

Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 4

ГЕОЛОГИЯ

ТОМ 64 • № 2 • 2025 • МАРТ– АПРЕЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Дергачев А.Л., Шемякина Е.М., Дьяконов В.В.</i> Естественные ограничения на использование редких элементов в технологиях фотовольтаики	3
<i>Силантьев В.В., Куликова А.В., Новиков И.В., Фелькер А.С., Мифтахутдинова Д.Н., Габдуллин Р.Р., Ахмеденов К.М., Якупова Д.Б., Нуриева Е.М., Саетгалеева Я.Я.</i> Возраст тетраподной фауны « <i>Mastodonsaurus</i> » (средний триас) Восточно-Европейской платформы: первые данные радиоизотопного U-Pb LA-ICPMS датирования. Статья 1. Литологическая характеристика и условия формирования	19
<i>Иванов А.В., Габдуллин Р.Р., Сенников А.Г., Бакаев А.С., Новиков И.В., Маленкина С.Ю., Бадулина Н.В., Мигранов И.Р., Яковишина Е.В., Струлев С.А., Беспалько Н.Е.</i> Палеоэкологические и палеогеографические реконструкции условий формирования позднемеловых осадков Ульяновско-Саратовского прогиба, содержащих ядра нор червей-полихет	33
<i>Данченко Е.А., Бычков А.Ю., Хилимонюк В.З., Сафронов Е.В., Чеверев В.Г.</i> Поведение растворенных металлов при утилизации отходов буровых растворов в зоне распространения многолетнемерзлых пород	51
<i>Микляева Е.П., Бычков А.Ю., Николаева И.Ю., Тарнопольская М.Е., Минервина Е.А.</i> Геохимия циркония в позднемагматическом процессе в ультрамафит-мафитовых интрузивах на примере Кивакского расслоенного массива (Северная Карелия)	57
<i>Тюкавкина О.В., Шелепов В.В., Шустер В.Л., Капитонова И.Л.</i> Результаты геолого-промышленного моделирования низкопроницаемых коллекторов на примере месторождений широтного Приобья	65
<i>Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С., Гилязетдинов Р.А., Рамазанов Р.Г., Реймерс А.Н., Шарипов Ф.А.</i> Комплексная оценка результативности закачки нефтекислотных эмульсий в условиях сложнопостроенных залежей нефти черепетского и кизеловского горизонтов Южно-Татарского свода	72
<i>Исаев Е.С., Сауткин Р.С., Воронин М.Е., Верещагин А.А.</i> Стадийность формирования залежи ботубобинского горизонта Среднеботубобинского месторождения	80
<i>Большаков И.Е., Никулина М.А., Бычков А.Ю., Ермолинский А.Б.</i> Изменение состава, строения и свойств андезибазальтов в условиях моделируемого сернокислотного выщелачивания	87
<i>Булах М.О., Пеков И.В., Щербаков В.Д., Вигасина М.Ф., Карпов А.О., Чуканов Н.В.</i> Новые данные о минералах группы гельвина: изоморфные замещения, форма нахождения серы, КР-спектроскопия	94
<i>Ампилов Ю.П., Сафуанова К.Р., Штейн Я.И.</i> Сопоставление методов количественного атрибутного анализа для прогноза толщин коллекторов по сейсмическим данным	106
<i>Дернова А.С., Ошкин А.Н., Пирогова А.С.</i> Результаты ультразвуковых измерений скоростей продольных и поперечных волн на морских слабо консолидированных осадках Белого моря	113
<i>Милентьева Е.А., Баранцев А.А., Оболенская А.А., Гриневский А.С.</i> Разработка методики интерпретационного сопровождения обработки сейсмических данных в Западной Сибири с целью улучшения качества прогноза русел	117
<i>Милентьева Е.А., Верещакин Р.О., Ломакина А.С., Оболенская А.А.</i> Оценка неопределенностей структурных построений в случае отсутствия скважин на территории Каспийского моря	126
<i>Яковишин С.Ю., Бордунов С.И., Яковишина Е.В., Фокин П.А.</i> Условия формирования отложений Северо-Западного Кавказа на рубеже юры и мела	134
<i>Савенко А.В., Савенко В.С.</i> Фтор в поверхностных и пресных подземных водах Архангельской области	145

CONTENTS

<i>Dergachev A.L., Shemyakina E.M., Dyakonov V.V.</i> Natural constraints on use of rare elements in photovoltaic technologies	3
<i>Silantiev V.V., Kulikova A.V., Novikov I.V., Felker A.S., Miftakhutdinova D.N., Gabdullin R.R., Akhmedenov K.M., Yakupova J.B., Nurieva E.M., Saetgaleeva Ya. Ya.</i> The Age of the Tetrapod Fauna “ <i>Mastodonsaurus</i> ” (Middle Triassic) of the East European Platform: First U-Pb LA-ICPMS Radioisotopic Dating Results. Article 1. Lithological Characteristics and Depositional Environment	19
<i>Ivanov A.V., Gabdullin R.R., Sennikov A.G., Bakaev A.S., Novikov I.V., Malenkina S.Yu., Badulina N.V., Migranov I.R., Yakovishina E.V., Strulev S.A., Bepalko N.E.</i> Palaeoecological and palaeogeographical reconstructions of formational conditions for Late Cretaceous sediments of Ulyanovsk-Saratov foredeep, comprising finds of the burrows of the polychaete worms	33
<i>Danchenko E.A., Bychkov A.Yu., Khilimonyuk V.Z., Safronov E.V., Cheverev V.G.</i> Behavior of dissolved metals in the disposal of drilling mud waste in the permafrost zone	51
<i>Miklyaeva E.P., Bychkov A.Yu., Nikolayeva I.Yu., Tarnopolskaya M.E., Minervina E.A.</i> Zirconium geochemistry in the late magmatic process in ultramafic-mafic intrusions on the example of the Kivakka layered massif (North Karelia)	57
<i>Tyukavkina O.V., Shelepov V.V., Shuster V.L., Kapitonova I.L.</i> The results of geological modeling of low-permeability reservoirs on the example of deposits of the Ob River Region	65
<i>Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Gilyazetdinov R.A., Ramazanov R.G., Reimers A.N., Sharipov F.A.</i> Comprehensive assessment of the effectiveness of injection of petroleum acid emulsions in the conditions of complex oil deposits of the Cherepetsky and Kizel horizons of the South Tatar arch	72
<i>Isaev E.S., Sautkin R.S., Voronin M.E., Vereshchagin A.A.</i> The stage of formation of the deposits of the botuobinsky horizon of the srednebotuobinsky field	80
<i>Bolshakov I.E., Nikulina M.A., Bychkov A.Yu., Ermolinsky A.B.</i> Changes in the composition, structure and properties of andesite-basalt under conditions of simulated sulfuric acid leaching	87
<i>Bulakh M.O., Pekov I.V., Shcherbakov V.D., Vigasina M.F., Karpov A.O., Chukanov N.V.</i> New data on helvine-group minerals: Isomorphous substitutions, the form of sulfur, Raman spectroscopy ..	94
<i>Ampilov Yu.P., Safuanova K.R., Shtein Ya.I.</i> Comparison of quantitative attribute analysis methods for forecasting reservoir thicknesses based on seismic data	106
<i>Dernova A.S., Oshkin A.N., Pirogova A.S.</i> The results of ultrasonic measurements of compressional and shear wave velocities in poorly consolidated marine sediments of the White Sea	113
<i>Milenteva E.A., Barantsev A.A., Obolenskaya A.A., Grinevskiy A.S.</i> Improvement of a methodology for interpretative control of seismic data processing in Western Siberia in order to improve the quality of riverbed forecasting	117
<i>Milenteva E.A., Vereshchakin R.O., Lomakina A.S., Obolenskaya A.A.</i> Estimation of the uncertainties of structural imaging in the absence of wells in the Caspian Sea	126
<i>Yakovishin S.Yu., Bordunov S.I., Yakovishina E.V., Fokin P.A.</i> Conditions of formation of the deposits of the Northwestern Caucasus on the boundary of the Jurassic and Cretaceous	134
<i>Savenko A.V., Savenko V.S.</i> Fluorine in surface and fresh groundwater of the Arkhangelsk Region ..	145

УДК 553.04

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-3-18

ЕСТЕСТВЕННЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ ФОТОВОЛЬТАИКИ

Александр Лукич Дергачев¹, Елизавета Михайловна Шемякина²,
Виктор Васильевич Дьяконов³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alderg51@yandex.ru

² Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия; shemyakina_em@pfur.ru

³ Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Россия; mdf.rudn@mail.ru

Аннотация. За последние годы в связи с дискуссиями об изменении климата и более чистых энергетических технологиях появились несколько сценариев электрогенерации в будущем. Все они предусматривают важную роль технологий фотовольтаики. Однако эти технологии являются более материалоемкими, чем традиционные методы электрогенерации. Беспокойство вызывает наличие достаточного количества редких элементов: In, Te, Se, Cd, Ge, Ga, которые критически необходимы для широкомасштабного внедрения новых технологий. Эти элементы извлекаются, в основном, попутно из руд меди, цинка и бокситов. В настоящей работе исследуются возможные естественные ограничения на их использование, вызванные влиянием растущего спроса на попутно извлекаемые редкие элементы на рынок главных металлов.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, технологии фотовольтаики, критическое минеральное сырье, попутные металлы, главные металлы

Для цитирования: Дергачев А.Л., Шемякина Е.М., Дьяконов В.В. Естественные ограничения на использование редких элементов в технологиях фотовольтаики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 3–18.

NATURAL CONSTRAINTS ON USE OF RARE ELEMENTS IN PHOTOVOLTAIC TECHNOLOGIES

Aleksander L. Dergachev¹, Elizaveta M. Shemyakina², Viktor V. Dyakonov³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alderg51@yandex.ru

² RUDN University, Moscow, Russia; shemyakina_em@pfur.ru

³ Sergo Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University, Moscow, Russia; mdf.rudn@mail.ru

Abstract. In response to the ongoing debate on climate change and cleaner power technologies several scenarios for the future electricity generation have been recently proposed. All of them include a substantial share of photovoltaic solar technologies. However these technologies are more material intensive than traditional methods of power generation. There is a growing concern about availability of critical metals including In, Te, Se, Cd, Ge, Ga required for the large scale implementation of new technologies. These elements are companion metals recovered mainly from copper and zinc ores and bauxite. In this paper possible natural constraints on use of rare elements resulted from impact of increasing demand for companion metals on the supply of host metals are examined.

Keywords: renewable energy sources, photovoltaic technologies, critical mineral materials, companion metals, host metals

For citation: Dergachev A.L., Shemyakina E.M., Dyakonov V.V. Natural constraints on use of rare elements in photovoltaic technologies. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 3–18. (In Russ.).

Введение. Все известные сценарии реализации Парижского соглашения по климату предусматривают переход к низкоуглеродной электроэнергетике, ускоренное внедрение систем ветровой и солнечной электрогенерации, накопления и хранения электроэнергии, а также рост численности гибридных и электромобилей.

Низкоуглеродные технологии, в том числе и солнечная электрогенерация, являются более материалоемкими по сравнению с традиционными, и их повсеместное распространение неизбежно повлечет перестройку сырьевых потоков, создаст дополни-

тельную нагрузку на мировые запасы минерального сырья, мощности по его добыче и производству высокочистых минеральных материалов.

Конечно, дополнительное потребление минерального сырья в технологиях «зеленой энергетики» в значительной степени будет обусловлено возрастающим применением широко распространенных конструкционных материалов, таких как цемент и некоторые металлы. Так, чугун и сталь, алюминий, а также марганец, хром, медь, свинец, цинк и другие, уже сейчас производятся в мире в больших количествах. Хотя связанное с энергетическим переходом

дополнительное потребление некоторых из перечисленных металлов будет измеряться десятками и сотнями миллионов тонн, доля низкоуглеродных технологий в их глобальном потреблении будет оставаться сравнительно низкой. Поэтому дополнительный спрос, возникающий в новой области применения, может относительно просто удовлетворяться за счет перераспределения потребления между традиционными областями использования этих металлов.

Однако небольшая часть дополнительного потребления минеральных материалов приходится на редкие элементы, которые, хотя и имели в последние десятилетия разнообразные области применения, до 2020 г. производились в крайне незначительных объемах. Найдется не много таких примеров, когда реализация планов развития мировой электроэнергетики, а значит, и мировой экономики в целом, в исторически кратчайшие сроки оказывалась бы в столь сильной зависимости от непрерывности поставок нескольких металлов, глобальное производство которых измерялось бы десятками или несколькими сотнями тонн в год. Целый ряд из них благодаря уникальным свойствам этих элементов или их соединений критически важны для технологий энергетического перехода и не имеют равноценных заменителей, но пользуются весьма ограниченным распространением в природе и с трудом поддаются повторному использованию после утилизации отслуживших положенный срок изделий. Не смотря на это долговременные сценарии развития энергетики, которые представлены Международным энергетическим агентством (МЭА) и различными исследовательскими группами, практически не рассматривают последствия значительного роста спроса на минеральные материалы, сопряженные с переходом к низкоуглеродной энергетике. Между тем при проявлении в будущем факторов, ограничивающих предложение этих материалов, успех реализации энергетических сценариев может оказаться под вопросом, и это немедленно окажет негативный эффект на развитие всех секторов экономики.

В публикациях последнего времени, в том числе в более ранних работах авторов, было продемонстрировано критически важное значение некоторых из этих металлов для новых энергетических технологий и были проанализированы разнообразные риски, связанные с неравномерным распределением их запасов между странами и крайне высокой концентрацией их рудничного и (или) металлургического производства [Дергачев, Шемякина, 2023].

В целом ряде работ рассматривались риски, связанные с обеспечением будущей «зеленой» энергетики достаточным количеством таких остро необходимых для нее минеральных материалов, как Co, Ni, Al, Cu, Mo, Li, P3Э, Ag, Ga, Ge, In, Cd, Se, Te и других элементов ([Buchert et al., 2009; US DOE, 2011; Graedel et al., 2012; Goe, Gaustad, 2014; Grandell, Thorenz, 2014] и др.). В более ранних работах

авторов с использованием компьютерной модели было показано, в частности, что суммарный дополнительный спрос на Dy, Co, In, Cd, Ge, Te, Se, Ga в технологиях энергетического перехода, определенный для сценария МЭА 2DS, в 2021–2050 гг. составит существенную часть, а для некоторых критических элементов (In, Te, Ge) многократно превзойдет их мировые запасы, которые могли бы быть извлечены в металлургическую продукцию при современных технологиях [Дергачев, Шемякина, 2024].

Наличие достаточной минерально-сырьевой базы критических металлов и минералов является только одним из условий успешного перехода к низкоуглеродной энергетике. Другой важный аспект составляют требования к горно-металлургическому комплексу, в задачу которого входит непосредственно обеспечивать добычу, обогащение и переработку необходимых полезных ископаемых в требуемом количестве. Поэтому важно оценить возможность при нынешнем уровне развития горных и металлургических технологий обеспечить необходимый масштаб добычи критических металлов без разбалансирования рынка, падения цен на важнейшие минеральные материалы, сокращения их промышленных запасов и иных негативных последствий.

Целью настоящей публикации является прежде всего выяснить, в какой степени существующий горно-металлургический комплекс способен обеспечить добычу критически важных для фотовольтаики элементов в количестве, достаточном для реализации сценария МЭА 2DS в части развития технологий солнечной электрогенерации, а также оценить возможное влияние роста потребления этих элементов на рыночное предложение других минеральных материалов.

Методика исследований. Типы солнечных панелей и минеральные материалы для них. Согласно сценарию МЭА 2DS, доля солнечных электростанций в глобальной установленной мощности электрогенерации к 2050 г. составит примерно 32 %, т. е. возрастет в 4,4 раза по сравнению с 2020 г. [IEA, 2016, 2017; World Bank, 2020]. Хотя существуют разнообразные способы превращения солнечной энергии в электрическую, среди них решающую роль в удовлетворении растущей потребности человечества в электроэнергии, по-видимому, будут играть технологии фотовольтаики. При этом считается, что тяжелые, громоздкие солнечные панели на основе кристаллического кремния (c-Si), эффективность которых значительно снижается со временем в течение срока эксплуатации (примерно 30 лет), будут вытесняться уже имеющимися на рынке тонкопленочными солнечными панелями. Они являются более легкими и гибкими, удобными в эксплуатации, дешевыми и достаточно эффективными. В них используются современные полупроводниковые материалы, такие как теллурид кадмия (CdTe), диселенид меди-индия-галлия (CIGS), аморфный кремний

с изовалентной примесью германия (a-SiGe). Во всех этих субтехнологиях фотовольтаики в значительных количествах используются сталь, Al, Cu, Sn, а также Pb (солнечные панели типа c-Si), Zn и Mo (CIGS). Если в традиционных панелях типа c-Si в качестве проводника применяется Ag, то для производства тонкопленочных панелей наряду с широко распространенной медью используются редкие элементы: In, Ga, Se, Cd, Te и Ge.

В базовом варианте расчетов на основе разработанной авторами компьютерной модели предусмотрен опережающий рост в 2021–2050 гг. наиболее перспективных, тонкопленочных субтехнологий фотовольтаики [Дергачев, Шемякина, 2024] с темпом 14,2 % в год по сравнению с 3,5 % в год для традиционных солнечных панелей на основе кристаллического кремния. Благодаря этому доля панелей типа c-Si в суммарной установленной мощности солнечных электростанций снизится с 95 % в 2020 г. до 50 % в 2050 г., а остальная часть, как предполагается, будет распределяться между хорошо зарекомендовавшими себя тремя типами тонкопленочных солнечных панелей, причем доля каждого типа в 2050 г. составит около 631 ГВт, или 16,7 % установленной мощности электростанций на солнечных панелях по сравнению с 1,7 % в 2020 г.

Прогнозируемое потребление металлов. Фактическим материалом для дальнейшего анализа является прогнозируемый с использованием компьютерной модели спрос на цветные и редкие металлы в различных областях в период с 2021 по 2050 г.

Прогноз потребления цветных и редких металлов в каждой из субтехнологий фотовольтаики основывался на возрастании его пропорционально росту установленной мощности генерации солнечных панелей, в которых используются эти элементы. Потребление каждого из металлов в некоторый год и в той или иной из четырех субтехнологий солнечной электрогенерации рассчитывалось как производство годового прироста установленной мощности (ГВт) солнечных электростанций, где используется эта субтехнология, и удельного потребления этого металла в соответствующих солнечных панелях (тонны на 1 ГВт установленной мощности) [Дергачев, Шемякина, 2024]. Кумулятивный спрос на этот металл в определенной субтехнологии за весь 30-летний период реализации сценария МЭА 2DS получался путем суммирования значений годового спроса в период с 2021 по 2050 г.

Потребление цветного или редкого металла в фотовольтаике в целом в некоторый год рассчитывалось путем суммирования данных о спросе на этот металл в каждой из четырех субтехнологий в этот год. Результаты прогнозирования потребления важнейших цветных (Cu, Al, Zn, Pb, Sn) и редких элементов (In, Cd, Ge, Ga, Se, Te, Ag) в 2050 г. и суммарное потребление их за 30-летний период в каждой из субтехнологий солнечной электрогенерации приведены в табл. 1 и 2. Там же содержатся сведения о

спросе на металлы в целом при реализации сценария МЭА 2DS (то есть во всех технологиях солнечной и ветровой электрогенерации, системах накопления и хранения электроэнергии и электрическом транспорте), а также в традиционных областях применения этих элементов.

Прогноз потребления тех же металлов в традиционных областях основывался на предположении, что средние темпы его роста до 2050 г. (% в год) останутся такими же, как 2000–2012 гг., то есть до начала массового строительства солнечных электростанций.

Глобальное потребление каждого из металлов в экономике в целом рассчитывалось для каждого года путем суммирования его потребления в технологиях энергетического перехода (в том числе в солнечных панелях всех типов) и во всех остальных (традиционных) отраслях экономики.

Источники и получение редких элементов.

Элементы, играющие исключительно важную роль в наиболее перспективных технологиях фотовольтаики (Se, Te, Ga, Ge, Cd, In), по характеру распространения относятся к типичным рассеянными, а по содержанию в земной коре — к типичным редким элементам.

