооборота. Характерной чертой этого региона является то, что основная масса токсичных веществ, имеющих источником Волгу, оседает в ее дельте и прилегающей прибрежной зоне, в то время как токсичные вещества реки Урал оседают в заболоченной экосистеме мелководной северной части Каспийского моря.

Заключение

Проведенные исследования позволили определить масштабы и географию дегазации парниковых газов, объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу по компонентам, структуру выбросов парниковых газов и динамику выбросов диоксида углерода, метана и оксида азота, генерируемых из стационарных источников на территории Каспийского региона. По результатам деятельности антропогенные выбросы парниковых газов, загрязняющих атмосферу и морскую акваторию, генерируемых из стационарных источников,



Условные обозначения



Рис. 7. Топливо-энергетический комплекс Азербайджана
Fig. 7. Fuel and energy complex of Azerbaijan

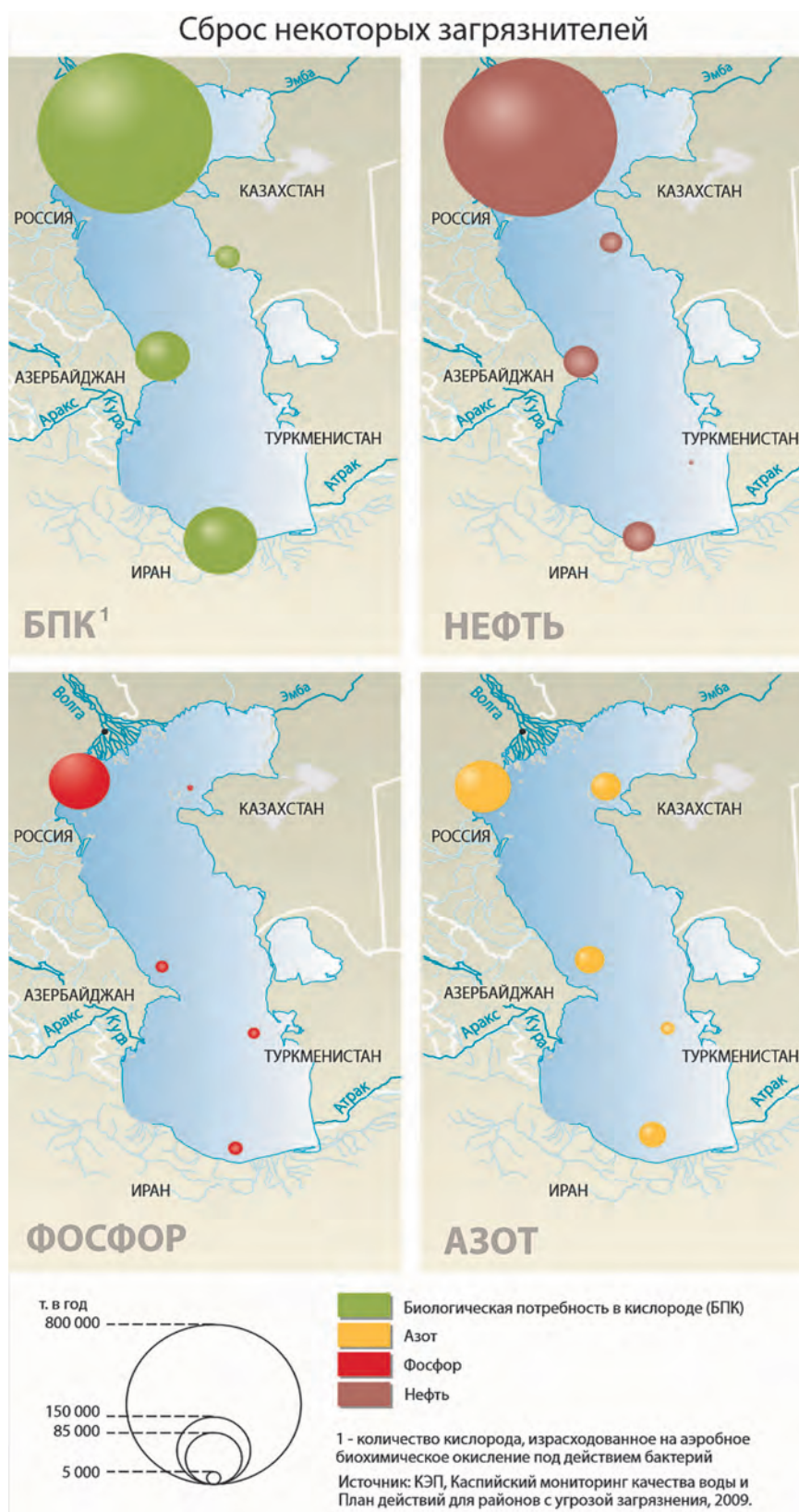


Рис. 8. Сброс загрязнителей в Каспийское море
Fig. 8. Discharge of pollutants into the Caspian Sea

образуются в результате производственной деятельности ряда отраслей: добыча полезных ископаемых, обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционирование воздуха, обрабатывающие производства, водоснабжение, очистка сточных вод, строительная индустрия, сельское и лесное хозяйство, транспорт, хранение и связь, ремонт автотранспортных средств и мотоциклов, а также другие виды деятельности.

Доля предприятий топливно-энергетического комплекса, выбрасывающих парниковые газы, которые загрязняют атмосферу, составляет около 60%. Показана структура выбросов парниковых газов и динамика выбросов диоксида углерода, метана и оксида азота, генерируемых

из стационарных источников на территории Каспийского региона.