Эти элементы очень редко встречаются в природе. Как следует из диаграммы на рис. 1, Te наряду с Re пользуется наименьшим распространением среди 47 важнейших элементов, для которых имеются надежные сведения о масштабах их добычи и использования в экономике в 2020 г. (по данным [Mineral..., 2024]). Шесть элементов, критически важных для технологий фотовольтаики, вместе с благородными металлами (Au, Ag, Pt, Pd), а также Tl, Hg, Bi, Ta и Re образуют группу элементов, наименее распространенных в земной коре и добываемых (в том числе и по этой причине) в наименьших количествах.

В природе практически не встречаются месторождения, в которых содержания Se, Te, Ga, Ge, Cd, In были бы настолько высоки, чтобы их можно было считать главными полезными компонентами руд. Иными словами, эти элементы не образуют собственных месторождений. В частности, при нынешних ценах разработка месторождений с Te или Se как главными компонентами руд не рентабельна. В этом смысле китайское месторождение Дашуйгоу, руды которого содержат от 0,01 до 34,58 % Te, на данный момент является единственным открытым в мире собственно теллурическим месторождением [Yin, et al., 2024]. Как правило же, перечисленные элементы рассеяны в медных, свинцово-цинковых, оловянно-вольфрамовых рудах, а также в бокситах. В их составе они добываются из недр вместе с главными компонентами этих руд и извлекаются из них попутно преимущественно при металлургической переработке концентратов руд, главными полезными компонентами которых являются, в основном, Cu, Zn, а также при переработке руд Al (преимущественно бокситов) в глинозем (рис. 2).

Таблица 1

Потребление важнейших первичных цветных металлов в различных областях в 2050 г. и суммарное в 2021–2050 гг.

Области применения	Потребление металлов, млн т									
	Cu		Al		Zn		Sn		Pb	
	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего
Технологии энергетического перехода, в том числе технологии фотовольтаики	2,0	23,5	2,8	31,1	1,0	15,0	0,026	0,29	0,005	0,088
	1,5	14,1	2,3	23,1	0,002	0,019	0,026	0,29	0,005	0,088
Традиционные области применения: потребление темпы роста потребления в 2021–2050*	34,6	819,8	325,7	4994,2	20,3	488,3	0,4	10,3	8,2	185,2
	1,7 %		5,5 %		1,6 %		1,6 %		2,1 %	
Глобальное потребление (во всех отраслях)	36,6	843,3	328,5	5025,3	21,3	503,3	0,5	10,6	8,2	185,3

Примечание. * — проценты в год.

Таблица 2

Потребление редких металлов в субтехнологиях солнечной электрогенерации и в традиционных областях применения в 2050 г. и суммарное в 2021–2050 гг.

Типы солнечных панелей и средние темпы роста установленной мощности (% в год)	Установленная мощность генерации, ГВт				Потребление металлов, тыс. т													
	2020		2050		Ag		Ge		Cd		Te		In		Ga		Se	
	ГВт	%	ГВт	%	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего	2050	всего
Технологии фотовольтаики																		
c-Si (3,5 %)	674	95	1890	50	1,3	24,3												
a-SiGe (14,2 %)	11,8	1,7	631	16,7			2,3	17,8					0,4	3,2				
CIGS (14,2 %)	11,8	1,7	631	16,7					0,1	0,5	0,4	2,9	2,2	17,3	0,7	5,6	3,2	25,4
CdTe (14,2 %)	11,8	1,7	631	16,7					5,5	43,4	4,7	37,2	0,6	5,0				
Всего	709,4	100	3784	100	1,3	24,3	2,3	17,8	5,6	43,9	5,1	40,1	3,2	25,6	0,7	5,6	3,2	25,4
Традиционные области применения и средние темпы роста потребления (% в год)																		
					53,1	1152,3 (2,3 %)	0,4	6,8 (5,1 %)	32,6	863,3 (0,9 %)	2,3	35,3 (5,7 %)	4,4	68,7 (5,2 %)	1,0	17,5 (3,6 %)	7,8	159,8 (2,9 %)
Глобальное потребление																		
					54,4	1176,6	2,7	24,6	38,2	907,2	7,4	75,4	7,6	94,3	1,7	23,1	11,0	185,2

Попутные редкие элементы в рудах алюминия. Из руд алюминия, главным образом, из бокситов в настоящее время извлекается почти весь первичный Ga, близкий к Al по химическим свойствам. Поскольку стоимость галлия, заключенного в них, намного меньше, чем стоимость главного металла (алюминия), количество извлекаемого попутно Ga, в конечном счете, ограничивается количеством произведенного Al.

Бокситы содержат в среднем 0,005 % Ga (50 г/т), и даже самые богатые из них, добываемые в Суринаме, содержат лишь 0,008 % галлия. При переработке их в технический глинозем по способу Байера (автоклавное выщелачивание алюминия и кремнезема из бокситов горячими растворами NaOH под давлением) большая часть (70–80 %) Ga

в виде галлата натрия переходит в аллюминатные растворы, которые служат основным источником получения Ga, а остальная часть накапливается в шламе («красной глине»). При пропускании через растворы CO₂ из них выделяют сначала Al(OH)₃, а затем в смеси с ним в последней фракции осадка осаждается гидроксид галлия. Смесь далее растворяют в растворе гидроксида Na и электролизом получают технический галлий. Для получения Ga высокой чистоты (99,9999 % — 99,99999 %), пригодного для производства полупроводниковых соединений, используют кислотно-щелочную обработку, вакуумную плавку, электролитическое рафинирование, а с целью глубокой очистки — зонную плавку. Весь процесс является очень энергоемким и трудоемким, поэтому используется только в странах, где благо-

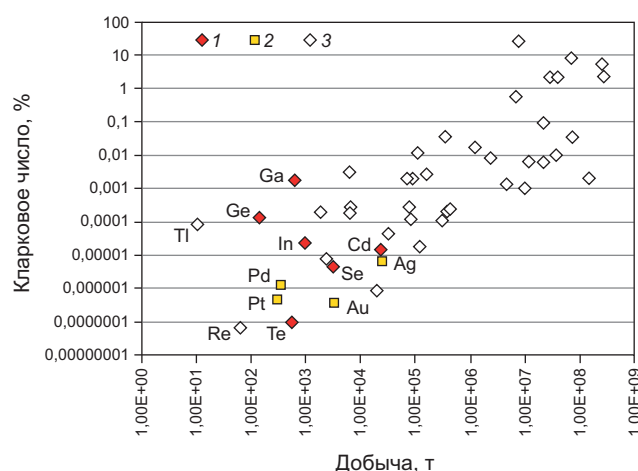


Рис. 1. Содержание элементов в земной коре по [Haynes et al., 2016] и масштабы их добычи по [Mineral..., 2024]: 1 — редкие рассеянные элементы, используемые в современных тонкопленочных солнечных панелях, 2 — благородные металлы, 3 — прочие элементы

даря дешевизне природных и трудовых ресурсов затраты на производство оказываются относительно низкими.

В настоящее время первичный Ga в очень небольших количествах получается еще из возгонов, образующихся в цинковом производстве при переработке хвостов выщелачивания цинковых огарков (попутно с Ge). Потенциально этот металл можно извлекать из угольной золы уноса (содержит от 0,01 до 0,1 % Ga), из «красной глины» или из пыли, выдуваемой из электрических печей при производстве фосфора. Однако в дальнейших расчетах мы будем исходить из предположения о получении 100 % Ga попутно при переработке бокситов в глинозем.

Попутные редкие элементы в цинковых рудах. Цинковые руды являются главными источниками In, Ge и Cd, которые не образуют собственных месторождений. Минералы этих элементов встречаются редко, и обычно они в качестве примесей входят в состав сульфидов, сульфосоей, оксидов цветных металлов на месторождениях разных типов.

Кадмий образует немногочисленные и весьма редко встречающиеся собственные минералы, но основная масса металла рассеяна в сульфидах Zn, Pb, Cu, Fe, Hg в рудах среднетемпературных свинцово-цинковых и медноколчеданных месторождений. Максимальные содержания Cd (мас.%) отмечаются в сфалерите (от 0,4–0,6 до 5), более низкие — в халькопирите (0,006–0,12); в виде примеси кадмий присутствует в станнине (0,003–0,2) и галените (0,005–0,02).

Небольшое количество этого металла извлекается из пыли свинцовых и медеплавильных заводов, но основная часть Cd попутно получается при переработке флотационных цинковых концентратов, содержащих обычно 0,3–0,5 % Cd. Извлечение металла из руд в концентрат составляет 90–98 %. Концентрат далее подвергается окислительному обжигу, затем огарок выщелачивается серной кислотой. Из раство-

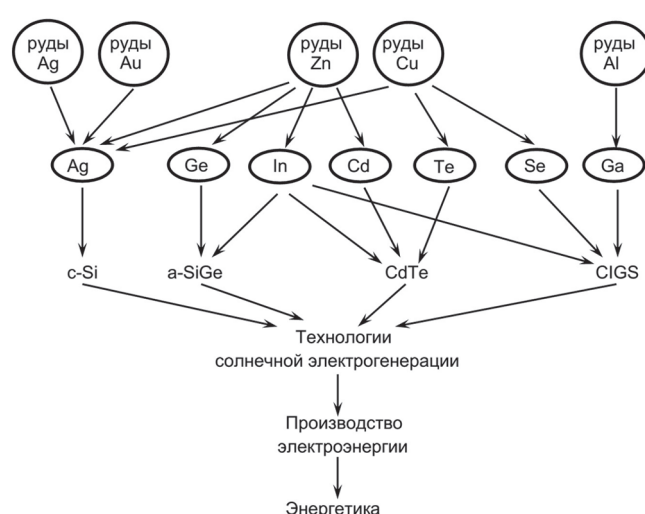


Рис. 2. Источники редких металлов для солнечных панелей различных типов

ра добавлением цинковой пыли осаждают сначала Cu, а затем Cd. Из очищенного раствора сульфата цинка электролизом получают металлический цинк. В дальнейшем Cd очищают от примесей цветных металлов и растворяют в серной кислоте. Товарный металлический Cd чистотой около 99,95 % выделяют путем электролиза раствора.

Индий концентрируется в сфалерите и в меньшей степени халькопирите, в которых содержание металла достигает (мас.%) 0,1–1 и 0,05–0,1 соответственно. В виде небольшой примеси он также входит в состав станнина, сульфосоей Sn, теннантита и касситерита. Главными промышленными источниками являются свинцово-цинковые, оловянно-вольфрамовые и медные руды, содержащие от 0,001 % до 0,1 % In. Большая часть металла (70–75 %) сосредоточена в особенно богатых In рудах относительно более высокотемпературных колчеданных месторождений типа VMSD и рудах более низкотемпературных свинцово-цинковых месторождений в терригенных (тип SEDEX) или карбонатных породах (тип долины Миссисипи). Небольшая часть металла (суммарно 10–15 %) встречается также в рудах жильно-штокверковых Sn-W, жильных полиметаллических (иногда с Sn), медно-порфировых (иногда с Zn и Pb), полиметаллических эпitherмальных жильно-штокверковых месторождений.

Из пыли медеплавильных и оловянных заводов при переработке соответствующих рудных концентратов попутно извлекаются лишь 5 % мирового производства In. Основная часть металла получается из промежуточных продуктов и отходов цинкового и свинцового производства. Дымовая пыль и шлаки, образующиеся при обжиге цинковых или свинцово-цинковых концентратов и при их пирометаллургической переработке, а также электролитические шламы, которые образуются в результате мокрого процесса производства цинка, обрабатывают серной или соляной кислотой, переводя In в раствор. Из него гидролитическим осаждением выделяют концентрат. Элементарный индий получают электро-

литически из раствора хлорида In(III) в соляной кислоте. В настоящее время извлечение In из руд достигает 80 %. Товарный In обычно имеет чистоту 99,97 %. Применяя метод зонной плавки или повторный электролиз расплавов хлоридных солей In(I) , можно получить металл с чистотой 99,99999 %, необходимый для производства полупроводников.

Германий, кроме собственных минералов (в основном, сульфосолей), входит в сульфиды Zn и Cu (сфалерит и вюртцит могут содержать до 0,3 мас.% Ge , а энаргит, теннантит, борнит и халькопирит — до 0,5 мас.% Ge). Этот элемент попутно извлекается, в основном, из Pb-Zn сульфидных руд низкотемпературных месторождений типов SEDEX и долины Миссисипи, а также из руд Cu-Zn-Pb-Ag-Ge месторождений типа Кипуши [Paradis, 2015].

Составленная авторами компьютерная модель для расчетов дополнительного потребления металлов в технологиях энергетического перехода предусматривает получение из рудных месторождений только 70 % необходимого Ge , как это имеет место в настоящее время [Дергачев, Шемякина, 2024]. Считается, что и в будущем около 30 % необходимого металла будут получаться за счет переработки золошлаковых отходов угольных электростанций, но в дальнейшем анализе они не учитываются и обсуждаются возможности обеспечения только 70 % спроса на Ge в технологиях «зеленой» энергетики (в основном, в фотовольтаике), которые будут попутно получаться за счет извлечения этого элемента из руд металлов.

Производство Ge из руд включает стадии получения германиевого концентрата (обычно оксида или сульфида Ge) и стадию хлорирования и последующей очистки. Если металл получается из цинковых концентратов, которые предназначены для пирометаллургической переработки, их сначала подвергают обжигу и спеканию. Отделяющиеся при этом пыль и газы собирают и обрабатывают серной кислотой. С помощью сероводорода или дубильной кислоты из раствора осаждается GeS_2 . При получении цинка электролитическим способом перед электролизом растворы сульфата цинка подвергаются очистке путем осаждения из них Ge , Fe и других примесей.

Полученный сульфид Ge подвергают окислению с помощью окислителя (например, хлорида натрия) для конвертации сульфида в GeO_2 . Диоксид германия растворяют в концентрированной HCl с образованием GeCl_4 , который затем очищается методом фракционной дистилляции и подвергается гидролизу деионизированной водой. После сушки GeO_2 восстанавливается водородом при температуре 760 °C с получением германиевого порошка. Его расплавляют и изготавливают слитки, из которых после зонной плавки получается металл с чистотой 99,99999 %.

При пирометаллургическом способе получения Zn концентрат сначала подвергается окислительно-му обжигу, и практически весь Ge остается в огарке.

При последующем агломерирующем обжиге некоторая часть Ge (2–5 %) удаляется вместе с газами и концентрируется в улавливаемой пыли, из которой может извлекаться. Большая часть Ge , содержащегося в агломерате, в процессе дистилляции накапливается в ретортных остатках, где его концентрация достигает от нескольких сотых до нескольких десятых долей процента.

При гидрометаллургическом (основном в настоящее время) способе производства цинка подавляющая часть германия остается в отвальных кеках выщелачивания цинковых огарков. При их переработке по методу возгонки 30–40 % Ge концентрируется в возгонах благодаря летучести монооксида GeO . Таким образом, при цинковом производстве источниками германия могут быть пыли агломерационного обжига, ретортные остатки, кеки выщелачивания цинковых огарков и оксиды возгонов при их переработке.

Практически 100 % Cd , 95 % In и 70 % Ge (т. е. весь Ge , извлекаемый из руд металлов) получают попутно из отходов и промежуточных продуктов металлургического производства Zn [Bleiwass, 2010]. В дальнейшем анализе последствий производства редких металлов в количествах, достаточных для удовлетворения потребностей технологий фотовольтаики и реализации сценария МЭА 2DS, для упрощения принимается, что 100 % необходимых для этого Cd и In , а также весь Ge , извлекаемый из руд металлов, будут получаться попутно из промежуточных продуктов и отходов цинкового производства.

Содержания In , Cd , Ge на месторождениях цветных металлов всегда слишком низкие, чтобы они могли рассматриваться как главные промышленные компоненты руд. Сведения о содержаниях этих элементов в рудах месторождений Zn отрывочны. В дальнейшем вслед за [Fthenakis, 2004; Elshkaki, Graedel, 2015] предполагается, что руды цинка в типичном случае могут содержать 4 % Zn , 0,02 % Cd , 0,002 % Ge и 0,0004 % In . Это означает, что при условии 100-процентного извлечения критических металлов из руды соотношения производства попутных и главного компонента должны составить 5000 г Cd , 500 г Ge и 100 г In на 1 т Zn .

Попутные редкие элементы в медных рудах. Среди всех металлов, используемых в технологиях солнечной электрогенерации, медь по объему потребления, безусловно, уступает стали и чугуна, но среди цветных металлов — лишь алюминию. Благодаря использованию ее в том числе и в солнечных панелях всех типов глобальный спрос на этот металл возрастет с 20,7 млн т в 2020 г. до 36,6 млн т в 2050 г. Из этого количества только 2 млн т будет использовано в технологиях энергетического перехода, в том числе около 1,5 млн т — в разнотипных солнечных панелях. Таким образом, в 2050 г. в технологиях фотовольтаики найдут применение лишь 4,1 % производимой меди. Однако значение этого металла

не ограничивается только его непосредственным участием в солнечных панелях. Сульфидные руды Cu (и в намного меньшей степени руды Pb) являются главными промышленными источниками Se и Te.

Эти элементы образуют микроскопические включения собственных минералов (селенидов и теллуридов) и как химические аналоги серы изоморфно замещают ее в структуре десятков минералов во всех месторождениях сульфидных руд цветных металлов. В настоящее время Se и Te извлекаются, в основном, из пирита, халькопирита, сфалерита, галенита, пирротина, висмутита, арсенопирита, касситерита и других минералов. При этом важнейшую роль играют огромные по запасам низкокачественных руд Cu- и Au-Cu-порфиновые месторождения, а также вулканогенные колчеданные месторождения цветных металлов (тип VMSD).

Глобальные средние содержания металлов в медных рудах в настоящее время составляют (%) 0,0002 Te, 0,0005 Se и 0,8 Cu [Fthenakis, Anctil, 2013]. Это означает, что в руде, содержащей 1 т Cu, заключено в среднем также 250 г Te и 625 г Se.

Однако существующие технологии переработки медных руд не позволяют извлекать из них весь Se и Te. Основная часть этих редких элементов (на разных предприятиях от 20 до 80 % в зависимости от минерального состава руд) теряется еще на стадии обогащения, при отделении флотационного медного концентрата от пиритных хвостов. При окислительном обжиге медного концентрата, плавке на штейн и конвертации штейна с получением черновой (анодной) меди значительная часть этих элементов теряется в пылях и в возгонах в виде Se, Te и их оксидов. При обжиге медного концентрата в печи кипящего слоя в газовую фазу переходит 45–60 % Se, содержавшегося в концентрате. Наибольшее улетучивание обоих элементов (84 % Se и 95 % Te) наблюдается при обжиге пиритного концентрата в многоподовой печи. Технологии переработки пыли и возгонов очень сложны и многостадийны, поэтому экономическая целесообразность их реализации обуславливается комплексностью извлечения редких металлов. В медной промышленности пыли, как правило, возвращают в цикл пирометаллургии (агломерацию, плавку), но при плавке пылей значительная часть Se и Te теряется с газами; таким образом, оборот пыли не увеличивает их извлечение.

В итоге на классических медных месторождениях типа VMSD на Урале при переработке медных концентратов в черновую медь, поступающую на электролитическую очистку, извлекается не более 30–40 % содержащихся в концентратах Se и Te [Лебедь и др., 2015].

Согласно [Nassar et al., 2022], в 1986–2018 гг. годовые средние взвешенные содержания Te в анодной меди составляли (%мас.) от 0,0076 до 0,0143 (от 0 до 0,07 на разных предприятиях). В процессе электролитической очистки меди Se и Te почти полностью переходят в анодные шламы, в которых средние взве-

шенные содержания в тот же период колебались (%) от 1,4 до 2,3 Te (от 0 до 11 на разных предприятиях) и 5–25 Se в виде селенидов и теллуридов благородных металлов [Nassar et al., 2022]. Именно извлечение Au, Ag и МПП является главным приоритетом при комплексной переработке шламов, но в то же время такая переработка — единственный рентабельный метод получения Se и Te. Из медных шламов попутно получается 90 % мирового производства этих элементов, и лишь небольшая часть их извлекается из отходов производства Pb, Zn и Au [Ojebuoboh, 2008].

Медные шламы обычно обрабатываются растворами серной кислоты для доизвлечения Cu (при этом выщелачиваются и около 2 % Te). Для получения Se применяют окислительный обжиг с возгонкой SeO_2 ; нагревание шлама с концентрированной серной кислотой, окисление соединений селена до SeO_2 с его последующей возгонкой и восстановлением до элементарного Se с помощью SO_2 ; окислительное спекание с содой, конверсию полученной смеси соединений селена до соединений Se(IV) и их восстановление до элементарного селена действием SO_2 [Butterman, Brown, 2004]. Получаемый Se в дальнейшем рафинируют перекристаллизацией, перегонкой в вакууме, гидридным или иными методами для получения высокочистого (99,999 % Se) и особо чистого селена (от 99,999 до 99,9999 % Se), используемого, в частности, для получения полупроводниковых материалов.

После отделения от шламов Cu и Se остаток, содержащий Pb, Sb, благородные металлы и Te, переплавляют для получения золото-серебряного сплава. При этом Te переходит в содово-теллуристые шлаки, содержащие 20–35 % Te. Их дробят, размалывают и выщелачивают водой. Из раствора теллур осаждают электролизом на катоде. Получающийся теллуристый концентрат обрабатывают щелочью в присутствии алюминиевого порошка, переводя Te в раствор в виде теллуридов. При этом примеси тяжелых металлов концентрируются в нерастворимом осадке, а раствор отделяется и продувается воздухом для осаждения элементарного Te чистой 99 %. Теллур повышенной чистоты получают повторением теллуридной переработки, а для производства наиболее чистого продукта сочетают методы химической очистки, вакуумной дистилляции и зонной плавки, которые позволяют получать товарную продукцию чистотой от 99,99999 до 99,999999 %. Существующие в настоящее время технологии дают возможность на некоторых предприятиях извлекать из медных шламов до 90 % Te. Вместе с тем, анализ систематических данных по предприятиям отрасли в мире показывал, что из медных анодных шламов извлекается лишь четверть содержащегося в них Te [Nassar et al., 2022].

Особенности попутного производства металлов. Элементы, критически важные для технологий фотовольтаики, получают преимущественно попутно из руд цветных металлов. Содержания этих элементов в рудах очень низкие, а объемы их вы-

пуска обычно весьма невелики. Поэтому даже при высоких ценах на Те, Ge и другие элементы их вклад в стоимость товарной продукции, выпускаемой металлургическими предприятиями, как правило, очень мал по сравнению с извлекаемыми из тех же руд главными полезными компонентами. Действительно, в 2020 г. в мире было произведено 12,1 млн т первичного цинка на 29,5 млрд долл. и попутно получено 140 т Ge, на 147 млн долл., что составило около 0,5 % стоимости главной товарной продукции. Экономическое процветание отдельных предприятий и отрасли в целом в этом случае зависит, в основном, от объема производства требующейся рынку главной товарной продукции, т. е. в конечном счете от спроса на Zn, существующего в данный момент на рынке. Производство попутных компонентов будет продолжаться и возрастать до тех пор, пока не возникнет угроза дестабилизации рынка главной продукции (например, угроза перепроизводства главного металла).

Статус Cd, Ge, Ga, In, Te и Se как попутных полезных компонентов означает, что добыча этих элементов не зависит от спроса или изменения цены на них. Для адекватной оценки риска поставок добываемых попутно редких элементов важно, что предложение их на рынке определяется спросом на главные металлы сульфидных руд и бокситов, из промежуточных продуктов и отходов переработки которых они извлекаются. Чем выше спрос на очищенные Zn и Cu, тем больше руд цинка и меди, а значит и металлов в их составе (не только главных, но и рассеянных редких элементов) будет добыто из недр, и тем выше окажется рыночное предложение редких элементов, попутно извлекаемых из отходов металлургических производств.

В случае с медью действует еще более жесткое ограничение. Все большая часть этого металла извлекается из руд путем выщелачивания. Соответствующая технология появилась в 1960-х гг., а в 2020 г. благодаря ей были получены 4,19 млн т первичной меди (почти 20 % мировой добычи). Эта технология исключает извлечение Те и Se. Редкие элементы извлекались исключительно попутно с остальной частью мирового производства меди (21,10 млн т Cu), которая была получена с использованием пирометаллургических методов и последующей электролитической очистки металла. Таким образом, предложение Se и Te на мировом рынке зависит не от производства меди вообще, а от количества этого металла, получаемого методами пирометаллургии.

Для цветных металлов глобальное предложение их на мировом рынке принято характеризовать масштабами мировых запасов и ресурсов. Применительно к попутно получаемым Те, Se, Ga, Ge, Cd, In эти понятия утрачивают свое значение. Поскольку нельзя относить к категории запасов то, что не может быть добыто независимо от спроса на главный металл, предложение попутных ком-

понентов лучше характеризовать количеством металла, которое потенциально может быть произведено в год.

Содержания редких элементов в рудах цветных металлов очень низкие, извлечение и очистка их от примесей представляют собой очень сложный многоступенчатый процесс, на каждой стадии которого неизбежны потери ценных компонентов. В результате при нынешнем уровне развития технологий не удастся достигать приемлемо высокого извлечения, по крайней мере, некоторых попутных компонентов. Практически все критически важные для фотовольтаики элементы характеризуются низкими средними по отрасли коэффициентами извлечения. Другой возможной причиной этого является то, что не все отходы металлургического производства Cu, Zn и Al подвергаются соответствующей переработке по причине отсутствия необходимых технологий и низкой инвестиционной привлекательности таких производств.

Создание соответствующих производственных мощностей и извлечение металла потребовало бы значительных затрат. В какой степени они будут оправданы дополнительными доходами от реализации попутных продуктов, в конечном счете решается руководством металлургических предприятий. Не исключено, что инвестирование в создание мощностей для получения попутных компонентов из руд или в модернизацию производства с целью повышения коэффициента извлечения их из отходов производства основного металла будет признано не целесообразным, особенно если это может каким-то образом повлиять на выпуск главной товарной продукции. В результате инвестиционно привлекательными такие производства оказываются только в странах с относительно низкими затратами, прежде всего в Китае, и это является важнейшей причиной концентрации металлургического производства критически важных для фотовольтаики элементов.

Для целей данного исследования полезен расчет соотношения между реальным металлургическим производством главных и попутных компонентов руд. Оно может быть получено как частное от деления годового глобального производства попутного металла на объем производства главного компонента тех же руд. Это отношение зависит, в частности, от содержания металлов в рудах, наличия технологий производства попутных металлов и мощности соответствующих производств, эффективности извлечения попутных элементов из отходов производства главных металлов и цен на металлы.

Результаты и их обсуждение. Спрос на металлы в технологиях фотовольтаики и пути его удовлетворения. Ранее было показано, что при реализации сценария МЭА 2DS в базовом варианте расчетов из 24 важнейших типов металлов и промышленных минералов (сталь и чугун, Mn, Cr, 20 цветных и редких металлов и графит) в наи-

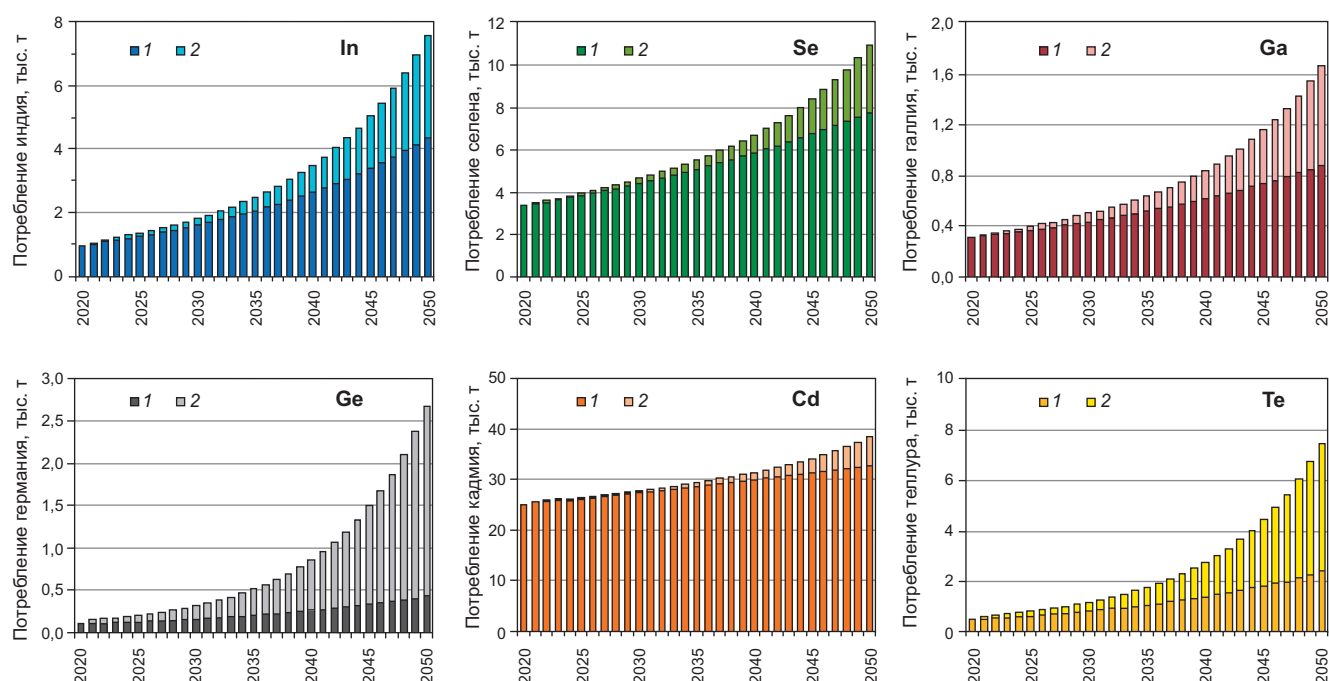


Рис. 3. Потребление индия, селена, галлия, германия, кадмия, теллура в 2021–2050 гг.: 1 — в традиционных областях, 2 — в солнечных панелях типов CIGS (In, Ga, Se), a-SiGe (Ge) и CdTe (Cd, Te)

больших масштабах в 2021–2050 гг. наряду со сталью и графитом будут использоваться (суммарное потребление за 30 лет, млн т) алюминий (31,1), медь (23,5) и цинк (15,0) [Дергачев, Шемякина, 2024]. При этом среди технологий энергетического перехода электростанции с солнечными панелями разных типов станут главными потребителями цветных металлов, где в 2021–2050 гг., по расчетам, найдут применение (млн т) 23,1 Al, 14,1 Cu, в то время как потребление Zn не превысит 0,019. По прогнозу, на солнечные панели разных типов будет приходиться 100 % дополнительного потребления Pb и Sn, связанного с энергетическим переходом, 69 % Al, 55 % Cu, и только 0,1 % Zn. Однако значение этих металлов для реализации сценария МЭА 2DS не ограничится их непосредственным участием в составе солнечных панелей. Они являются в настоящее время, и видимо, останутся в обозримом будущем главными полезными компонентами руд, из которых попутно извлекаются редкие элементы, получающие все более широкое применение в традиционных областях, но главное, приобретающие критически важное значение для технологий энергетического перехода, прежде всего фотовольтаики.

Эти технологии к 2050 г. могут превратиться в крупнейший рынок для Te, Se, Cd, In, Ge, Ga, на который будет приходиться (доля глобального потребления, %) 85 Ge, 69 Te, 46 Ga, 42 In, 29 Se, 15 Cd (рис. 3). Эти шесть редких элементов используются в различных технологиях «зеленой» энергетики. Так, Ga, In, Ge в небольших количествах применяются в гибридных и электромобилях. Но важнейшей областью их применения будут солнечные панели разных типов. В них будет использован весь Cd, Te и Se, практически 100 % Ge и In, 85 % Ga, а также 80 %

Ag, которые найдут применение в новых энергетических технологиях.

Ожидается, что дополнительный спрос на редкие металлы, возникающий из-за использования редких элементов в солнечных панелях, в 2050 г. во много раз превзойдет их потребление всей мировой экономикой в 2020 г. (кроме Se и Cd). Дополнительный спрос на Te, например, составит 5,1 тыс. т против глобального спроса 0,44 в 2020 г., на In — 3,2 против 0,9, на Ge — 2,3 против 0,1, на Ga — 0,8 против 0,3 и лишь на Se — 3,2 против 3,3 и на Cd — 5,6 против 25.

От возможности удовлетворить потребности фотовольтаики в этих элементах будет решительным образом зависеть успех в реализации сценария МЭА 2DS и вообще выполнение Парижского соглашения по климату. Удовлетворению растущих потребностей технологий фотовольтаики в редких элементах, не образующих собственных месторождений, могли бы способствовать, например, повышение коэффициента использования вторичных металлов, вовлечение в разработку новых типов месторождений, повышение коэффициента извлечения редких элементов из руд других металлов, и (или) увеличение рудничного (добыча из недр) и металлургического производства главных металлов.

Однако, как было показано ранее [Дергачев, Шемякина, 2024], при сроке эксплуатации солнечных панелей 30 лет, лома, содержащего редкие элементы, в солнечной электроэнергетике в период 2021–2050 гг. практически не образуется. В настоящее время промышленных технологий для их извлечения из отслуживших солнечных панелей не существует, а их перспективы в будущем не ясны. Из-за очень низких содержаний элементов в ломе и присутствия в нем многочисленных других металлов этот ис-

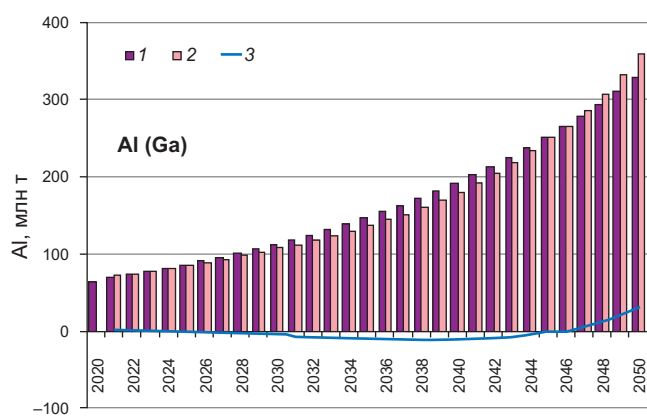


Рис. 4. Глобальный спрос (1), производство (2) и перепроизводство (3) алюминия, рассчитанные на основе глобального потребления попутно извлекаемого галлия

точник позволит удовлетворять лишь малую часть потребностей в них в технологиях фотовольтаики и других областях.

В перспективе большое значение в качестве источников Те, например, могут приобрести обогащенные им эпитеpmальные золото-теллуридные месторождения, из руд которых этот элемент в настоящее время не получается. Однако месторождения этого типа обладают малыми запасами руд и кардинально повлиять на удовлетворение будущего рыночного спроса на Те они не могут.

Обычным способом удовлетворения растущего спроса на какой-то металл является увеличение его производства из руд. Ответом на растущий спрос на Си, например, является разведка новых медных месторождений, начало добычи руд меди на новых и повышение коэффициента использования производственных мощностей на существующих горных и металлургических предприятиях, строительство новых металлургических заводов по выплавке и очистке металла. В принципе растущий спрос в технологиях фотовольтаики и в других отраслях на попутно добываемые редкие элементы может быть удовлетворен за счет роста добычи главных металлов, из руд которых они извлекаются. Однако в этом случае важно знать, как это скажется на рынке самих главных металлов и не окажется ли неприемлемо высокой цена, которую придется заплатить мировой экономике за удовлетворение спроса на Se, Те, Cd, Ge, In, Ga в «зеленой» энергетике.

Спрос на Ga и предложение алюминия. В 2020 г. было добыто 379 млн т бокситов из их разведанных запасов 32000 млн т. Из добытого сырья 96 % было использовано для получения 136 млн т глинозема и затем 65352 тыс. т Al [World Mining Data, 2024]. Попутно из растворов глиноземного производства извлечено 304 т Ga из содержащихся в исходных бокситах 18950 т этого металла. Таким образом, 1 т галлия получалась попутно при производстве 215 тыс. т Al, а среднее по отрасли извлечение Ga с учетом его содержания в бокситах (см. раздел 2.3.3) составляло 1,6 %.

В 2050 г. спрос на Ga только в технологиях фотовольтаики по расчетам должен составить 706 т (табл. 2). При существующих в настоящее время условиях такое количество первичного металла могло бы быть получено попутно при производстве 151,8 млн т Al. Глобальное же потребление Ga составит 1670 т, и такое количество металла при нынешних технологиях могло бы быть получено попутно при производстве 359,1 млн т первичного алюминия.

В то же время, согласно базовому варианту расчетов [Дергачев, Шемякина, 2024], глобальное потребление (а значит, и мировое производство) первичного Al в 2050 г. составит 328,5 млн т, в том числе 2,8 млн т в технологиях энергетического перехода и 325,7 млн т в традиционных областях (в них прогнозируемый рост спроса на металл в 2021–2050 гг. составит 5,5 % в год). Как видим, при сохранении нынешних технологий полное удовлетворение глобального спроса на Ga в 2050 г. возможно только при производстве 30,6 млн т первичного Al сверх мирового спроса на этот металл. При этом значительных масштабов перепроизводство металла приобретет лишь начиная с 2046 г. (рис. 4).

Вместе с тем в 2021–2050 гг. кумулятивное потребление Ga во всех отраслях мировой экономики, согласно базовому варианту расчетов, составит 23,1 тыс. т (табл. 2). Такое количество металла может быть получено при производстве 4966,5 млн т первичного алюминия при прогнозируемом кумулятивном спросе на него в тот же период 5024,9 млн т.

Таким образом, даже при нынешних технологиях и невысоком коэффициенте извлечения Ga из бокситов удовлетворение дополнительного спроса на него в альтернативной энергетике (главным образом, в солнечных панелях типа CIGS) в целом за 30-летний период, вероятно, не приведет к критическому перепроизводству алюминия, разбалансированию мирового рынка этого металла и резким колебаниям цен на него.

Спрос на Cd, Ge, In и предложение цинка. В 2020 г. в мире было получено из концентратов 12 100 тыс. т Zn. Попутно из отходов и промежуточных продуктов металлургического производства Zn было произведено 22800 т Cd, 140 т Ge и 941 т In [Mineral..., 2024]. Таким образом, реальное глобальное соотношение между произведенным Zn и редкими металлами, извлеченными из отходов его производства, составило 1884 г Cd, 11,6 г Ge и 77,8 г In на 1 т Zn. Иными словами, при нынешних отношениях Cd:Zn, In:Zn и Ge:Zn попутно получить 1 т Cd можно при производстве 530,8 т Zn, 1 т In и 1 т Ge — при получении 12853 и 86207 т Zn соответственно. Сравнение соотношений редких металлов с Zn в составе руд, рассмотренных ранее, и в продукции цветной металлургии показывает, что при металлургической переработке руд и концентратов в среднем по отрасли извлекались (%) 38 Cd, 2,3 Ge и 78 In, содержащихся в руде.

Используя глобальные соотношения между реальным металлургическим производством главного и попутных металлов цинковых руд в 2021 г., можно рассчитать, каким должно быть предложение (производство) цинка в 2021–2050 гг., чтобы планы по развитию солнечной электрогенерации в рамках реализации сценария МЭА 2DS были выполнены при сохранении заданного соотношения между тремя типами тонкопленочных панелей в установленной мощности солнечных электростанций.

Потребление первичных металлов только в технологиях фотовольтаики в 2050 г. должно составить 5561 т Cd, 3244 т In и 2254 т Ge (табл. 2). Глобальный спрос на эти металлы составит 38200 т, 7601 т и 2681 т соответственно, и при существующих условиях (нынешних технологиях получения металлов) необходимое количество Cd потребует производства 20,3 млн т Zn, In — 97,7 млн т, а Ge — 231,1 млн т первичного Zn (рис. 5).

Удовлетворение спроса на Cd не повлечет перепроизводства Zn, потребность в котором, по прогнозу, в 2050 г. составит 21,3 млн т (рис. 5, в). Но минимальное количество Zn, которое необходимо произвести для полного удовлетворения потребностей «зеленой энергетики» во всех трех редких металлах только в 2050 г. составило бы 231,1 млн т, что по ряду признаков не реально. Действительно, уже в самом начале рассматриваемого периода проявилась бы проблема перепроизводства цинка, и только в 2050 г. избыток предложения Zn составил бы 209,8 млн т (рис. 5, б). Это означает, что наращивать спрос на Ge, и значит, установленную мощность солнечных электростанций с панелями типа a-SiGe предлагаемыми темпами (14,2 % в год) можно либо ценой перепроизводства цинка, что невозможно в условиях рынка, либо снизив темпы роста до 1,8 % в год (средний темп роста глобального спроса на Zn).