Каспийское море является одним из важнейших бессточных бассейнов в мире и, поскольку оно окружено со всех сторон сушей, в нем отсутствует проточность, помогающая самоочищению. Загрязнители, попадающие в воду, остаются в ней за отсутствием механизмов их удаления. Чрезвычайно важно иметь полную информацию об уровне поступления загрязнителей, что позволит выбирать наилучшие из известных и наиболее эффективные средства экологической компенсации или уменьшения загрязнения. Крупнейшими загрязняющими отраслями являются сельское хозяйство, промышленность, включая нефтегазовую, и урбанизация.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Nafta-Press, 2015. 323 с.
2. Буачидзе Г.И., Мхеидзе Б.С. Природные газы Грузии. Тбилиси: «Мецниереба», 1989. 155 с.
3. Бутаев А.М., Рыбникова В.И., Гаджиев А.З. Бактериальное загрязнение прибрежных вод Каспия в районе Махачкалы // Вестник ДНЦ РАН. 1998. № 1. С. 69—73.
4. Галимов Э.М. Изотопы углерода в нефтегазовой геологии. М.: Недра, 1973. 384 с.
5. Гемп С.Д., Дуброва Н.В., Несмелова З.Н. Изотопный состав углерода углеродсодержащих газов (CH_4 и CO_2) грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Геохимия. 1970. № 2, С. 243—247.
6. Гулиев И.С. Зональность природных газов Азербайджана и газогеохимические поиски нефти и газа: автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук, М., 1978. 24 с.
7. Гулиев И.С., Керимов В.Ю. Углеродная дегазация Земли: мониторинг, масштабы и геоэкологические последствия // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 4(23). 79 с.
8. Гулиев И.С., Мустаев Р.Н., Керимов В.Ю., Юдин М.Н. Дегазация Земли: масштабы и последствия // Горный журнал. 2018. № 11, С. 38—42.
9. Дадашев Ф.Г., Гулиев И.С. Газоносность мезокайнозойских отложений и перспективы поиска новых газовых месторождений в Южно-Каспийской впадине // В книге: Очерки по геологии Азербайджана. Баку: Азернешр., 1984. С. 126—147.
10. Дадашев Ф.Г., Гулиев И.С., Фейзуллаев А.А. Геотектонические и геохимические особенности дегазации Земли в пределах геосинклинальных областей // В книге: Дегазация Земли и геотектоника. М.: Наука, С. 116—123.
11. Иванов В.П., Соколовский А.Ф. Научные основы стратегии защиты биологических ресурсов Каспийского моря от нефтяного загрязнения. Астрахань: Изд-во КаспНИРХа, 2000. 181 с.
12. Касымов А.Г. Экология Каспийского озера. Баку, 1994. 237 с.
13. Керимов В.Ю., Бондарев А.В., Мустаев Р.Н., Хоштария В.Н. Оценка геологических рисков при поисках и разведке месторождений углеводородов // Нефтяное хозяйство. 2017. № 8, С. 36—41.
14. Миронов О.Г. Нефтеокисляющие микроорганизмы в море. Киев: Наукова думка, 1971. 234 с.
15. Патин С.А. Нефть и экология континентального шельфа. М.: Изд-во ВНИРО, 2001. 247 с.
16. Салманов М.А. Экология и биологическая продуктивность Каспийского моря. Баку, 1999. 400 с.
17. Челидзе Т.Л. Термодинамические условия и петрофизические модели участков земной коры Кавказа / В книге: Структура земной коры территории Грузии по сейсмическим и магнитным данным. Тбилиси: Мецниереба, 1983. С. 97—115.
18. Butler J.H., Montzka S.A. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Published online Spring 2018, URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html> (дата обращения: 15.05.2024).
19. Friedlingstein P., Jones M.W., et al. Global Carbon Budget 2019 // Earth Syst. Sci. Data. 2019. Vol. 11. P. 1783—1838.
20. Hsueh D.Y., Krakauer N.Y., et al. Regional patterns of radiocarbon and fossil fuel-derived CO_2 in surface air across North America // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L02816.
21. Guliev I.S., Kerimov V.Y., Etirmishli G.D., Yusubov N.P., Mustaev R.N., Huseynova A.B. Modern geodynamic processes and their impact on replenishment of hydrocarbon resources in the Black Sea — Caspian Region // Geotectonics. 2021. No. 55. P. 393—407.
22. State of the Environment of the Caspian Sea. Report by the Interim Secretariat of the Framework Convention for the Protection of the Marine Environment of the Caspian Sea and the Project Coordination Management Unit of the “CaspEco” project. Iran. 2011. 102 p.