В 2021–2050 гг. глобальное потребление Ge составило бы 24,6 тыс. т, что возможно при производстве 2120,7 млн т Zn, тогда как глобальный спрос на этот металл за весь период, по расчетам, не превысит 503,3 млн т. Таким образом, за 30 лет перепроизводство главного металла цинковых руд должно было бы составить не менее 1617,4 млн т.

При производстве 2120,7 млн т главного металла в 2021–2050 гг. попутно были бы получены также 165,0 тыс. т In и 3994 тыс. т Cd при глобальном потреблении их в 30-летний период 94,3 тыс. т и 907 тыс. т соответственно. Это означает, что при сохранении нынешних условий (современных технологий, коэффициента извлечения металла из руд, цен и т. д.) удовлетворение потребности фотовольтаики в Ge на 70 % за счет извлечения его из цинковых руд приводит к перепроизводству не только Zn, но и попутно извлекаемых In и Cd. Особого внимания заслуживает необходимость захоронения нескольких млн т Cd дополнительно к тому количеству этого чрезвычайно экологически опасного металла,

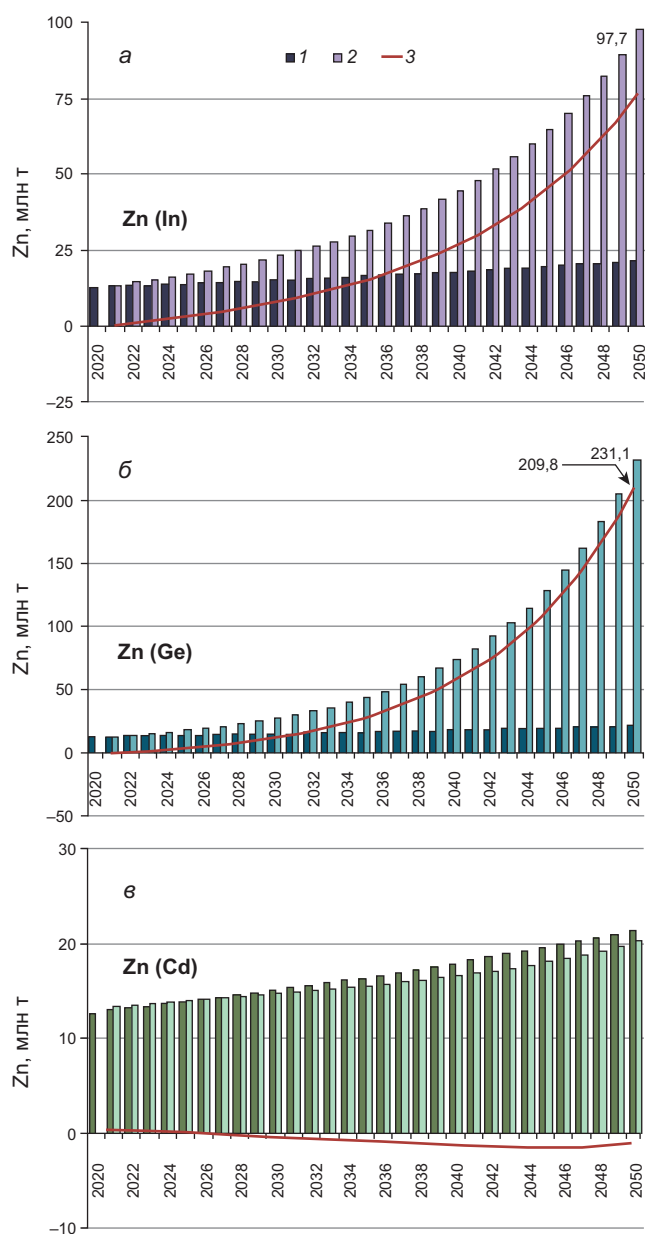


Рис. 5. Глобальный спрос (1), производство (2) и перепроизводство (3) цинка, рассчитанные на основе глобального потребления попутно извлекаемых редких элементов: индия (а), германия (б), кадмия (в)

которое при нынешних технологиях не извлекается из руды.

Увеличение мирового производства очищенного Zn с 13 млн т в 2020 г. до 231,1 млн т за 30 лет (средние темпы роста 10,1 % в год) потребовало бы быстрого наращивания металлургических мощностей по производству этого металла, что окажется абсолютно не реальным на фоне колоссального переизбытка металла на рынке.

Таким образом, можно ожидать, что при сохранении нынешних технологий в 2021–2050 гг. производство Zn, рассчитанное на удовлетворение потребностей в попутно получаемых In и Ge, будет значительно превышать глобальные потребности в главном металле цинковых руд. Это могло бы при-

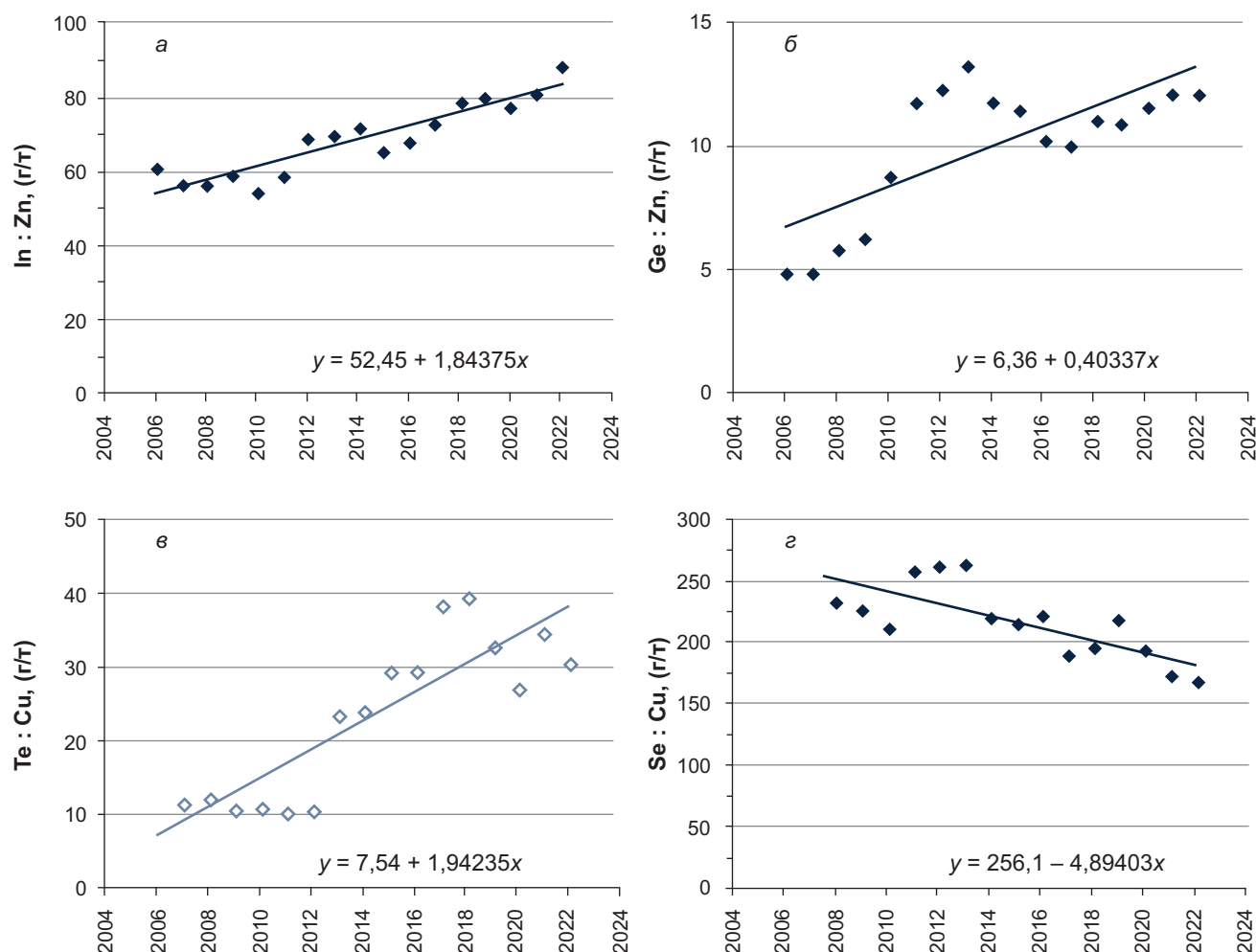


Рис. 6. Изменение отношений главных металлов (Cu, Zn) и попутно извлекаемых редких элементов (Se, Te, In, Ge) в реальном мировом металлургическом производстве в 2007–2022 гг. (граммы редких металлов на 1 т меди или цинка): а — In:Zn, б — Ge:Zn, в — Te:Cu, г — Se:Cu

вести к разбалансировке огромного рынка цинка. При возникновении избытка предложения этого металла, и возможно, попутно извлекаемых Cd и In, на рынке неизбежно произошло бы падение цен на них с последующим сокращением масштабов производства. Другими следствиями могли бы стать сокращение мировых запасов Zn и частичный или полный отказ от использования вторичных редких металлов.

Из других способов увеличения предложения редких металлов, исключая одновременный рост производства (предложения) цинка, хорошие перспективы имеет повышение коэффициентов извлечения попутных редких металлов из цинковых руд, т. е. повышение отношений In:Zn и Ge:Zn в производстве очищенных металлов, которые в предшествовавшие годы постоянно возрастали. Изменение отношения In:Zn в 2005–2022 гг. описывается уравнением линейной регрессии $y = 52,45 + 1,84375x$ (рис. 6, а). Из него следует, что уже в 2031 г. прогнозируемое отношение In:Zn в реальном металлургическом производстве In сравняется со средним отношением металлов в рудах (100 г In на 1 т Zn), и значит, извлечение In из руд достигнет 100 %. Од-

нако более реалистичным кажется предположение, что отношение In:Zn будет возрастать, но достигнув 90 г на 1 т Zn в 2026 г., в дальнейшем стабилизируется на этом уровне (извлечение из руд, содержащих в среднем 100 г/т In, составит 90 %). Однако и в этом случае в 2050 г. для удовлетворения глобального спроса на этот металл (7601 т) потребовалось бы произвести 84 млн т Zn, что по-прежнему в несколько раз превышало бы прогнозируемый глобальный спрос на Zn в 2050 г. (21,3 млн т).

Прогнозируемое отношение Ge:Zn в соответствии с уравнением линейной регрессии $y = 6,36 + 0,40337x$ (рис. 6, б) в 2050 г. составит 24,5 г на 1 т Zn. Это означает, что при средних содержаниях в руде 500 г/т Ge извлечение его из руды достигло бы почти 4,9 %. Однако и при наблюдавшемся в последние годы темпе роста извлечения Ge из руд удовлетворение глобального спроса на металл в 2050 г. (2681 т) могло бы быть достигнуто только при производстве 109,4 млн т Zn. Это все равно практически в 5,1 раза превысило прогнозируемый глобальный спрос на Zn в 2050 г., и значит, сделало бы неизбежным перепроизводство главного металла цинковых руд.

Как видим, проблема перепроизводства главного металла при удовлетворении потребностей фотовольтаики в редких элементах из цинковых руд может стать менее острой, но не может быть полностью решена при сохранении нынешних технологий и (или) при темпах их совершенствования, достигнутых в последние десятилетия.

Для реализации сценария МЭА 2DS требуются очень быстрые изменения в технологии получения Ge, снижение к 2050 г. потерь металла на различных стадиях его попутного извлечения для достижения отношения: 126 г Ge на 1 т Zn. Однако задача повысить извлечение Ge из руды минимум в 11 раз с нынешних 2,3 % почти до 25 % при среднем содержании в руде 500 г/т Ge очень трудно разрешима.

Проблему перепроизводства главного металла, кроме того, можно решить, изменив установившееся на сегодняшний день и заложенное в компьютерную модель соотношение между золошлаковыми отходами угольной энергетики и отходами цинкового производства как источниками Ge (30 : 70). Это, однако, потребовало бы еще более радикальных инноваций в технологиях, поскольку переработка отходов угольных электростанций (главным образом, золы уноса) в настоящий момент является рентабельной лишь в России и Китае.

Спрос на Te и Se и предложение меди. В 2020 г. в мире было произведено 16900 тыс. т катодной меди из руд и концентратов [Mineral..., 2024], а попутная добыча интересующих нас редких элементов составила 459 т Te и 3279 т Se [World Mining Data, 2024]. Таким образом, отношения главного и попутных полезных компонентов медных руд в их реальном металлургическом производстве составили 27,2 г Te и 194 г Se на 1 т первичной меди, произведенной пирометаллургическими методами. Иначе говоря, если предположить, что установившиеся в последние годы соотношения Te:Cu и Se:Cu сохранятся в предстоящий период, то 1 т Se можно будет попутно получать при производстве 5155 т, а 1 т Te — при получении 36819 т катодной меди. Сравнение этих цифр с приведенными выше содержаниями металлов в руде показывает, что имеющиеся на сегодняшний день технологии дают возможность рентабельно извлекать из руд 10,9 % Te и 31,0 % Se.

Согласно базовому варианту расчетов на основе электронной модели, в 2050 г. только в технологиях энергетического перехода потребление первичных металлов составит 5075 т Te и 3216 т Se [Дергачев, Шемякина, 2024]. Глобальный же спрос в тот же год достигнет 7424 т Te и 11007 т Se. В нынешних условиях, при существующих технологиях получения редких элементов такое количество Se может быть произведено только при получении методами пирометаллургии 56,7 млн т меди, а Te — при производстве 272,9 млн т Cu (рис. 7).

Однако в базовом варианте расчетов прогнозируемое глобальное потребление первичной меди в 2050 г. составит 36,6 млн т, в том числе 2,0 млн т

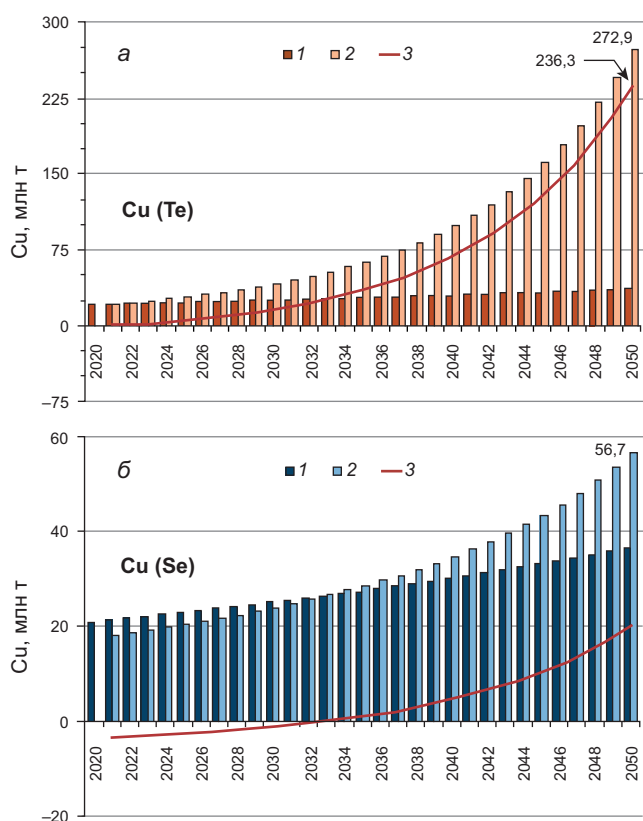


Рис. 7. Глобальный спрос (1), производство (2) и перепроизводство (3) меди, рассчитанные на основе прогнозируемого глобального потребления попутно извлекаемых теллура (а) и селена (б)

в «зеленой» энергетике и 34,6 млн т в традиционных областях (с учетом поддержания темпов роста потребления в них на уровне 1,7 % в год после 2020 г.). Очевидно, что для полного удовлетворения потребностей «зеленой энергетики» в обоих элементах в 2050 г. потребовалось бы произвести 272,9 млн т Cu, что абсолютно не реально — рыночное предложение меди в 2050 г. оказалось бы на 236,3 млн т больше глобального спроса на металл (рис. 7, а). Перепроизводство Cu проявилось бы уже в самом начале рассматриваемого периода и стало бы важнейшим ограничителем в использовании солнечных панелей типа CdTe. После этого установленная мощность солнечных электростанций с панелями этого типа могла бы возрастать не на 14,2 %, как предусмотрено сценарием, а только пропорционально росту глобального потребления Cu, т. е. на 1,9 % в год.

Всего же в 2021–2050 гг. кумулятивное потребление Te во всех отраслях, согласно базовому варианту расчетов, должно составить 75,4 тыс. т, что потребует получения только методами пирометаллургии 2772,1 млн т рафинированной меди при спросе на металл в тот же период около 843,3 млн т. Попутно было бы получено также 537,7 тыс. т Se при глобальном потреблении его за 30 лет лишь 185,2 тыс. т.

Предусмотренный достаточно консервативным сценарием энергетического перехода рост потребления Se, пропорциональный среднему темпу роста

установленной мощности генерации электростанций с солнечными панелями типа CIGS (14,2 % в год), привел бы к переизбытку предложения меди на рынке, начиная с 2033 г. (рис. 7, б). После этого, по-видимому, должно быть принято вынужденное решение о замедлении темпов роста установленной мощности электростанций с солнечными панелями, использующими Se, до 1,9 % в год (пропорционально росту производства меди).

Приведенные результаты исследования показывают, что при сохранении нынешних технологий или достигнутых на сегодняшний день темпов их развития (в частности, роста отношений Se:Cu и Te:Cu) удовлетворение потребностей фотовольтаики в попутно получаемых редких элементах, следующих из сценария МЭА 2DS, неизбежно привело бы к огромному переизбытку на рынке не только главного металла медных руд, но и попутного Se.

Считается, что даже небольшое повышение извлечения Te позволило бы увеличить отношение Te:Cu в производстве металлов цветной металлургией и получать существенно больше теллура для нужд фотовольтаики (в частности, [Ojebuboh, 2008]). Между тем это отношение в 1980–2012 гг. демонстрировало негативный тренд и лишь после этого стало повышаться (рис. 6, в). Изменение этого отношения в 2007–2022 гг. описывается уравнением линейной регрессии $y = 7,54 + 1,94235x$. Из этого следует, что при сохранении этой тенденции в 2050 г. в цветной металлургии будет производиться 91 г Te на 1 т Cu. Коэффициент извлечения Te из руд меди превысил бы 36 %. Однако и в этом случае для удовлетворения глобального спроса на теллур (7424 т) потребовалось бы произвести с использованием пирометаллургических методов 81,6 млн т первичной меди при глобальном спросе на металл 36,6 млн т.

Отношение Se:Cu в последние годы снизилось с 234 в 2008 г. до 168 г Se на 1 т Cu в 2022 г. С учетом среднего содержания Se в медных рудах это означает снижение коэффициента извлечения металла в металлургическую продукцию с 37 до 27 %. В соответствии с уравнением линейной регрессии $y = 256,1 - 4,89403x$ в 2050 г. отношение Se:Cu снизилось бы до 40,7 г Se на 1 т Cu (при этом извлечение Se при производстве меди составило бы 6,5 %) (рис. 6, г). При таком соотношении производства меди и попутного Se для выполнения сценария МЭА 2DS в части строительства солнечных электростанций с панелями типа CIGS в 2050 г. потребовалось бы произвести 270,4 млн т Cu. Таким образом, перепроизводство меди только в 2050 г. составило бы 233,8 млн т.

Такой дисбаланс и любое ускорение распространения технологий фотовольтаики, использующих Te, неизбежно вызвал бы падение цен на Cu и Se, а также сокращение мировых запасов меди, многие месторождения которой (в частности, медно-порфировые) могли бы оказаться нерентабельными. Другими негативными последствиями стали бы

сокращение использования некоторых вторичных цветных и редких металлов и отказ от метода выщелачивания как альтернативы пирометаллургическим методам получения меди. Наконец, среди последствий возрастания производства меди отдельного рассмотрения требуют проблема возрастающего попутного производства не находящих применения экологически опасных Cd, As, и возможно Se, а также увеличение выбросов парниковых газов при многократном росте производства цветных металлов.