REFERENCE

1. Aliiev A.A., Guliyev I.S., Dadashev F.G., Rakhmanov R.R. Atlas of mud volcanoes of the world. Baku: Nafta-Press, 2015. 323 p. (In Russian).
2. Buachidze G.I., Mkheidze B.S. Natural gases of Georgia. Tbilisi: Metsniereba, 1989. 155 p. (In Russian).
3. Butaev A.M., Rybnikova V.I., Gadzhiev A.Z. Bacterial pollution of coastal waters of the Caspian Sea in the Makhachkala region // Vestnik DSC RAS. 1998. №. 1. P. 69—73 (In Russian).
4. Galimov E.M. Isotopes of carbon in oil and gas geology. Moscow: Nedra, 1973. 384 p. (In Russian).
5. Gemp S.D., Dubrova N.V., Nesmelova Z.N. Isotope composition of carbon in carbon-containing gases (CH₄ and CO₂) mud volcanoes of the Kerch-Taman region // Geochemistry. 1970. No. 2. P. 243—247 (In Russian).
6. Guliyev I.S. Zonality of natural gases of Azerbaijan and gas-geochemical prospecting for oil and gas: abstract of PhD dissertation (geology), Moscow, 1978. 24 p. (In Russian).
7. Guliyev I.S., Kerimov V.Yu. Hydrocarbon degassing of the Earth: monitoring, scale and geoecological consequences // Actual problems of oil and gas. 2018. Vol. 4(23). 79 p. (In Russian).
8. Guliev I.S., Mustaev R.N., Kerimov V.Y., Yudin M.N. Degassing of the Earth: scale and implications // Gornyi Zhurnal. 2018. No. 11. P. 38—42 (In Russian).
9. Dadashev F.G., Guliyev I.S. Gas content of Mesozoic deposits and prospecting for new gas fields in the South Caspian Basin // In: Essays on the geology of Azerbaijan. Baku: Azerneshr., 1984. P. 126—147 (In Russian).
10. Dadashev F.G., Guliyev I.S., Feyzullaev A.A. Geotectonic and geochemical features of the Earth degassing within geosynclinal regions // In: Earth degassing and geotectonics. Proceedings of the All-Union Symposium. Moscow, 1980. P. 116—123 (In Russian).
11. Ivanov V.P., Sokolsky A.F. Scientific basis of protection strategy biological resources of the Caspian Sea from oil pollution. Astrakhan: KaspNIRKh Publishing House, 2000. 181 p. (In Russian).
12. Kasymov A.G. Ecology of the Caspian Lake. Baku, 1994. 237 p. (In Russian).
13. Kerimov V.Yu., Bondarev A.V., Mustaev R.N., Khoshtariya V.N. Estimation of geological risks in searching and exploration of hydrocarbon deposits // Neftyanoe Khozyaystvo = Oil Industry. 2017. No. 8. P. 36—41 (In Russian).
14. Mironov O.G. Oil-oxidizing microorganisms in the sea. Kyiv: Naukova Dumka, 1971. 234 p. (In Russian).
15. Patin S.A. Oil and the ecology of the continental shelf. Moscow: Publishing house VNIRO, 2001. 247 p. (In Russian).
16. Salmanov M.A. Ecology and biological productivity of the Caspian Sea. Baku, 1999. 400 p. (In Russian).
17. Chelidze T.L. Thermodynamic conditions and petrophysical models of sections of the Caucasus earth's crust // In: The structure of the earth's crust of the Georgia territory according to seismic and magnetic data. Tbilisi: Metsniereba, 1983. P. 97—115 (In Russian).
18. Butler J.H., Montzka S.A. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). Published online. Spring 2018, URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html> (date of the application: 15.05.2024).
19. Friedlingstein P., Jones M.W. et al. Global Carbon Budget 2019 // Earth Syst. Sci. Data. 2019. Vol. 11. P. 1783—1838.
20. Hsueh D.Y., Krakauer N.Y., et al. Regional patterns of radiocarbon and fossil fuel-derived CO₂ in surface air across North America // Geophysical Research Letters. 2007. Vol. 34. L02816.
21. Guliev I.S., Kerimov V.Yu., Etirmishli G.D., Yusubov N.P., Mustaev R.N., Huseynova A.B. Modern geodynamic processes and their impact on replenishment of hydrocarbon resources in the Black Sea — Caspian Region // Geotectonics. 2021. No. 55. P. 393—407.
22. State of the Environment of the Caspian Sea. Report by the interim Secretariat of the Framework Convention for the Protection of the Marine Environment of the Caspian Sea and the Project Coordination Management Unit of the "CaspEco" project. Iran. 2011. 102 p.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Алиев Э.М. — участвовал в подготовке текста статьи, оформил и выполнил перевод статьи на английский язык и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

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

Лобанов Ю.А. — присоединился к подготовке текста статьи и согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Emin M. Aliyev — participated in the preparation of the text of the article, designed and translated the article into English and agrees to accept responsibility for all aspects of the work.

Vagif Yu. Kerimov — 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.

Yury A. Lobanov — joined the preparation of the text of the article and agrees to take responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Эмиль Малик оглы Алиев — диссертант, научный сотрудник Института нефти и газа Министерства науки и образования Азербайджанской Республики.

9, ул. Ф. Амирова, г. Баку, AZ1000, Азербайджан

e-mail: emil.aliyev07@gmail.com

тел.: (+994 12) 492-28-43

Emin M. Aliyev — dissertator, researcher, Institute of Oil and Gas of the Ministry of Science and Education of the Republic of Azerbaijan.

9, F. Amirov str., Baku, AZ1000, Azerbaijan

e-mail: emil.aliyev07@gmail.com

тел.: (+994 12) 492-28-43

Керимов Вагиф Юнус оглы* — доктор геолого-минералогических наук, профессор, Заслуженный геолог РФ, академик РАЕН, заведующий кафедрой геологии и разведки месторождений углеводородов ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: kerimovvy@mgri.ru

тел.: +7 (495) 461-37-77, доб. 21-12

SPIN: 9696-1364

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-8208>

Vagif Yu. Kerimov* — Dr. Sci. (Geol.-Min.), Prof., Honored Geologist of the Russian Federation, academician of the RAS, Head of the Department of Geology and Exploration of Hydrocarbon Deposits at Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

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

e-mail: kerimovvy@mgri.ru

tel.: +7 (495) 461-37-77, add. 21-12

SPIN: 9696-1364

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9485-8208>

Лобанов Юрий Анатольевич — проректор по общим вопросам и безопасности ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе».