Заключение. Проблемы будущей электроэнергетики не ограничиваются только наличием и достаточностью запасов минеральных материалов, потребности в которых возрастают по мере перехода к новым энергетическим технологиям. Другим важным аспектом проблемы является невозможность для горно-металлургического комплекса при нынешнем состоянии существующих в нем технологий обеспечить необходимый для солнечных электростанций масштаб попутной добычи редких элементов (особенно In, Te и Ge) из медных и цинковых руд без разбалансирования рынка, сокращения промышленных запасов и падения цен на главные металлы: медь и цинк.

Естественные ограничения на применение Cd, In, Ga, Ge, Te, Se в технологиях солнечной фотовольтаики накладываются свойствами этих жизненно важных для нее элементов. Они пользуются крайне ограниченным распространением в природе, их редкие собственные минералы практически не имеют промышленного значения, и чаще всего они изоморфно замещают цветные металлы или серу в минералах других элементов. В связи с этим они не образуют собственных месторождений, где они были бы главными полезными компонентами, производство которых определялось бы только спросом на сами эти элементы. Они содержатся в рудах других металлов в крайне малых количествах, и из-за этого практически ничего не добавляют к стоимости главной товарной продукции, даже не смотря на высокие цены на эти металлы. Они не отделяются от главных цветных металлов при обогащении и могут получаться только из отходов или полупродуктов их металлургического производства после извлечения главных металлов и в результате технически сложной и дорогостоящей многоступенчатой очистки. Их получение всегда сопряжено с большими потерями (низким извлечением элементов из руд в товарную продукцию) и может окупаться только при условии комплексного использования исходного минерального сырья и при низких затратах.

Никакие возможности обеспечения технологий фотовольтаики редкими элементами не реализуемы, если они приводят к существенному перепроизводству главных металлов руд, и значит дестабилизации рынков цинка и меди, нарушению баланса спроса и предложения этих металлов, падению цен на них и сокращению их мировых запасов. В этом отношении при нынешнем состоянии горно-ме-

таллургического комплекса и существующих в нем технологий являются недостижимыми цели разработанного Международным энергетическим агентством сценария 2DS в варианте, предусматривающем ускоренный рост установленной мощности солнечных электростанций с получающими все большее распространение тонкопленочными солнечными панелями. Их внедрение потребует недопустимого увеличения производства Cu и Zn, значительно превышающего уровень их прогнозируемого глобального потребления в мировой экономике.

Острота проблемы может быть существенно снижена за счет использования вторичных металлов, извлекаемых из отслуживших солнечных панелей, расширенного использования альтернативных источников сырья, получение металлов из которых не связано с производством Cu и Zn (зола уноса угольных электростанций для Ge, руды золото-теллуридных месторождений для Te и т. д.).

Однако радикальное решение проблемы потребует глубокой модернизации существующих в горно-металлургическом комплексе технологий, разработки рентабельных методов более полного попутного извлечения Se, Te, Cd, Ga, Ge, In из отходов производства Cu и Zn и больших капитальных вложений.

Следует иметь в виду, что в истории развития цветной металлургии сквозное извлечение всех попутных компонентов медных и цинковых руд,

особенно Ge и Te, всегда было очень низким. Это означает, что использование накопившихся за многие десятилетия отходов металлургического производства позволило бы несколько уменьшить нагрузку на недра и снизить остроту проблемы перепроизводства главных металлов.

Анализ, использующий данные о мировом производстве, мировых ценах, глобальном спросе на элементы, критически важные для солнечной энергетики, не может отражать все разнообразие ситуаций в обеспечении этими минеральными материалами, которые будут возникать в экономике конкретных стран. Можно лишь с уверенностью констатировать, что успехов в развитии солнечной электрогенерации в перспективе смогут добиться прежде всего те страны, которые окажутся в состоянии поддержать распространение новых технологий фотовольтаики в собственной экономике производством редких металлов полупроводникового качества на своих металлургических предприятиях и из руд собственных месторождений. Такие страны очень малочисленны и список их очень сильно отличается от перечня стран, которые около полутора десятилетий назад восприняли концепцию ускоренного перехода на возобновляемые источники энергии, исходя из политических соображений и без серьезной инженерной оценки обеспеченности энергетического перехода минеральными материалами при нынешнем состоянии технологий в этой области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Запасы критического минерального сырья и дополнительные потребности в нем в эпоху энергетического перехода // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 3–16.

Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. Критическое минеральное сырье для малоуглеродной энергетики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 3. С. 3–10.

Лебедь А.Б., Набойченко С.С., Шунин В.А. Производство селена и теллура на ОАО «Уралэлектромедь». Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2015. 112 с.

Bleiwas D.I. Byproduct mineral commodities used for the production of photovoltaic cells // U.S. Geological Survey Circular 1365. 2010. URL: <http://pubs.usgs.gov/circ/1365/>

Buchert M., Schuler D., Bleher D. Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential // UNEP, 2009. URL: http://www.resourcefever.org/publications/reports/UNEP_OEKO_CriticalMetals_July09.pdf (дата обращения: 01.07.2024).

Butterman W.C., Brown R.D.Jr. Mineral Commodity Profiles: Selenium // U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey. Open-File Report 03–018. 2004. URL: <https://pubs.usgs.gov/of/2003/of03-018/of03-018.pdf> (дата обращения: 01.07.2024).

Elshkaki A., Graedel T.E. Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply // Applied Energy. 2015. Vol. 158. P. 167–177.

Fthenakis V. Life cycle impact analysis of cadmium in CdTe PV production // Renewable and Sustainable Energy Rev. 2004. Vol. 8 (4). P. 303–334.

Fthenakis V., Anctil A. Direct Te mining: resource availability and impact on cumulative energy demand of CdTe

PV life cycles // IEEE Journal of Photovoltaics. Vol. 3. 2013. № 1. P. 433–438.

Goe M., Gaustad G. Identifying critical materials for photovoltaics in the US: a multi-metric approach // Appl. Energy. 2014. Vol. 123. P. 387–396.

Graedel T.E., Barr B., Chandler C., et al. Methodology of metal criticality determination. Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 46. P. 1063–1070.

Grandell L., Thorenz A. Silver supply risk analysis for the solar sector // Renew Energy. 2014. Vol. 69. P. 157–165.

Haynes W.M., Lide D.R., Bruno T.J. CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data // Boca Raton, Florida: CRC Press. 2016. P. 14–17.

IEA (International Energy Agency) 2016. Energy technology perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems // Paris: IEA. 2016. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2016> (дата обращения: 17.03.2022).

IEA 2017. Energy technology perspectives 2017: Catalysing Energy Technology Transformations // Paris: IEA. 2017. URL: <https://www.iea.org/topics/energy-technologyperspectives> (дата обращения: 10.01.2022).

Mineral Commodities Summaries 2024. URL: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/commodity-statistics-and-information> (дата обращения: 02.08.2024).

Nassar N.T., Kim H., Frenzel M., et al. Global tellurium supply potential from electrolytic copper refining // Resources, Conservation & Recycling. 2022. Vol. 184. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922002774?via%3Dihub> (дата обращения: 01.07.2024).

Ojebuoboh F. Selenium and tellurium from copper refinery slimes and their changing applications // *World of Metallurgy* — ERZMETALL. V. 61. 2008. P. 33–39.

Paradis S. Indium, germanium and gallium in volcanic- and sediment-hosted base-metal sulphide deposits // *Symposium on Strategic and Critical Materials Proceedings*, November 13–14, 2015, Victoria, British Columbia. British Columbia Geological Survey Paper 2015-3. P. 23–29.

US DOE (U.S. Department of Energy) 2011. Critical materials strategy // DOE.2011. URL: http://www.energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf (дата обращения: 01.01.2023).

World Bank 2020. Minerals for climate action: The mineral intensity of the clean energy transition. Washington, DC: World Bank. 2020. URL: <https://www.commdev.org/publications/minerals-for-climate-action-the-mineral-intensity-of-the-clean-energy-transition/> (дата обращения: 10.01.2022).

World Mining Data 2024. URL: <https://www.world-mining-data.info/wmd/downloads/PDF/WMD%202024.pdf> (дата обращения: 13.07.2024).

Yin J., Yin H., Chao Y., Shi H. Energy and tellurium deposits // *AIMS Geosciences*. 2024. Vol. 10 (1). P. 28–42.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК: 551.761.2:551.242.5:550.93

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-19-32

ВОЗРАСТ ТЕТРАПОДНОЙ ФАУНЫ «MASTODONSAURUS» (СРЕДНИЙ ТРИАС) ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ РАДИОИЗОТОПНОГО U-PB LA-ICPMS ДАТИРОВАНИЯ. СТАТЬЯ 1. ЛИТОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ

Владимир Владимирович Силантьев¹✉, Анна Викторовна Куликова²,
Игорь Витальевич Новиков³, Анастасия Сергеевна Фелькер⁴,
Динара Надировна Мифтахутдинова⁵, Руслан Рустемович Габдуллин⁶,
Кажмурат Максutowич Ахмеденов⁷, Джамиля Болатовна Якупова⁸,
Евгения Михайловна Нуриева⁹, Яна Ягфаровна Саетгалеева¹⁰

¹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета, Джизак, Узбекистан; Vladimir.Silantiev@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2858-0708>

² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; ak_cool@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4263-5031>

³ Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва, Россия; Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; inovik@paleo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7400-5790>

⁴ Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка РАН, Москва, Россия; felkafelka95@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3734-2026>

⁵ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; Филиал Казанского (Приволжского) федерального университета, Джизак, Узбекистан; Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9115-1343>

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского, Москва, Россия; gabdullin@fgp.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

⁷ Западно-Казахстанский университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан; kazhmurat78@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7294-0913>

⁸ Западно-Казахстанский университет им. М. Утемисова, Уральск, Казахстан; yakupova_j@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3875-1224>

⁹ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; evgeniya.nurieva@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3234-0870>

¹⁰ Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; yana.saetgaleeva@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0002-9005-0775>

Аннотация. В статье приводятся новые данные о возрасте тетраподной фауны «*Mastodonsaurus*» (средний триас) Восточно-Европейской платформы. Анализ разреза и ихноценозов установил, что в эльтонское время осадконакопление протекало в основном в континентальной обстановке с эпизодическими трансгрессиями, тогда как в индерское время произошло постепенное тектоническое погружение территории от приливно-отливной зоны пляжа до зоны сублиторали солоноватоводного бассейна.

Ключевые слова: Восточно-Европейская платформа, Прикаспийская впадина, средний триас, континентальные отложения, ихнофоссилии, фауна тетрапод

Для цитирования: Силантьев В.В., Куликова А.В., Новиков И.В., Фелькер А.С., Мифтахутдинова Д.Н., Габдуллин Р.Р., Ахмеденов К.М., Якупова Д.Б., Нуриева Е.М., Саетгалеева Я.Я. Возраст тетраподной фауны «*Mastodonsaurus*» (средний триас) Восточно-Европейской платформы: первые данные радиоизотопного U-Pb LA-ICPMS датирования. Статья 1. Литологическая характеристика и условия формирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 19–32.

THE AGE OF THE TETRAPOD FAUNA “MASTODONSAURUS” (MIDDLE TRIASSIC) OF THE EAST EUROPEAN PLATFORM: FIRST U-PB LA-ICPMS RADIOISOTOPIC DATING RESULTS. ARTICLE 1. LITHOLOGICAL CHARACTERISTICS AND DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

Vladimir V. Silantiev¹✉, Anna V. Kulikova², Igor V. Novikov³, Anastasia S. Felker⁴,
Dinara N. Miftakhutdinova⁵, Ruslan R. Gabdullin⁶, Kazhmurat M. Akhmedenov⁷,
Jamilya B. Yakupova⁸, Evgeniya M. Nurieva⁹, Yana Ya. Saetgaleeva¹⁰

¹ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; Kazan Federal University, Branch in Jizzakh, Jizzakh, Republic of Uzbekistan; Vladimir.Silantiev@kpfu.ru ✉

² Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; ak_cool@mail.ru

³ Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow, Russia; Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; inovik@paleo.ru

⁴ Borissiak Paleontological Institute, Moscow, Russia; felkafelka95@gmail.com

⁵ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; Kazan Federal University, Branch in Jizzakh, Jizzakh, Republic of Uzbekistan; Dinara.Miftakhutdinova@kpfu.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@fgp.msu.ru

⁷ Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan; kazhmurat78@mail.ru

⁸ Utemisov West Kazakhstan University, Uralsk, Kazakhstan; yakupova_j@mail.ru

⁹ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; evgeniya.nurieva@kpfu.ru

¹⁰ Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; yana.saetgaleeva@yandex.ru

Abstract. The article provides new data on the age of the tetrapod fauna “*Mastodonsaurus*” (Middle Triassic) of the Eastern European Platform. An analysis of the strata succession and ichnofossils has revealed that during the Eltonian time, sedimentation took place mainly in a continental environment, with occasional transgressions. In the Inderian time, there was a gradual tectonic submergence of the area — from the intertidal zone of the beach to the sublittoral zone of a brackish-water basin.

Keywords: East European Platform, Pre-Caspian Depression, Middle Triassic, continental sediments, ichnofossils, tetrapod fauna

For citation: Silantiev V.V., Kulikova A.V., Novikov I.V., Felker A.S., Miftakhutdinova D.N., Gabdullin R.R., Akhmedenov K.M., Yakupova J.B., Nurieva E.M., Saetgaleeva Ya.Ya. The Age of the Tetrapod Fauna “*Mastodonsaurus*” (Middle Triassic) of the East European Platform: First U-Pb LA-ICP-MS Radioisotopic Dating Results. Article 1. Lithological Characteristics and Depositional Environment. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 19–32. (In Russ.).

Введение. Наземные позвоночные играют ведущую роль при расчленении и корреляции континентальных триасовых отложений Восточно-Европейской платформы и Приуралья. Последовательная смена этапов развития тетраподной фауны (прежде всего сообществ амфибий), характеризующаяся обновлением на родовом и более высоком таксономическом уровне, положена в основу биостратиграфической схемы континентального триаса этих структур.

Первые варианты этой схемы содержатся в работах И.А. Ефремова [Ефремов, 1937, 1952; Ефремов, Вьюшков, 1955], установившего в пермской части разреза четыре фаунистические зоны (I, II, III и IV), а в триасовой части три, из которых V и VI были отнесены к нижнему триасу, а зона VII — к среднему триасу. Исследования последующих десятилетий значительно усовершенствовали эту схему, уточнив состав и пересмотрев датировку фаунистических комплексов, составляющих ее основу [Шишкин, Очев, 1967, 1985; Новиков, 1991, 1994, 2018; Shishkin et al., 2000, 2023]. Так, М.А. Шишкин и В.Г. Очев [1967] разделили зону V на три части, а также выявили еще один исторический этап развития тетраподной фауны, промежуточный между зонами VI и VII. В связи с этими изменениями было предложено отказаться от нумерации зон и именовать их по руководящим родам темноспондильных амфибий, составляющих доминантную и наиболее хорошо изученную группу среди триасовых тетрапод Восточной Европы. В итоге в настоящее время последовательность триасовых тетраподных комплексов включает восемь фаун (в восходящем порядке): раннетриасовые *Tupilakosaurus*, *Selenocara-Syrptosuchus*, *Benthosuchus*, *Wetlugasaurus* и *Parotosuchus* и среднетриасовые *Komatosuchus*, *Eryosuchus* и *Mastodonsaurus*, причем фауны *Benthosuchus*, *Wetlugasaurus* и *Parotosuchus* включают по два более дробных этапа развития —

группировки [Shishkin et al., 2023]. Следует отметить, что история развития тетрапод в раннем триасе Восточной Европы по своей детальности и количеству выделяемых эволюционных эпизодов (до восьми) не имеет аналогов в мире и может использоваться в качестве глобального эталона. Уникальной особенностью раннетриасовых тетраподных сообществ Восточной Европы является то, что некоторые характерные роды амфибий, входящие в их состав, встречаются в прибрежно-морских отложениях совместно с фауной аммонитов. Это дает возможность прямой корреляции вмещающих отложений с Международной хроностратиграфической шкалой [Шишкин, Очев, 1985, 1999; Новиков, 2018; Shishkin et al., 2000, 2023].

Среднетриасовые фауны тетрапод, в отличие от раннетриасовых, совместно с аммонитами пока не встречены, и поэтому не могут быть прямо сопоставлены с подразделениями Международной хроностратиграфической шкалы. Основой для корреляции отложений, вмещающих среднетриасовые фауны тетрапод, служат прежде всего спорово-пыльцевые комплексы, неморские и лагунно-морские остракоды, а также сами остатки наземных позвоночных. При этом выводы о возрасте фаун тетрапод, как правило, опираются на сопоставления с триасом Германского бассейна или с альпийским разрезом [Шишкин, Очев, 1985, 1992; Shishkin et al., 2000, 2023].

Фауна «*Mastodonsaurus*» является наиболее поздней из среднетриасовых тетраподных комплексов Восточной Европы. Эта фауна открыта Б.П. Вьюшковым [1949] в Южном Приуралье и соответствует VII зоне И.А. Ефремова [Ефремов, 1937, 1952; Ефремов, Вьюшков, 1955]. Фауна характеризуется прежде всего доминированием в ориктоценозах большинства местонахождений остатков крупной темноспондильной амфибии из семейства *Mastodonsauridae*, относимой ранее к центральноев-

ропейскому роду *Mastodonsaurus* (в настоящее время восточноевропейская форма нуждается в родовом обособлении). Типовые местонахождения фауны приурочены к букобайской свите (букобайскому горизонту) Южного Приуралья и включают темноспондилов «*Mastodonsaurus*» *torvus*, трематозаврид-букобайин *Bukobaja enigmatica*, плагиозавров *Plagiosternum danilovi* и *Plagioscutum caspiense*, единичных ранних циклотозаврид (*Cyclotosaurus* (?) sp.), среди рептилий — дицинодонтов-каннемейерид (*Elephantosaurus jachimovitschi* и *Elatosaurus facetus*), эритрозухидных (*Chalishevina cothurnata*), рауизухидных (*Jushatyria vjushkovi*) и (?) попозавроидных (*Energosuchus garjainovi*) текодонтов, пролацертилий (*Malutinisuchus gratus*) и редких неопределимых териодонтов [Shishkin et al., 2023]. Сходный комплекс тетрапод (*Bukobaja* (?) sp., *Cyclotosauridae* gen. indet., реликтовая хронозухия *Synesuchus muravjevi*, *Malutinisuchus gratus*, *Energosuchus garjainovi*, дицинодонт *Planitorostris pechoriensis* и эозауроптеригия *Pistosaurus* (?) sp.) характеризует надкраснокаменскую свиту Большесынинской впадины Северного Приуралья [Новиков, 2019; Shishkin et al., 2023].

В юго-восточной части Восточно-Европейской платформы фауна «*Mastodonsaurus*» до последнего времени была достоверно известна лишь в одном местонахождении, расположенном на северо-западе Казахстана в районе оз. Индер, в зоне сочленения центральной, восточной и южной частей Прикаспийской впадины [Очев, Смагин, 1974; Липатова и др., 1982]. Это местонахождение, носящее наименование Мола Кара Бола Кантемир («Могила Черного Мальчика Кантемира»), по расположенному рядом с ним древнему казахскому мавзолею, приурочена к верхней подсвите индерской свиты. Здесь встречены почти все те же группы тетрапод, что и в Южном Приуралье — мастодонзавриды («*Mastodonsaurus*» sp.), букобайины (*Bukobaja* (?) sp.), плагиозавры (*Plagioscutum caspiense*), эритрозухиды (*Erythrosuchidae* gen. indet.), рауизухиды (*Rauisuchidae* gen. indet.) и дицинодонты (*Kannemeyeriidae* gen. indet.) [Ивахненко и др., 1997].

Согласно Актуализированной стратиграфической схеме триасовых отложений Прикаспийского региона [Кухтинов и др., 2016], верхняя подсвита индерской свиты соответствует верхней части индерского горизонта (остракодовая зона *Pulviella aralsorica*; палинологическая зона *Microcachryidites* — *Diatlanulisporites*), отвечающей верхней части верхнеанизийского подъяруса и самой нижней части ладинского яруса.