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

e-mail: lobanovua@mgri.ru

тел.: +7 (495) 255-15-10 доб. 20-09

Yury A. Lobanov — Vice-Rector for General Affairs and Security of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

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

e-mail: lobanovua@mgri.ru

tel.: +7 (495) 255-15-10 add. 20-09

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author



ИСТОРИЯ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ГАЛАПАГОССКИХ ОСТРОВАХ (РЕСПУБЛИКА ЭКВАДОР)

М.Л. РОСЕРО ВАЛЬЕХО*, О.А. ХЛЕБОСОЛОВА

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

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассматривается история создания и особенности функционирования системы экологического мониторинга в Республике Эквадор на примере Галапагосских островов. Предлагается изменение системы экологического мониторинга с целью предотвращения негативных последствий человеческой деятельности.

Цель. Оценить экологические последствия антропогенной деятельности на окружающую среду островов и разработать рекомендации по созданию единой системы экологического мониторинга для двух охраняемых природных районов Галапагосских островов.

Материалы и методы. Авторы проанализировали законы и другие источники о законодательной основе деятельности государственных учреждений Республики Эквадор в области экологического мониторинга, собрали статистические данные и фоновые источники о программах мониторинга на Галапагосских островах и обобщили их в обзоре.

Результаты. Разработана уникальная программа экологического мониторинга для двух охраняемых природных территорий Галапагосских островов. Рекомендовано включение в него системы стационарных наблюдений, которая позволит собирать данные для оценки воздействия социально-экономической деятельности на природу островов, следить за состоянием экосистем, редких, эндемичных и инвазивных видов, проводить научные исследования для восстановления популяций.

Ключевые слова: мониторинг окружающей среды, охраняемые территории, Галапагосские острова, загрязнение окружающей среды

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Росеро Вальехо М.Л., Хлебосолова О.А. История природопользования и перспективы совершенствования системы экологического мониторинга на Галапагосских островах (Республика Эквадор). *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(2):141—149. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-141-149>

Статья поступила в редакцию 29.10.2023

Принята к публикации 27.06.2024

Опубликована 28.06.2024

* Автор, ответственный за переписку

NATURE MANAGEMENT HISTORY AND PROSPECTS FOR IMPROVING ENVIRONMENTAL MONITORING IN GALAPAGOS ISLANDS (REPUBLIC OF ECUADOR)

MARY LOURDES ROSERO VALLEJO*, OLGA A. KHEBOSOLOVA

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

ABSTRACT

Background. The system of environmental monitoring in the Republic of Ecuador and its history is considered using the Galapagos Islands as an example. The need for its modification with the purpose of preventing the negative consequences of human activity is substantiated.

Aim. To assess the environmental consequences of anthropogenic activity in the Galapagos Islands and to propose a unified environmental monitoring system for two protected natural areas of the Galapagos Islands.

Materials and methods. The current laws and legislative acts related to the activity of the Republic of Ecuador state institutions in the field of environmental monitoring were analyzed. Statistical data and reports on monitoring programs in the Galapagos Islands were reviewed.

Results. A unique environmental monitoring program for two protected natural areas of the Galapagos Islands was developed. It is recommended to complement the program with a system of stationary observations. This system is aimed at collecting data for assessing the impact of socioeconomic activity on the nature of the islands, monitoring the state of ecosystems, rare, endemic and invasive species, as well as for conducting scientific research to restore populations.

Keywords: environmental monitoring, protected areas, Galapagos Islands, environmental pollution

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

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

For citation: Rosero Vallejo M.L., Khebosolova O.A. Nature management history and prospects for improving environmental monitoring in Galapagos Islands (Republic of Ecuador). *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024;66(2):141—149. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-141-149>

Manuscript received 29 October 2023

Accepted 27 June 2024

Published 28 June 2024

* Corresponding author

Галапагосские острова расположены в Тихом океане на расстоянии 972 км от материкового побережья Эквадора: они включают 19 более крупных вулканических островов и около 200 мелких (рис. 1). В административном отношении это одна из 24 провинций страны (рис. 2).

В рельефе островов представлены вулканические конусы более 1000 м и скалы, чередующиеся с небольшими плато от 200 до 300 м. Вулканы имеют кальдеры диаметром около 7 км, кроме вулканических островов есть коралловые. Острова находятся на океанической плите Наска у западного побережья Южной Америки. Смещение

плиты Наска привело 5—10 млн лет назад к образованию на ее окраине Галапагосского архипелага. Движение плиты продолжается в настоящее время в юго-восточном направлении со скоростью до 7 см в год.

Климат архипелага экваториальный сухой: годовой ход температуры включает жаркие месяцы с января по апрель с температурами 26—28 °С и относительно холодный период в остальное время года с температурами 20—24 °С, в горах до 14 °С. Ветер постоянный, прохладный, дует с юга и юго-востока. Моросящий временами дождь (до 400 мм в год) в течение всего года



Рис. 1. Географическое положение Галапагосского архипелага

Fig. 1. Geographical location of the Galapagos Archipelago

сопровождается плотной дымкой, скрывающей острова. Количество пресной воды ограничено. Почвы вулканические, с разреженной растительностью, красно-коричневые и бурые, часто щебнистые с включением фрагментов лавы.

Высотная поясность представлена тремя зонами: теплая сухая и очень сухая у подножия гор, теплая и влажная средневысотная, умеренно теплая и очень влажная возвышенная. На Галапагосских островах произрастает 560 местных видов растений (из них 180 эндемичных), и около 700 видов были завезены на острова в ходе колонизации.

Природные опасности связаны с вулканическими извержениями, землетрясениями, цунами, явлениями «Эль-Ниньо» и «Ла-Нинья», изменением климата, пожарами и оползнями.