В 2022 г. авторам удалось изучить новый карьер Кок-Тау, вскрывший отложения среднего триаса в 4 км к северу-северо-западу от местонахождения Мола Кара Бола Кантемир. Эти отложения на основании литологических и седиментологических различий отнесены нами к нижней части индерской свиты и к самым верхним слоям подстилающей эльтонской свиты. В слоях, отнесенных к индер-

ской свите, встречено четыре уровня с остатками фауны «*Mastodonsaurus*» (атлант «*Mastodonsaurus*» и фрагмент межключицы *Plagioscutum caspiense*), а в самых верхних слоях, отнесенных к эльтонской свите, выявлен прослой измененного вулканического туфа, содержащего идиоморфные зерна циркона в количестве, достаточном для U-Pb LA-ICPMS датирования.

Цель исследования — уточнение стратиграфического положения фауны «*Mastodonsaurus*» в среднем триасе Прикаспийской впадины и датирование возраста отложений, подстилающих костеносные слои, методом U-Pb LA-ICPMS. Задачи включали в себя: 1) полевые исследования, детальное седиментологическое изучение разреза, поиск и сбор ископаемых остатков, ихнофоссилий, туфовых прослоев; 2) обоснование границы между эльтонской и индерской свитами; интерпретацию условий формирования осадков; 3) выделение цирконов из туфовых прослоев и морфологический анализ кристаллов; 4) U-Pb LA-ICP MS датирование зерен циркона.

Геологическая характеристика района исследования. Район исследований расположен в зоне сочленения центральной, восточной и южной частей Прикаспийской впадины [Липатова и др., 1982]. В пределах впадины триасовые отложения широко развиты, представлены всеми отделами, но в то же время редко выходят на дневную поверхность. Разрез нижнего и среднего триаса в районе оз. Индер является одним из таких выходов и поэтому изучен с достаточно высокой детальностью [Соколова, 1958, 1979; Липатова и др., 1982; Кухтинов, 1999; Кухтинов и др., 2016 и др.].

Нижний триас в районе оз. Индер представлен континентальными, преимущественно терригенными, реже карбонатно-терригенными, красноцветными и пестроцветными отложениями [Соколова, 1958, 1979; Кухтинов и др., 2016 и др.], несогласно перекрывающимися гипсоносные слои кунгурского яруса нижней перми (рис. 1).

Средний триас в районе оз. Индер включает эльтонскую и индерскую свиты, обнажающиеся по оврагам, промоинам и искусственным выработкам юго-западного склона хребта Кок-Тау.

Эльтонская свита (горизонт) выделена В.В. Липатовой [1974] в районе оз. Эльтон (Волгоградская область), расположенном в 400 км северо-западнее оз. Индер. Стратотипический разрез, принятый в интервале 1888–1986 м (мощность 98 м) Эльтонской опорной скважины, представлен преимущественно песчаниками и алевролитами светло-коричневой, реже темно-серой и буровато-серой окраски. Прослой глины, встречающиеся среди песчаников и алевролитов, окрашены в более яркие красновато-коричневые цвета. Характерной особенностью алевролитов и глины эльтонской свиты являются включения известковых стяжений или журавчиков [Липатова и др., 1982]. За пределами стратотипического района в верхней части эльтонской свиты

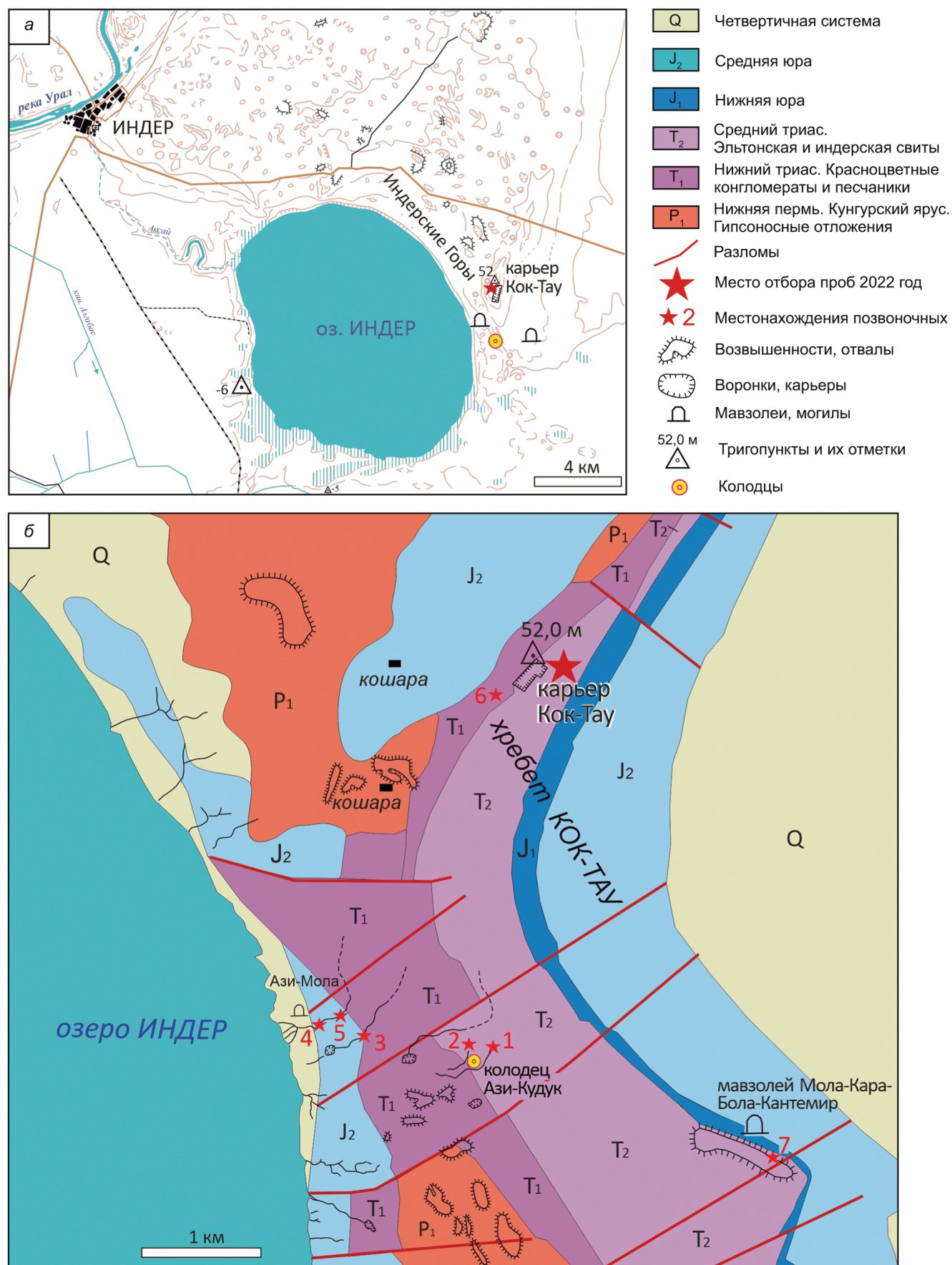


Рис. 1. Расположение карьера Кок-Тай: а — обзорная карта; б — геологическая карта (по листам М-39-XXXIV и М-39-XXXV, с изменением). Местонахождения позвоночных: 1 — Ази-Кудук I; 2 — Ази-Кудук II; 3 — Ази-Кудук III; 4 — Ази-Мола I; 5 — Ази-Мола II; 6 — Кок-Тай; 7 — Мола-Кара-Бала-Кантемир, по [Очев, Смагин, 1974]

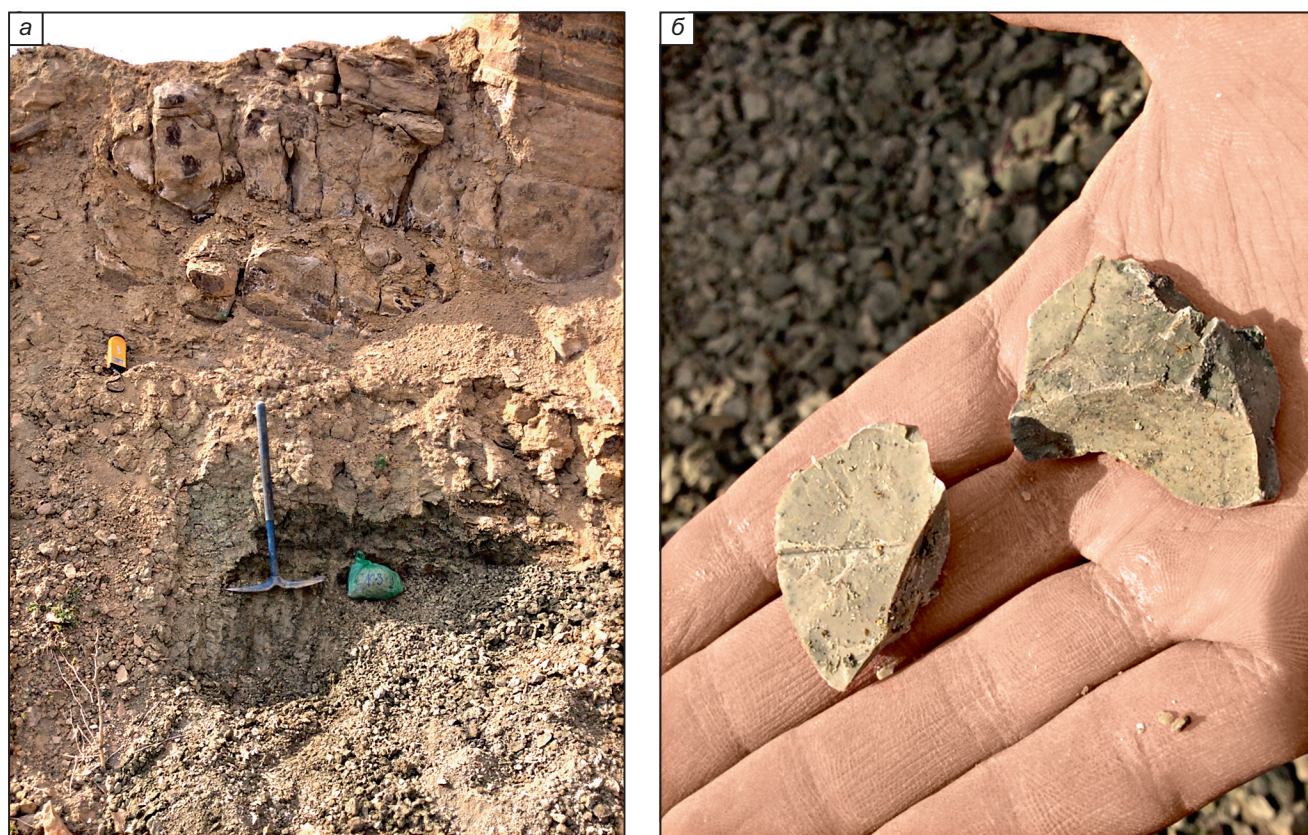


Рис. 2. Глина (преобразованный туфовый прослой), из которой были выделены цирконы для датирования: (а) прослой в обнажении, (б) образцы глины фарфоровидного неслоистого облика; самая верхняя часть интервала, отнесенного к эльтонской свите

встречаются известняки органогенно-обломочные, глинистые, тонкослоистые, с остатками растений, остракод, ракуши (*coquina*) двустворок.

Индерская свита (150–200 м) выделена Е.И. Соколовой в 1958 г. на хр. Кок-Тау на восточном побережье оз. Индер (Атырауская область) [Соколова, 1958]; позднее своеобразие палеонтологических комплексов остракод, двустворчатых моллюсков и тетрапод, позволило В.В. Липатовой [1974] установить на основе этой свиты индерский горизонт. Разрез свиты в стратотипе на хр. Кок-Тау, по Е.И. Соколовой [1958, 1979] представлен двумя мощными (по 40–50 м) пачками известняков, между которыми залегает пачка глинистых пород такой же мощности. По данным В.В. Липатовой и др. [1982, 1985] свита начинается с сероцветной песчано-глинистой пачки, которая вверх по разрезу сменяется известняками и мергелями. Глинистая пачка содержит остракоды, характерные для зоны *Glorianella indérica*, а известняки и мергели — для зоны *Pulviella aralsorica*, а также двустворки, харофиты и миоспоры. Выше лежащие отложения триаса в районе оз. Индер несогласно перекрываются юрскими отложениями.

Среднетриасовый возраст эльтонского и индерского горизонтов обосновывается сходством комплексов остракод, харофитов, двустворчатых моллюсков, миоспор с соответствующими комплексами из охарактеризованных цератитами среднетриасовых отложений Западной Европы [Липатова и др., 1982].

Материал и методы. Полевые работы проведены В.В. Силантьевым и А.С. Фелькер. Основное внимание было уделено поиску и фиксации седиментологических признаков, уровней с палеонтологическими и ихнологическими остатками, туфовых прослоев. Описание разреза сопровождалось послойным измерением магнитной восприимчивости полевым каппаметром КМ-7 (SatisGeo, Россия).

Детально изучен разрез (около 25 м) эльтонской и индерской свит среднего триаса в карьере Кок-Тау; описано четыре обнажения, выделено более 40 слоев. Установлено четыре стратиграфических уровня, включающих остатки фауны «*Mastodonsaurus*», а также сопутствующие уровни (около 50-ти) со скоплениями пресноводных и солоноватоводных беспозвоночных, растительных остатков, ихнофоссилий.

В разрезе зафиксировано три уровня палеопочв, в одном из которых обнаружен прослой неслоистой светлоокрашенной глины (рис. 2), представляющей преобразованный вулканический туф. Данный интервал отнесен к самым верхним слоям эльтонской свиты.

Методы анализа биотурбации и ихнофоссилий. Анализ седиментологических характеристик пород, таких как слоистость и биотурбация, выделение и определение отдельных ихнофоссилий, интерпретация обстановок осадконакопления проведены путем обобщения полевого описания разреза с ре-

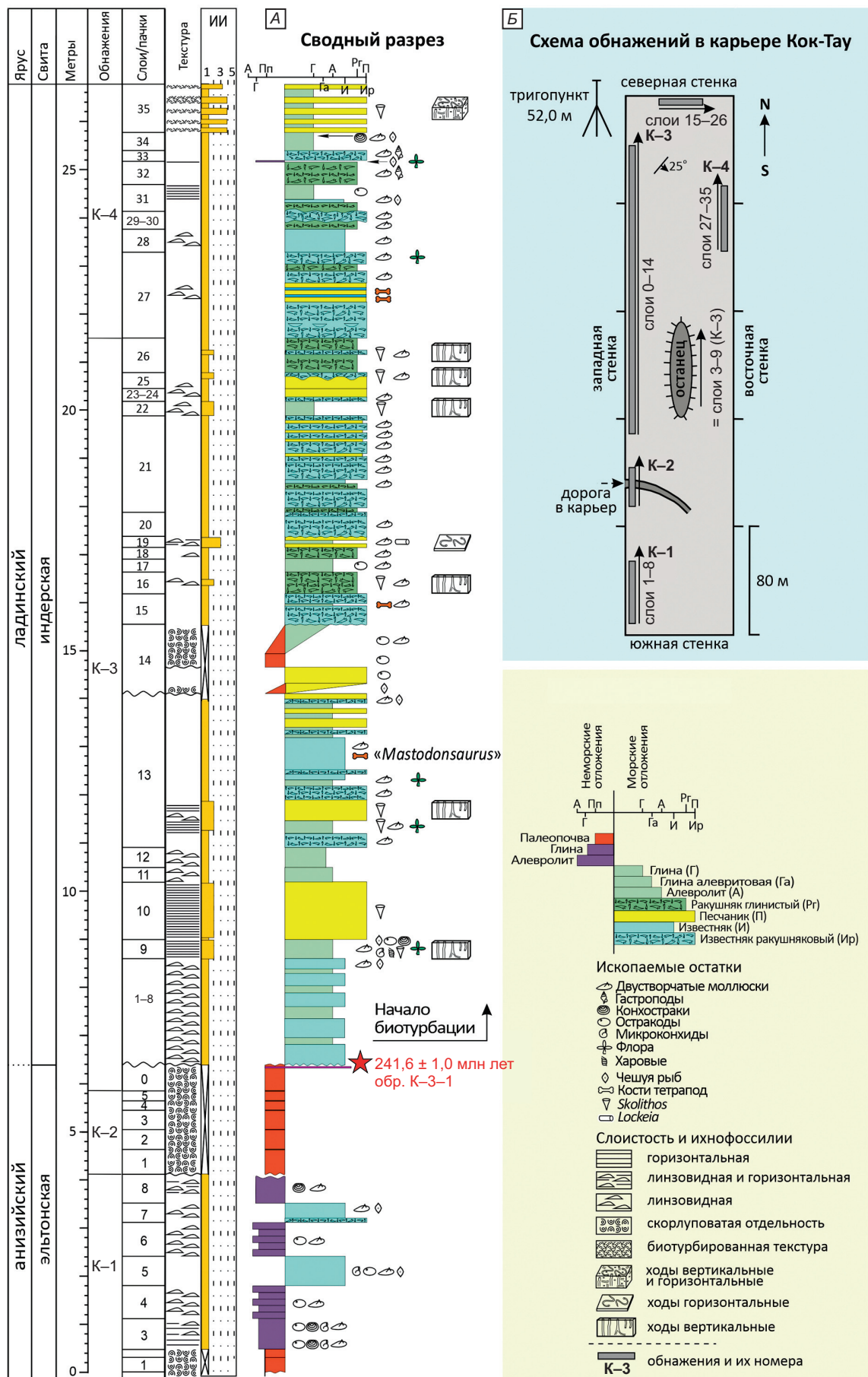


Рис. 3. Сводный разрез изученных отложений эльстонской и индерской свит (А) и схема карьера Кок-Тау с расположением обнажений (Б); ИИ — ихнотекстульный индекс

зультатами лабораторного изучения штучных пород, отобранных В.В. Силантьевым и А.С. Фелькер.

Изучение обнажений в стенках карьера позволило без масштабных зачисток проследить смену седиментологических признаков. На выветрелых стенках и поверхностях напластования хорошо выделяются следы жизнедеятельности организмов, часто сохранившиеся лишь частично из-за слабой цементации пород.

Характер взаимоотношений первичной слоистости и ее нарушения в результате биотурбации определен по методу ихнотекстурного анализа [Droser, Bottjer, 1984], выражающегося в виде значений ихнотекстурного индекса (ИИ). Ихнотекстурный индекс характеризует процент нарушения организмами первичной слоистости осадка и изменяется от 1 до 5, где 1 — это полное отсутствие биотурбации осадка, а значение 5 — его полная переработка, выраженная в полном замещении слоистости ихнофоссилиями разной степени сохранности [Микулаш, Дронов, 2006].

Для ихнофоссилий кроме непосредственной их диагностики проведен анализ стратиграфического распространения и соответствие ихноценозам. По комплексу седиментологических признаков и характеру ихноценозов определены ихнофации [Seilacher, 1967; Buatois, Mangano, 2011; Микулаш, Дронов, 2006].

Результаты исследования. Описание разреза. Сводный разрез изученных отложений (рис. 3, А) составлен по четырем обнажениям (К-1, К-2, К-3 и К-4), вскрытых в стенках небольшого (400×80 м) карьера, расположенного на водоразделе хребта Кок-Тау (рис. 1; 3, Б). Полотно карьера закрыто отвалами и осыпями, обнажения вскрыты преимущественно в западной стенке (К-1, К-2, К-3), в северной и восточной стенках (К-3 и К-4), в юго-восточном углу южной стенки (аналоги обн. К-3). В юго-западной части южной стенки наблюдается небольшой выход зеленовато-серых песчаников с растительными остатками, подстилающих слои обн. К-1 (эти песчаники не включены в описание разреза). Слои залегают моноκлиально, азимут падения 125°, угол падения 20–25°.

Эльтонская свита. Слои, отнесенные к эльтонской свите, вскрываются в обнажениях К-1, К-2 и в нижней части обнажения К-3 (рис. 3; 4, А–В). Основным критерием отнесения данного интервала к эльтонской свите служат палеопочвенные профили, залегающие в основании и в верхней части интервала, а также алевроито-глинистые породы, содержащие раковины конхострак и неморских двустворок.