Применение сравнительно-исторического подхода позволило выявить особенности природопользования и связанные с ним изменения природы островов на разных этапах хозяйственного освоения территории [4]:

Этап I (с 1535 по 1835 г.) характеризуется появлением первых поселений пиратов и колонистов, уничтожением охотничьих видов животных, развитием очагового скотоводства и земледелия.

Этап II (с 1836 по 1958 г.) связан с присоединением островов к Эквадору, колонизацией крупных островов, неконтролируемым распространением вне населенных пунктов домашних животных



Рис. 2. Галапагосские острова

Fig. 2. Galapagos Islands

и культурных растений, массовым истреблением местных видов флоры и фауны.

Этап III (с 1959 г. по наст. время) обусловлен образованием охраняемых природных территорий (Национального парка и Морского заповедника), быстрым ростом населения, строительством, развитием транспорта, сельского хозяйства, рыболовства, пищевой и легкой промышленности, туризма, загрязнением окружающей среды.

Численность населения Галапагосских островов на 2022 год составляет 33 042 человека, преобладают метисы (85%). Самый густонаселенный остров — Санта-Крус. За год острова посещает около 270 тыс. туристов. Официальным языком на Галапагосских островах является испанский, используется английский, реже язык кечуа.

Проблемы социально-экономического развития Галапагосских островов в значительной мере связаны с его зависимостью от туризма. Быстрый рост населения и экономики начался в 1978 году, поскольку острова стали всемирно известным туристическим направлением. Сейчас на островах функционирует в общей сложности 376 км наземных маршрутов, из них 82 км находятся в населенных пунктах, 294 — на остальной территории.

Из-за высоких транспортных расходов стоимость жизни здесь на 30% выше, чем в остальной части страны, что приводит к иммиграции, стремительной дифференциации доходов населения и несправедливому распределению выгод в местном сообществе [3]. Начиная с 2010 года среди видов экономической деятельности на первое место вышли оптовая и розничная торговля.

Отмечается рост городов, который ведет к загрязнению окружающей среды и снижению естественного видового разнообразия. Урбанизация

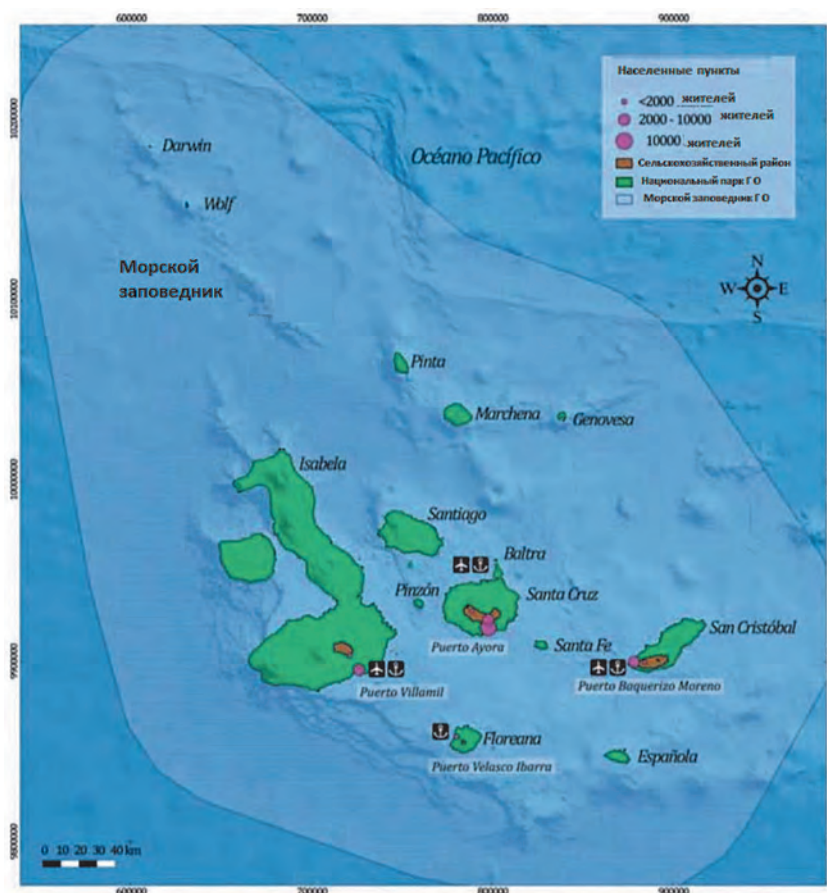


Рис. 3. Охраняемые районы Галапагосских островов: национальный парк и морской заповедник
Fig. 3. Protected areas of the Galapagos Islands: national Park and marine reserve

поглощает дополнительные земельные и водные ресурсы, требует развития транспортной инфраструктуры, увеличения числа рабочих мест в промышленности и других сферах экономической жизни.

Социально-экономическое развитие Галапагосских островов в XX—XXI вв. привело к значительной деградации окружающей среды, загрязнению вод и почв, быстрому распространению инвазивных видов и утрате местных видов флоры и фауны.

К числу наиболее значимых для природы Галапагосских островов экологических и социально-экономических проблем относятся:

1. Загрязнение вод Мирового океана микропластиком (продуктом распада пластика под влиянием ультрафиолетового излучения, агрессивных свойств морской воды и постоянного физического износа при контакте с волнами и ветром).

2. Увеличение туристического потока (в 2019 году, предшествующем пандемии COVID-19, на Галапагосские острова въехало 271 238 туристов, в том числе 60% из-за рубежа) и отходов круизного туризма:

один круизный лайнер потребляет количество топлива, эквивалентное его потреблению 12 тысячами автомобилей. Кроме того, для снижения затрат на освещение этих плавучих городов, кондиционирование воздуха, переработки отходов используется преимущественно топливо низкого качества, которое в 50 раз токсичнее обычного [3].