Палеопочвенные профили (рис. 4, А–В) слагаются глинистыми алевролитами и глинами красновато-коричневой и зеленовато-серой окраски с яркими рыжими, зелеными и вишневыми пятнами глеизации. Породы обладают скорлуповатой отдельностью и включают многочисленные известковые стяжения

(нодули) неправильно-округлой формы (диаметром от 1 до 5–8 см). Известковые стяжения отличаются от вмещающих пород светло-серой окраской и часто формируют субвертикальные корневидные структуры. Иногда большое количество мелких известковых нодул придает породе сходство с гравелитом.

Прослой белой фарфоровидной неслоистой глины (измененный вулканический туф, обр. К-3-1) встречен в самом верхнем палеопочвенном профиле, представленном зеленой глиной с яркими фиолетовыми пятнами (рис. 3; 6, В).

Алевролиты и глины (рис. 4, А) окрашены преимущественно в серый цвет с зеленым и коричневыми оттенками; обладают тонкой горизонтальной и линзовидной слоистостью. Мягкие глинистые слои чередуются с более твердыми известковистыми плитчатыми прослоями. На плоскостях наслоения встречаются остракоды, спиральные раковины микроконхид, конхостраки, а также мелкие неморские двустворки с униовидными (*Utschamiella* ?) и субтреугольными (*Neomrassiella* ?) очертаниями раковин.

Известняки, встречающиеся в данном интервале, имеют подчиненное значение, составляя около 15 % от его мощности. Известняки органогенно-обломочные серые, плотные, звонкие; обнажаются либо единым пластом, либо разделяются на серию плиток с неровными плоскостями напластования. В основании слоя 7 отмечен ракушняк (0,15 м), сложенный раковинами мелких двустворок и включающий редкие чешуйки рыб. В верхней половине слоя ракушняк начинает разделяться на прослой, в которых раковины двустворок захоронены, в том числе, и в вертикальном положении. Совместно с двустворками и чешуей рыб встречаются раковины микроконхид и конхострак.

Характерной особенностью известняков, глин и алевролитов данного интервала является горизонтальная и линзовидная слоистость, и полное отсутствие следов биотурбации первичного осадка.

Индерская свита. Интервал, отнесенный к индерской свите, сложен главным образом известняками, включающими подчиненные прослой песчаников, алевролитов и глин, а также редкие палеопочвенные образования небольшой мощности (обн. К-3 и К-4; рис. 3; 4, В–Ж).

Известняки окрашены, как правило, в коричневатый-серый цвет, с желтоватыми, зеленоватыми и фиолетовыми оттенками; встречаются отдельные прослой розового, темно-серого (почти черного) цвета. Наиболее часто встречаются ракушняковые известняки, состоящие из обломков раковин двустворчатых моллюсков, погруженных в мелко- и тонкозернистый карбонатный матрикс; в ряде случаев наблюдается уменьшение размерности обломков раковин снизу вверх, от подошвы к кровле слоя. По простиранию пласты известняка могут расщепляться прослойками более мягкой глинисто-алевритовой породы, приобретая «слоистый вид» (рис. 4, Е, сл. 27). Пласты известняков имеют

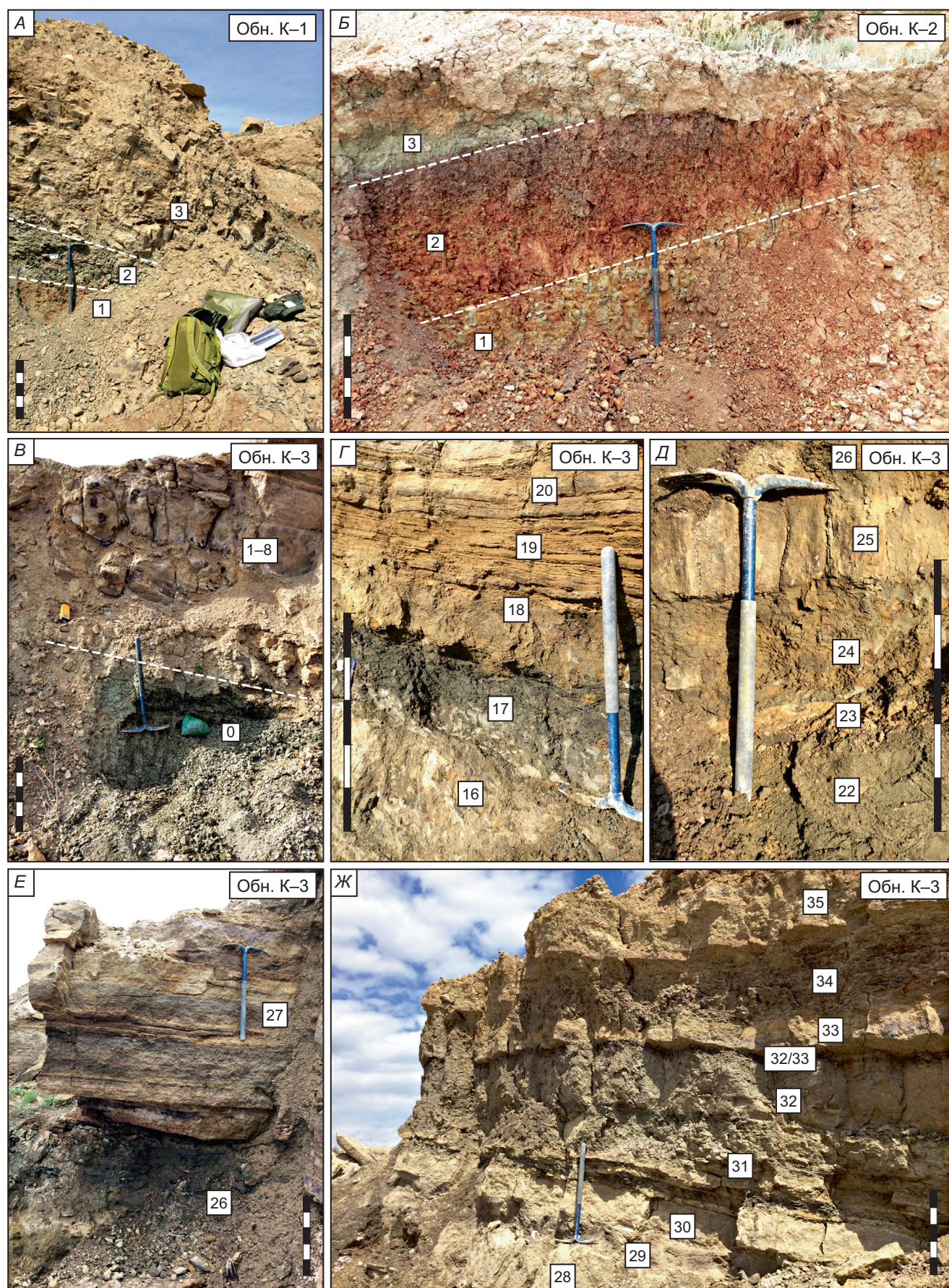


Рис. 4. обнажения эльтонской и индерской свит в карьере Кок-Тай. А — обнажение эльтонской свиты в западной стенке карьера (нижние слои обн. К-1); Б — обнажение палеопочв эльтонской свиты в южном врезе дороги на карьер (обн. К-2, слои 1–3); В — контакт эльтонской и индерской свит в обнажении К-3; кайло указывает на место отбора образца К-3-1 (измененный вулкани-

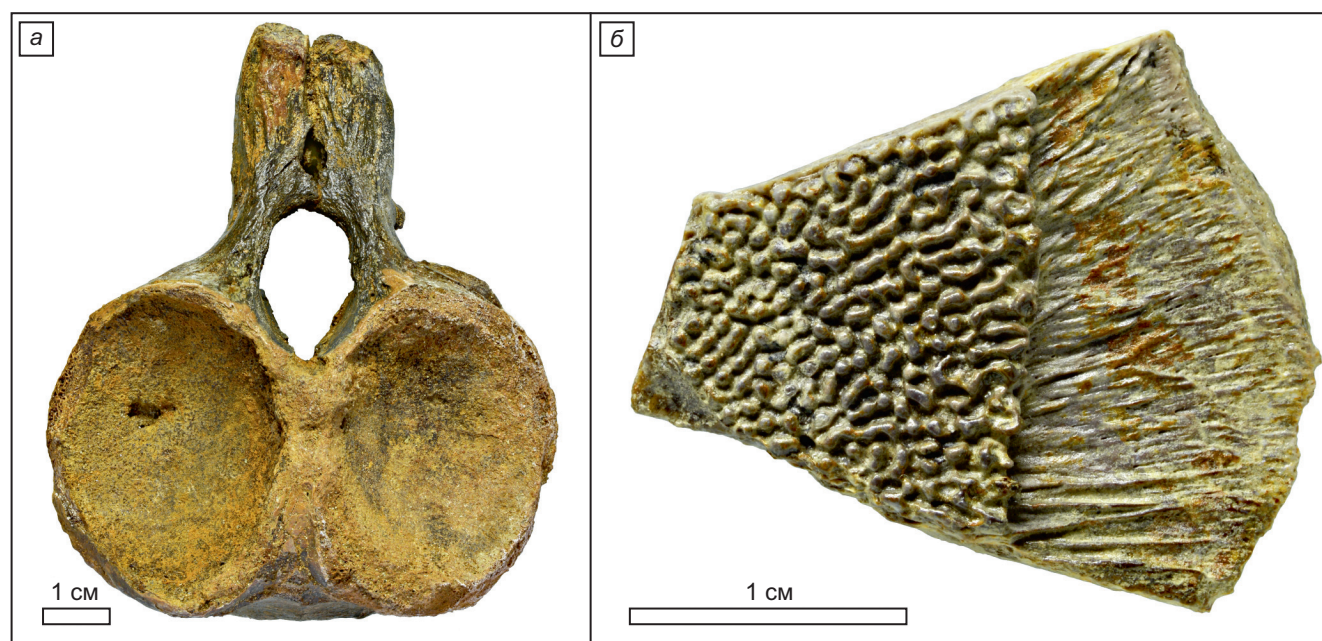


Рис. 5. Остатки тетрапод из индерской свиты: а — атлант «*Mastodonsaurus*» sp. (вид спереди); карьер Кок-Тай, обн. К-3, пачка 13; б — фрагмент межключицы плагиозавра *Plagioscutum caspiense* (вид снизу); местонахождение Мола Кара Бола Кантемир

неровные, часто бугристые поверхности подошвы и кровли, к которым приурочены скопления чешуи рыб и кости тетрапод (рис. 5).

Ракушняки глинистые представляют собой алевроито-карбонатную породу темно-серой окраски, включающую до 30 % (и более) разноразмерной, несортированной ракуши солоноватоводных двусторчатых моллюсков. Слоистость у таких пород либо тонкая линзовидная, либо отсутствует. Наблюдаются отдельные участки, содержащие либо обугленный растительный детрит, либо скопления ракуши с сохранившимися целыми раковинами.

Песчаники полимиктовые слюдистые, мелкозернистые; обычно окрашены в зеленовато-серый, зеленовато-коричневый (табачный) цвет и образуют в обнажениях хорошо выраженные пласты. Особенность песчаников — тонкая горизонтальная слоистость, иногда подчеркнутая тонкими прослойками зерен магнетита и часто прерываемая вертикальными ходами *Skolithos*. Некоторые слои песчаников содержат в нижней половине редкие раковины двустворок, расположенные в прижизненном положении; в верхней половине таких слоев обломков раковин двустворок становится больше; наблюдаются «карманы», заполненные ракушей. Поверхности подошвы и кровли песчаников часто неровные и бугристые.

Алевролиты глинистые и песчано-алевровитовые глины имеют обычно зеленовато-серую окраску и характеризуются тонкой горизонтальной слоистостью. На плоскостях наложения встречаются раковины

микроконхид, остракод, конхострак, двустворок, чешуя рыб, редкие харофиты и остатки растений (рис. 6). Горизонтальная слоистость часто нарушена ходами *Skolithos*, сохраняющимися на выветрелых поверхностях обнажений (рис. 7, А).

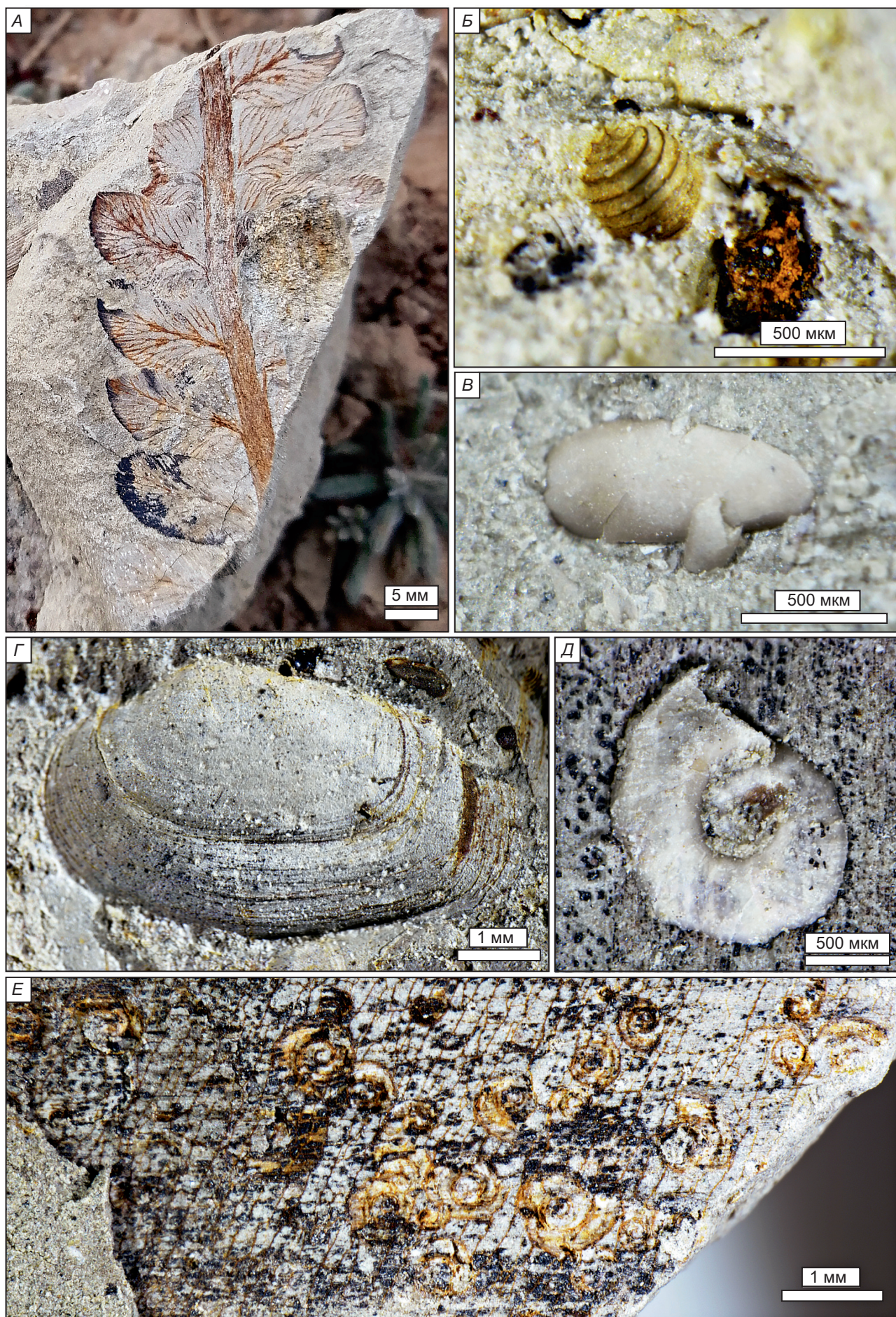
Палеопочвы представлены алевроито-глинистыми породами зеленовато-серого цвета с ярко вишневыми пятнами глинистого материала и карбонатными нодулями. Отличие от палеопочв эльтонской свиты заключается в присутствии в породах песчаного материала.

Более подробное описание разреза приведено в Приложении 1.

Биотурбация и ихнофоссилии. Ихнофоссилии встречаются только в отложениях индерской свиты, некоторые интервалы которой отличаются достаточно сильной биотурбацией (ИИ — 4, до 75 % переработки) на фоне ракушняковых известняков и глин, в которых биотурбация отсутствует. Отдельные ихнофоссилии сохранились в некоторых слоях песчаников и алевролитов, их таксономическое разнообразие невелико. В изученном разрезе определено 5 ихнотаксонов: *Skolithos*, *Lockeia*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Ophiomorpha* (рис. 7).

Первые признаки биотурбации зафиксированы в слое 9, в песчано-алевровитовой глине, сохранившей достаточно крупные ходы вертикального передвижения и жилища *Skolithos* (рис. 7, А). Длина сохранившихся ходов достигает 10 см, диаметр — от 0,5 до 2 см. Ходы *Skolithos* пронизывают нижние 15 см слоя 10, и отмечены в песчаных прослоях пачки

ческий туф); Г — переслаивание глин, алевролитов и ракушняковых известняков (обн. К-3, сл. 16–20); Д — последовательный переход глины в алевролит, песчаник и ракушняк (обн. К-3, сл. 22–26); Е — резкий контакт ракушнякового алевролита (слой 26) с ракушняковым известняком (слой 27) (обн. К-3); Ж — общий вид на обн. К-4, вскрывающего верхние слои описанного разреза. Цифры на фотографиях обозначают номера слоев



известняков слоя 13. Таким образом, нижняя половина изученного разреза индерской свиты (обн. К-3, сл. 1–18) ихнологически однообразна.

Средняя часть изученного разреза индерской свиты (обн. К-3, сл. 19–34) биотурбирована слабо, и только в отдельных интервалах ихнофоссилии представлены приуроченными к отдельным слоям вертикальными ходами *Skolithos* и следами отдыха двустворчатых моллюсков *Lockeia* (обн. К-3, сл. 19). Ходы *Lockeia* встречаются на поверхностях напластования песчаников и представлены выпуклыми, вытянутыми и заостренными на концах миндалевидными образованиями (рис. 7, Б, В).

В верхней части изученного разреза индерской свиты (обн. К-3, сл. 35) разнообразие и количество ихнофоссилий резко увеличивается. Здесь, кроме ходов *Skolithos* и *Lockeia* в слоях песчаников зафиксированы многочисленные сложные, соединенные друг с другом, вертикальные и субгоризонтальные туннели (рис. 7, Г, Д, Е). В некоторых случаях, внутренние полости туннелей полностью промыты от заполняющей породы, и выглядят как полые ветвящиеся каналы. Сохранность не позволяет произвести их точную диагностику, но общая архитектура туннелей напоминает ихнотаксон *Thalassinoides* (рис. 7, Г).

Некоторые поверхности напластования песчаников (обн. К-3, сл. 35) почти полностью покрыты тонкими горизонтальными ходами, диаметром 1–2 мм и длиной сохранившихся фрагментов до 10 см. Ходы часто накладываются и пересекают друг друга. Неполная сохранность выветрелых поверхностей песчаников затрудняет определение истинного характера ветвлений и, соответственно, диагностику этих ходов (рис. 7, Д). Отдельные прямые или слегка изогнутые неветвящиеся ходы (длиной до 10 см, диаметром до 5 мм), с округлым сечением, четкими, гладкими стенками, массивным, аналогичным вмещающей породе заполнением, можно отнести к ихнороду *Palaeophycus*.

Несколько горизонтальных ходов песчаников (обн. К-3, сл. 35) отличаются довольно выраженной скульптурой стенок, представленной маленькими бугорками, и имеют фрагменты Y-образных ветвлений. Указанные признаки позволяют с долей условности отнести эти ходы к ихновиду *Ophiomorpha irregulaire*, характеризующемуся преимущественно горизонтальной ориентацией ходов, редкими вертикальными элементами и неравномерной скульптурой (рис. 7, Е).

Организмы-следопроизводители ихнофоссилий *Skolithos*, *Lockeia*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Ophiomorpha* относились, согласно [Knaust, 2017], к организмам-сестонофагам (фильтраторам), питавшимся взвесью и осадком. По этологической

Т а б л и ц а

Этологические и трофические группы продуцентов
ихнофоссилий индерской свиты

Ихнотаксон	Этологическая группа по [Seilacher, 1964]	Трофическая группа по [Кнауст, 2017]
<i>Skolithos</i>	следы жилища	поедатели суспензии
<i>Lockeia</i>	следы отдыха/ следы жилища	
<i>Thalassinoides</i>	следы жилища/ следы питания	
<i>Palaeophycus</i>		
<i>Ophiomorpha irregulaire</i> (?)		поедатели суспензии/ осадка

классификации встреченные ихнотаксоны представляют следы жилищ (*domichnia*), отдыха (*cubichnia*) и питания (*fodinichnia*) [Seilacher, 1964] (таблица).