3. Медленное развитие муниципального управления твердыми отходами на Галапагосских островах (сбор отходов для утилизации и переработки практически отсутствует).

4. Преимущественное потребление дизельного топлива для выработки 79% электроэнергии (3 137 778 галлонов ежегодно) и слабое использование возобновляемых источников энергии (21%): ветра, солнечной энергии, масел растительного происхождения.

5. Фрагментация среды обитания, ухудшение качества вод и чрезмерная эксплуатация водных источников.

6. Активный рыбный промысел — он насчитывает 68 видов с преобладанием трески. В 1940-х годах

Таблица 1. Воздействие на компоненты природы
Table 1. Effects on the components of nature

Компоненты	Негативные последствия	Причина
Воды	Загрязнение водоносных горизонтов. Загрязнение поверхностных вод. Загрязнение прибрежных вод	Фильтраты, сбросы, аварийные разливы. Пестициды, удобрения, сбросы сточных вод и других отходов
Недра	Добыча горных пород. Извлечение пирокластов. Добыча пляжного песка. Удаление лавовой корки	Карьеры и отвалы. Строительство дорог и зданий
Воздух	Воздействие минимальное	Воздействие минимальное
Почвы	Потери от эрозии. Физико-химические изменения	Чрезмерный выпас скота. Выращивание культур, внесение удобрений и средств защиты растений
Местная флора	Перемещение видов. Подавление видов. Новые болезни	Интродуцированные виды и патогенные микроорганизмы. Вытеснение местных видов. Заготовка древесины
Местная фауна	Перемещение видов. Хищническое истребление. Интоксикация. Болезни	Завезенные животные и патогенные микроорганизмы. Охота, рыболовство. Туризм. Вытеснение местных видов
Морская биота	Интоксикация. Добыча / гидроразрыв пласта	Чрезмерный вылов рыбы. Коллекционирование, использование для изготовления сувениров ручной работы

промысел трески и других видов рыбы начал укрепляться благодаря созданию военно-морской базы США на острове Балтра и спросу со стороны материковой части Эквадора. В 1990-е годы был зафиксирован значительный рост улова белой рыбы. Наличие холодильного оборудования, рост населения, развитие туризма привели к чрезмерному вылову трески. Из пелагических рыб в открытом море в основном ловятся желтоперый и большеглазый тунец. Этот промысел начался на Галапагосских островах с участием международных промышленных судов в 1930-х годах, а в 1970 году к этому промыслу присоединился эквадорский промысловый флот. В настоящее время вылавливается в пять раз больше альбакора, чем в начале 2000-х годов, но в исследованиях отмечается, что альбакор, большеглазый тунец и рыба-меч не подвергаются чрезмерной эксплуатации. С момента создания RMG в 1998 году промышленный промысел на Галапагосских островах был запрещен, и с тех пор местные рыбаки занимаются ловлей рыбы в открытом море кустарным способом.

7. Добыча морских огурцов ничем не регулируется. В результате отсутствия контроля в 1994 году было добыто от 8 до 12 миллионов огурцов, что привело к закрытию этого промысла

в период с 1995 по 1998 год. Промысел был возобновлен в 1999 году, но до сих пор этот ресурс объявлен чрезмерно эксплуатируемым.

8. В период с 1960 по 1970 год на Галапагосских островах наблюдалась активная эксплуатация популяций колючих лобстеров промышленными судами с материковой части Эквадора в экспортных целях. Начиная с 1995 года показатели промысла колючих лобстеров снижались, и в 2010 году они считались чрезмерно эксплуатируемыми.

9. Промысел креветок на Галапагосских островах тесно связан с промыслом лобстеров и ежегодно растет из-за увеличения турпотока. В последние годы наблюдается рост мониторинговых исследований, направленных на другие прибрежные виды, но необходимо знать популяционный статус креветок, осьминогов, чуро, канчалагуа и других видов.

10. Широкое распространение инвазивных видов на Галапагосских островах и в пределах морской акватории привело к ежегодному повышению уровня интродукции (табл. 2), и нет никаких предпосылок к его снижению.

Для анализа способов минимизации негативных последствий они были разделены на три категории: экологические, социальные и экономические. Были также рассмотрены пять целей развития

Таблица 2. Количество интродуцированных видов (Галапагосские острова)
Table 2. Number of introduced species (Galapagos Islands)

Годы	Растения	Птицы	Рептилии	Звери	Амфибии	Рыбы	Насекомые	Другие
1900	-	1	1	7	0	0	-	-
1970	+100	5	3	7	0	0	>100	-
1990	+400	6	4	7	0	1	>300	-
2015	+800	5	4	7	1	2	490	53

и меры по их практической реализации, предлагаемые в «Стратегическом плане сохранения окружающей среды Галапагосских островов».

В ходе анализа было выявлено, что разработанные предложения не соответствуют нынешним условиям, и необходимо превратить перечень действий в логическую цепочку наиболее важных мер. Было предложено строить деятельность по минимизации негативных последствий с учетом природного потенциала Галапагосских островов — их уникального биоразнообразия и высокого эндемизма. При этом утрату биоразнообразия и замену эндемиков инвазивными видами следует рассматривать как главную угрозу эффективному управлению территорией и туризму как движущей силе развития экономики региона.

Таким образом, модель комплексного управления Галапагосскими островами должна быть направлена на сохранение биоразнообразия, а также обеспечение экологической и социально-экономической устойчивости. Для этого требуется проведение прикладных научных исследований и организация системы экологического мониторинга, внедрение новых ресурсосберегающих технологий, подготовка образовательных программ для всех категорий населения, укрепление культуры предпринимательства в ремесленном, сельскохозяйственном и рыболовном секторах, содействие диверсификации туристической отрасли, оптимизация системы воздушного, наземного и морского транспорта, расширение использования информационных технологий.

Правовые документы по организации экологического мониторинга в Эквадоре основаны на Конституции Республики 2008 года и координируются Министерством окружающей среды [2]. Они предусматривают сбор данных о состоянии недр, атмосферного воздуха, вод суши и морских акваторий, почв и биоразнообразия, однако они не предусматривают обобщения собранных данных и выполняются под конкретный проект для компаний, в рамках которого требуется план экологического менеджмента [5].

Национальная система экологического мониторинга Эквадора не распространяется на охраняемые природные территории, поэтому в каждой из них проводятся различные мониторинговые исследования, результаты которых невозможно сопоставить между собой [1]. Это отчетливо видно на примере охраняемых природных территорий Галапагосских островов:

1. Галапагосский национальный парк — первый объект, организованный на архипелаге в 1959 году и внесенный в список Всемирного наследия ЮНЕСКО в 1978 году [4]. Его площадь составляет 7970 км², здесь встречается более 45 видов птиц, 42 вида рептилий, 15 видов млекопитающих, 79 видов рыб, более 500 видов сосудистых растений. Уникальными видами национального парка Галапагосских островов являются гигантские черепахи.

2. Галапагосский морской заповедник — один из 10 крупнейших в мире и лучших для подводного плавания, его площадь составляет 138 тысяч км² (40 морских миль от береговой линии островов), здесь встречается более 2900 видов флоры и фауны, из которых 25% морских организмов являются эндемичными [3]. Здесь обитает 24 вида морских млекопитающих (киты, дельфины, морские коты). В 2001 году ЮНЕСКО признало огромную экологическую, культурную и экономическую ценность заповедника и также включило его в список Всемирного природного наследия.

Нормальное состояние популяций многих обитателей Галапагосских островов и прибрежной морской зоны невозможно без специальной защиты, поскольку жизнь многих эндемичных видов одновременно связана с сушей и морем. В связи с этим на протяжении нескольких десятилетий в охраняемых природных районах проводилось изучение состояния популяций, были получены количественные данные о составе биоты, ее пространственном распределении и динамике, а также некоторые сведения о влиянии природных и антропогенных факторов. Долгосрочный характер программы позволил выявить закономерности

и процессы, имеющие фундаментальное значение для прибрежно-морских экосистем [3].

Проведенный анализ указывает на необходимость разработки Единой программы экологического мониторинга для двух охраняемых природных районов Галапагосских островов. В нее рекомендовано включить систему стационарных наблюдений, обеспечивающих сбор данных для оценки воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду, на экосистемы и входящие в них редкие, эндемичные и инвазивные виды, а также для оценки состояния экономических и социально-культурных факторов (рис. 4).

Заключение

Галапагосские острова обладают уникальным природным потенциалом, который в значительной мере изменен хозяйственной деятельностью человека за последние 500 лет. Современное состояние окружающей среды отражает кумулятивный эффект различных этапов природопользования.

Рост населения архипелага и хозяйственная деятельность привели к существенной деградации

окружающей среды. В исторической ретроспективе максимальный ущерб нанесли: интродукция домашних животных и культурных растений, которая привела к их неконтролируемому распространению по архипелагу и утрате местных видов, охота на морских животных, рыболовство, развитие промышленности и сельского хозяйства, расширение строительства и транспорта, отсутствие системы утилизации и переработки мусора.

В настоящее время особое значение для Галапагосских островов имеют видовое богатство и эндемизм фауны и флоры. Они ежегодно привлекают сюда туристов, количество которых в 6 раз превышает численность местного населения. В связи с этим туризм для архипелага одновременно представляет основную угрозу сохранения биоразнообразия и главную движущую силу социально-экономического развития региона.

Благодаря созданию национального парка на 97,5% территории Галапагосских островов и морского заповедника в окружающей их 40-мильной зоне были сохранены редкие виды и сообщества (наземные, прибрежные и морские), однако все они крайне уязвимы, требуют особого изучения и охраны.



Рис 4. Единая программа экологического мониторинга для двух охраняемых природных территорий Галапагосских островов

Fig. 4. Unified environmental monitoring program for two protected natural areas of the Galapagos Islands

Систематические мониторинговые исследования на Галапагосских островах проводятся для некоторых видов животных: черепах, акул и китообразных. Все остальные виды, состояние компонентов природы и экосистем практически не оцениваются.

Для совершенствования системы экологического мониторинга на Галапагосских островах и в пределах других охраняемых территорий Эквадора целесообразно использовать российский опыт (например, программу «Летопись при-

роды»), а также включить в программы мониторинга большее количество видов и показателей состояния среды их обитания.

Особое значение имеет своевременное выявление угроз и определение мер по их предотвращению. Следует также координировать мониторинговые исследования с региональными планами природоохранной деятельности, развития туризма, промышленности и сельского хозяйства для эффективного решения задач социально-экономического развития территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Росеро М., Хлебосолова О.А. Система охраняемых природных районов Эквадора и перспективы ее устойчивого развития на примере Галапагосских островов // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий. Т. 9: Сб. статей IX Всеросс. (национ.) науч.-практич. конф. (6—8 октября 2022, Сочи). Сочи: ГКУ КК «Природный орнитологический парк в Имеретинской низменности», Донской издательский центр, 2022. С. 347—354. ISBN 978-5-6047416-6-5
2. Constitución de la república del Ecuador. Режим доступа: https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf (дата обращения 07.02.2022).
3. Fundación Charles Darwin, Monitoreo Ecológico Marino Submareal de la Reserva Marina de Galápagos (RMG). Режим доступа: <https://www.darwinfoundation.org> (дата обращения 14.02.2022).
4. Historia de la conservación ambiental en Ecuador. Режим доступа: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/57175.pdf> (дата обращения 07.02.2022).
5. Libro de Indicadores Nacionales Ecuador. Режим доступа: <https://condesan.org/wp-content/uploads/2018/10/LIBRO-INDICADORES-NACIONALES-BD-ECUADOR.pdf> (дата обращения 07.02.2022).

REFERENCES

1. Rosero M., Khlebosolova O.A. The system of protected natural areas of Ecuador and the prospects for its sustainable development on the example of the Galapagos Islands // Sustainable development of specially protected natural areas. Volume 9: Collection of articles of the IX All-Russian (national) scientific and practical conference (October 6—8, 2022, Sochi). Sochi: GКУ КК "Natural Ornithological Park in the Imeretinskaya Lowland", Donskoy Publishing Center, 2022. P. 347—354. ISBN 978-5-6047416-6-5
2. Constitución de la república del Ecuador. URL: https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf (date 07.02.2022).
3. Fundación Charles Darwin, Monitoreo Ecológico Marino Submareal de la Reserva Marina de Galápagos (RMG). URL: <https://www.darwinfoundation.org> (date 14.02.2022).
4. Historia de la conservación ambiental en Ecuador. URL: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/57175.pdf> (date 07.02.2022).
5. Libro de Indicadores Nacionales Ecuador. URL: <https://condesan.org/wp-content/uploads/2018/10/LIBRO-INDICADORES-NACIONALES-BD-ECUADOR.pdf> (date 07.02.2022).

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Росеро Вальехо М.Л. — собрала данные, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Хлебосолова О.А. — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Mary Lourdes Rosero Vallejo — collected data, prepared the text of the article, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

Olga A. Khlebosolova — developed the article concept, prepared the text, approved the final version of the article and accepted the responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Росеро Вальехо Мэри Лурдес* — аспирант кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: luurosv@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7625-6799>

Хлебосолова Ольга Анатольевна — профессор кафедры экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе». 23, Миклухо-Маклая ул., г. Москва 117997, Россия
e-mail: hlebosolovaoa@mgri.ru
SPIN-код: 9941-1560
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7531-1543>

Mary Lourdes Rosero Vallejo* — Postgraduate student of the Department of Ecology and Environmental Management of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23 Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
e-mail: luurosv@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7625-6799>

Olga A. Khlebosolova — Professor of the Department of Ecology and Environmental Management of Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting. 23 Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia
E-mail: hlebosolovaoa@mgri.ru
SPIN code: 9941-1560
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7531-1543>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

КЕРИМОВ ВАГИФ ЮНУС ОГЛЫ

(К 75-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ)

5 июля 2024 г. исполнилось 75 лет со дня рождения Вагифа Юнус оглы Керимова, одного из ведущих ученых в области геологии, поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений, доктора геолого-минералогических наук, профессора, заслуженного геолога Российской Федерации.

Более 50 лет Вагиф Керимов посвящает себя научно-педагогической деятельности, им подготовлено 42 кандидата наук и более тысячи высококвалифицированных специалистов для геологической отрасли страны. Под его руководством проводится оценка перспектив нефтегазоносности и ресурсного потенциала осадочных бассейнов, создание новых интегрированных технологий освоения месторождений углеводородов. Разработанные им цифровые технологии, методы численного моделирования поисков, разведки и добычи углеводородного сырья позволяют наряду с графическим представлением моделей минимизировать геологические и технологические риски, оптимизировать результаты геолого-разведочных работ, повысить эффективность поисков, разведки и добычи углеводородного сырья.

За В.Ю. Керимовым — ряд ответственных должностей в вузах Советского Союза и Российской Федерации: заведующий кафедрой геологии и разведки нефтяных и газовых месторождений и декан геолого-разведочного факультета Азербайджанского института нефти и химии имени М. Азизбекова (1987—1994 гг.), заведующий кафедрой теоретических основ поисков и разведки нефти и газа Губкинского университета (2009—2018 гг.), проректор по научной работе МГРИ (2018—2020 гг.), заведующий кафедрой геологии и разведки месторождений углеводородов МГРИ (2017 — настоящее время).

В 2021—2024 гг. В.Ю. Керимов являлся членом общественного совета при Министерстве энергетики РФ, а с 2024 года вошел в состав общественного



совета при Федеральном агентстве по недропользованию (Роснедра).

За успехи в трудовой, научно-педагогической деятельности В.Ю. Керимов награжден как различными государственными наградами: орденом Трудового Красного Знамени, почетным званием «Заслуженный геолог РФ», Почетной грамотой президента РФ, так и ведомственными знаками отличия: «Почетный разведчик недр» Минприроды России, «Почетный работник науки и высоких технологий РФ» Минобрнауки России и т.д.

В.Ю. Керимов проводит большую работу по укреплению международных связей со странами СНГ, Социалистической Республикой Вьетнам и африканскими странами в сфере науки, образования и подготовки кадров. В 2016 году его заслуги в указанной деятельности были отмечены государственной наградой Социалистической Республики Вьетнам — медалью Дружбы.

От всей души сердечно поздравляем Вагифа Юнусовича с 75-м днем рождения. Желаем всего самого наилучшего, бодрости духа, крепкого здоровья, долголетия, воплощения замечательных идей и новых свершений на благо отечественной науки и образования!

*Коллектив МГРИ
Нефтегазовый факультет
Кафедра геологии и разведки месторождений
углеводородов
Редколлегия журнала*