Обстановки осадконакопления и ихнофации. Эльтонская свита в изученном разрезе лишена ихнофоссилий и биотурбации; ее седиментологические признаки: палеопочвенные профили с глеизацией, неморская фауна, следы корневых систем растений указывают преимущественно на континентальные обстановки с периодическим затоплением. Нижняя часть изученного разреза индерской свиты (обн. К-3, сл. 1–18) практически лишена сохранившихся ихнофоссилий и содержит только вертикальные ходы *Skolithos* — ихнотаксон, распространенный в широком диапазоне обстановок от континентальных до достаточно глубоководных (подводных конусов выноса) морских обстановок, но наиболее характерный для приливно-отливной зоны морских бассейнов [Микулаш, Дронов, 2006; Seilacher, 1967; Nasiat, 2010; Knaust, 2017].

В средней части изученного разреза (обн. К-3, сл. 19–34) определен ихнотаксон *Lockeia*, встречающийся от приливно-отливных зон до проксимальных частей среднего шельфа (*offshore*) морских бассейнов (крузиановая ихнофация) [Buatois, Mangano, 2011]. Считается, что этот ихнотаксон образован двустворчатыми моллюсками [Bromley, 1996].

В верхней части разреза (обн. К-3, сл. 35) разнообразие и количество ихнофоссилий увеличивается. Ихноценоз включает *Skolithos*, *Lockeia*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus*, *Ophiomorpha*, характеризующихся ихнофациальной транзитностью и встречающихся в достаточно обширном диапазоне обстановок (от прибрежно-морских до глубоководного шельфа) [Buatois, Mangano, 2011, Knaust, 2017]. Преобладание горизонтальных ходов, включающих следы отдыха, жилищ и питания, свидетельствует в пользу принадлежности вмещающих пород к крузиановой их-

Рис. 6. Наиболее распространенные ископаемые остатки эльтонской и индерской свит в разрезе карьера Кок-Тау: А — фрагмент папоротника *Cladophlebis (Todites) cf. roesserti* (обн. К-3, сл. 9); Б — гиригонит харовых водорослей (обн. К-3, сл. 9); В — раковина остракоды (обн. К-1, сл. 3); Г — внутреннее ядро раковины двустворчатого моллюска (обн. К-3, сл. 9); Д — раковина микроконхиды (обн. К-3, сл. 9); Е — скопление раковин микроконхид на листе растения (обн. К-3, сл. 9)

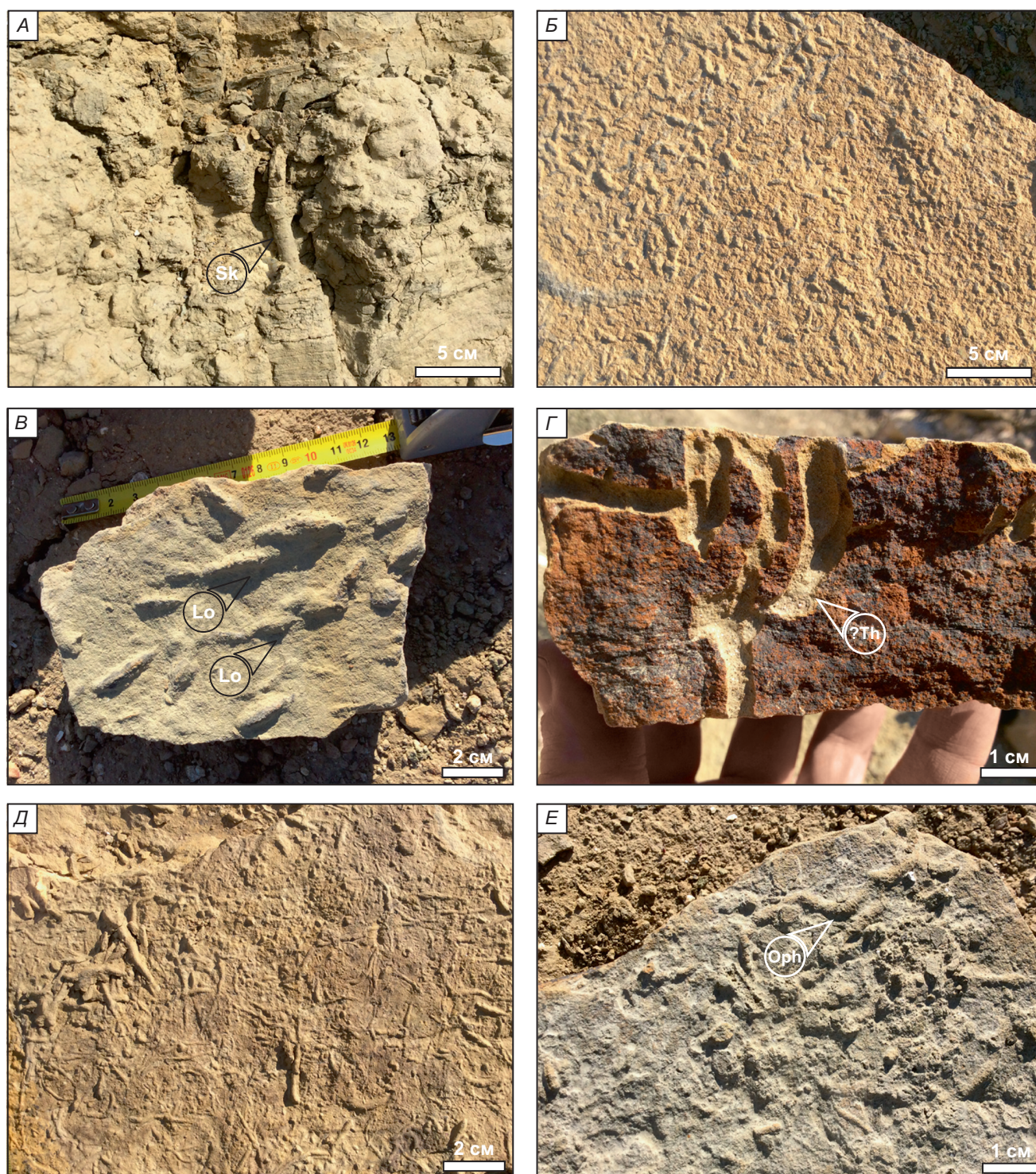


Рис. 7. Иchnofossils индерской свиты в разрезе карьера Кок-Тай: А — Ходы *Skolithos* (Sk) в выветрелой стенке обнажения, обн. К-3, сл. 9; Б, В — поверхности напластования песчаника с многочисленными следами отдыха двустворчатых моллюсков *Lockeia* (Lo); обн. К-3, сл. 19; Г — вертикальное сечение песчаника с системой соединяющихся вертикальных и субгоризонтальных туннелей, напоминающих *Thalassinoides* (?Th), обн. К-4, сл. 35; Д — поверхность напластования песчаника с многочисленными горизонтальными ходами *Palaeophycus*, обн. К-4, сл. 35; Е — поверхность напластования песчаника с многочисленными горизонтальными ходами и *Ophiomorpha irregulaire* (Oph), обн. К-4, сл. 35

нофации, которая обычно [Микулаш, Дронов, 2006; Buatois, Mangano, 2011] развивается на плохо сортированных грунтах сублиторали, формирующихся между уровнями воздействия слабых и штормовых волн. Такие седиментологические характеристики

пород индерской свиты как хорошая сортировка и тонкая слоистость пород, обилие битой ракуши и многообразие бентосной фауны также указывают [Селли, 1989] на осадконакопление в мелководных условиях.

В целом, увеличение разнообразия и количества ихнофоссилий снизу вверх по изученному разрезу индерской свиты указывает на постепенное углубление рассматриваемой территории в индерское время, и изменение обстановок от приморской континентальной обстановки и приливно-отливной зоны пляжа до зоны сублиторали, лежащей между уровнями воздействия слабых и штормовых волн.

Выводы. Полевые исследования и детальное седиментологическое изучение разреза среднего триаса в районе оз. Индер выявили дополнительные различия в строении эльтонской и индерской свит: эльтонская свита — существенно континентальная с палеопочвами; индерская — преимущественно прибрежно-морская (солончатоводная) с ракушечниковыми известняками и глинами, что может быть

использовано для обоснования границы между этими свитами.

Изменение в комплексах ихнофоссилий свидетельствует о постепенной трансгрессии моря и осадконакоплении индерской свиты на глубинах между уровнями воздействия слабых и штормовых волн.

Финансирование. Исследование выполнено за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета (ПРИОРИТЕТ-2030). Полевые работы профинансированы Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках грантового финансирования № АР 19177208 «Изучение биоразнообразия ископаемых морских рептилий в Западном Казахстане». Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вьюшков Б.П. Некоторые замечания о триасовых отложениях Южного Приуралья // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1949. Т. 24, вып. 2. С. 63–88.

Ефремов И.А. О стратиграфии пермских красноцветов СССР по наземным позвоночным // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1952. № 6. С. 49–75.

Ефремов И.А. О стратиграфическом подразделении континентальной перми и триаса СССР по фауне наземных позвоночных // Докл. АН СССР. Нов. сер. 1937. Т. 16, № 2. С. 125–132.

Ефремов И.А., Вьюшков Б.П. Каталог местонахождений пермских и триасовых наземных позвоночных на территории СССР. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 185 с. (Тр. Палеонтол. ин-та АН СССР. Т. 46).

Ивахненко М.Ф., Голубев В.К., Губин Ю.М. и др. Пермские и триасовые тетраподы Восточной Европы. М.: ГЕОС, 1997. 216 с. (Тр. Палеонтол. ин-та РАН. Т. 268).

Кухтинов Д.А. О среднем триасе Северного Прикаспия в связи с проблемами межрегиональной корреляции // Вопросы общей стратиграфической корреляции: Межвуз. сб. науч. тр. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. С. 76–103.

Кухтинов Д.А., Ярошенко О.П., Шишкин М.А. и др. Актуализированная стратиграфическая схема триасовых отложений Прикаспийского региона. М.: ФГБУ «ВНИГНИ», 2016. 36 с.

Липатова В.В. Триас юго-востока Восточно-Европейской платформы: Автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук. Л.: ВСЕГЕИ, 1974. 40 с.

Липатова В.В., Волож Ю.А., Самодуров В.И., Светлакова Э.А. Триас Прикаспийской впадины и перспективы его нефтегазоносности / Отв. ред. В.В. Липатова. М.: Недр, 1982. 152 с. (ВНИГНИ. Труды. Вып. 236).

Липатова В.В., Очев В.Г., Блом Г.И. и др. Проект унифицированной схемы триаса Восточно-Европейской платформы // Триасовые отложения Восточно-Европейской платформы. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1985. С. 11–28.

Микулаш Р., Дронов А.В. Палеоихнология — введение в изучение ископаемых следов жизнедеятельности. Прага, 2006. 122 с.

Новиков И.В. Биостратиграфия континентального триаса Тимано-Североуральского региона по фауне тетрапод. М.: Наука, 1994. 139 с. (Тр. Палеонтол. ин-та РАН. Т. 261).

Новиков И.В. Комплексы триасовых тетрапод Тимано-Североуральского региона и сопредельных территорий // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2019. Т. 94, вып. 2. С. 33–37.

Новиков И.В. О биостратиграфической схеме нижнего триаса Восточной Европы по фауне тетрапод // Докл. АН СССР. 1991. Т. 318, № 2. С. 433–437.

Новиков И.В. Раннетриасовые амфибии Восточной Европы: эволюция доминантных групп и особенности смены сообществ. М.: РАН, 2018. 358 с. (Тр. Палеонтол. ин-та РАН. Т. 296).

Очев В.Г., Смагин Б.Н. О местонахождениях триасовых позвоночных у озера Индер // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1974. Т. XLIX, Вып. 3. С. 74–81.

Соколова Е.И. Пермские и триасовые отложения западной и южной частей Прикаспийской впадины. Л.: Гостехиздат, 1958. 101 с. (Тр. ВНИГРИ, вып. 113).

Соколова Е.И. Триасовые нефтеносные отложения различных геоструктурных зон Прикаспийской впадины // Структурные особенности и перспективы нефтегазоносности осадочного комплекса Прикаспийской впадины. Л., 1979. С. 59–83. (Труды ВНИГРИ, вып. 430).

Шишкин М.А., Очев В.Г. Значение наземных позвоночных для стратиграфии триаса Восточно-Европейской платформы // Триасовые отложения Восточно-Европейской платформы. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1985. С. 28–43.

Шишкин М.А., Очев В.Г. О возрасте эриозуховой и мастодонзавровой фаун позвоночных Восточной Европы // Изв. РАН. Сер. геол. 1992. № 7. С. 28–35.

Шишкин М.А., Очев В.Г. Фауна наземных позвоночных как основа стратификации континентальных триасовых отложений СССР // Стратиграфия и палеонтология мезозойских и палеоген-неогеновых континентальных отложений азиатской части СССР. Л.: Наука, 1967. С. 74–82.

Bromley R.G. Trace fossils. Second edition. London: Chapman & Hall, 1996. 362 p.

Buatois L., Mangano M.G. Ichnology. Organism-Substrate Interaction in Space and Time. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. 358 p.

Droser M.D., Bottjer D.J. A semiquantitative field classification of ichnofabric // J. Sediment. Petrolog. 1986. Vol. 56. P. 556–559.

Hasiotis S.T. Continental trace fossils // SEPM Short Course Notes. 2010. Vol. 51. P. 1–132.

Knaust D. Atlas of Trace Fossils in Well Core: Appearance, Taxonomy and Interpretation. Switzerland: Springer, 2017. 209 p.

Seilacher A. Bathymetry of trace fossils // *Mar. Geol.* 1967. Vol. 5. P. 413–428.

Seilacher A. Biogenis sedimentary structures // *Approaches to Paleoecology* / Eds. J. Imbrie and N. Newell. N. Y.: Wiley, 1964. P. 296–316.

Shishkin M.A., Novikov I.V., Sennikov A.G., et al. Triassic tetrapods of Russia // *Paleontol. J.* 2023. No. 12. P. 1353–1539.

Shishkin M.A., Ochev V.G., Lozovskii V.R., Novikov I.V. Tetrapod biostratigraphy of the Triassic of Eastern Europe // *The Age of Dinosaurs in Russia and Mongolia* / Eds. M.J. Benton, M.A. Shishkin, D.M. Unwin, E.N. Kurochkin. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. P. 120–139.

Статья поступила в редакцию 07.01.2025,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 56.016.4-551.763.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-33-50

ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЧЕСКИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЗДНЕМЕЛОВЫХ ОСАДКОВ УЛЬЯНОВСКО-САРАТОВСКОГО ПРОГИБА, СОДЕРЖАЩИХ ЯДРА НОР ЧЕРВЕЙ-ПОЛИХЕТ

Алексей Викторович Иванов¹✉, Руслан Рустемович Габдуллин²,
 Андрей Герасимович Сенников³, Александр Сергеевич Бакаев⁴,
 Игорь Витальевич Новиков⁵, Светлана Юрьевна Маленкина⁶,
 Наталья Викторовна Бадулина⁷, Искандер Рустамович Мигранов⁸,
 Елена Васильевна Яковичина⁹, Сергей Александрович Струлев¹⁰,
 Наталия Евгеньевна Беспалько¹¹

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт географии РАН, Москва, Россия; Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия; ivanovav@igras.ru ✉, <http://orcid.org/0000-0003-2788-0215>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; gabdullin@fgp.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

³ Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, Москва, Россия; sennikov@paleo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1932-0907>

⁴ Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка, Москва, Россия; Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия; Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия; alexandr.bakaev.1992@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3185-6851>

⁵ Палеонтологический институт им. А.А. Борисяка Российской академии наук, Москва, Россия; inovik@paleo.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; maleo@mail.ru

⁷ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nvbadulina@mail.ru, IstinaresearcherID (IRID): 427730

⁸ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского, Москва, Россия; iskandermig@mail.ru

⁹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yakovichina@mail.ru

¹⁰ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия; wolk231184@mail.ru

¹¹ Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия; nata.bespalko@mail.ru

Аннотация. Впервые приведено описание местонахождений нор червей-полихет *Lepidenteron lewesiensis* в верхнемеловых отложениях Нижнего Поволжья, дана комплексная литолого-палеонтологическая характеристика верхнемеловых образований Ульяновско-Саратовского прогиба. Предложены палеоэкологические модели условий обитания палеоценозов, уточнены палеогеографические условия формирования осадков, содержащих норы полихет.

Ключевые слова: местонахождения, норы *Lepidenteron lewesiensis*, полихеты, костистые рыбы, поздний мел, Нижнее Поволжье, палеоэкологические модели

Для цитирования: Иванов А.В., Габдуллин Р.Р., Сенников А.Г., Бакаев А.С., Новиков И.В., Маленкина С.Ю., Бадулина Н.В., Мигранов И.Р., Яковичина Е.В., Струлев С.А., Беспалько Н.Е. Палеоэкологические и палеогеографические реконструкции условий формирования позднемерловых осадков Ульяновско-Саратовского прогиба, содержащих ядра нор червей-полихет // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 33–50.

PALAEOECOLOGICAL AND PALAEOGEOGRAPHICAL RECONSTRUCTIONS OF FORMATIONAL CONDITIONS FOR LATE CRETACEOUS SEDIMENTS OF ULYANOVSK-SARATOV FOREDEEP, COMPRISING FINDS OF THE BURROWS OF THE POLYCHAETE WORMS

Aleksey V. Ivanov¹✉, Ruslan R. Gabdullin², Andrey G. Sennikov³, Aleksander S. Bakaev⁴,
 Igor V. Novikov⁵, Svetlana Yu. Malenkina⁶, Natalya V. Badulina⁷, Iskander R. Migrantov⁸,
 Elena V. Yakovichina⁹, Sergey A. Strulev¹⁰, Natalia E. Bepalko¹¹

¹ Lomonosov Moscow State University; Institute of Geography RAS, Moscow, Russia; Tambov State Technical University, Tambov, Russia; ivanovav@igras.ru ✉

² Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@fgp.msu.ru

³ Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow, Russia; sennikov@paleo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1932-0907>

⁴ Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow, Russia; Udmurt State University, Izhevsk, Russia; Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia; alexandr.bakaev.1992@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3185-6851>;

⁵ Borissiak Paleontological Institute of RAS, Moscow, Russia; inovik@paleo.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; maleo@mail.ru

⁷ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nvbadulina@mail.ru

⁸ Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; iskandermig@mail.ru

⁹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yakovishina@mail.ru

¹⁰ Tambov State Technical University, Tambov, Russia; wolk231184@mail.ru

¹¹ Tambov State Technical University, Tambov, Russia; nata.bespalko@mail.ru

Abstract. For the first time, the localities of the burrows of *Lepidenteron lewesiensis* polychaete worms in the Upper Cretaceous sediments of the Lower Volga region are described, and a comprehensive lithological and paleontological characteristic of the Upper Cretaceous formations of the Ulyanovsk-Saratov trough is given. Paleocological models of paleocenosis habitats are proposed, and paleogeographic conditions for the formation of sediments containing polychaete burrows are clarified.

Keywords: localities, burrows of *Lepidenteron lewesiensis*, polychaetes, bony fish, Late Cretaceous, Lower Volga region, paleocological models

For citation: Ivanov A.V., Gabdullin R.R., Sennikov A.G., Bakaev A.S., Novikov I.V., Malenkina S. Yu., Badulina N.V., Migranov I.R., Yakovishina E.V., Strulev S.A., Bespalko N. E. Palaeocological and palaeogeographical reconstructions of formational conditions for Late Cretaceous sediments of Ulyanovsk-Saratov foredeep, comprising finds of the burrows of the polychaete worms. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 33–50. (In Russ.).

Введение. В осадках позднемиоценовых и палеогеновых морских бассейнов Западной и Центральной Европы широко распространены ихнофоссилии *Lepidenteron lewesiensis* — неразветвленные, слабо изогнутые или почти прямые, округлые или овальные в сечении ядра ходов, содержащие чешую и кости рыб. Подобные ходы были обнаружены также в морских верхнемеловых отложениях Крыма [Барбошкин и др., 2020]. Недавно авторами описаны подобные объекты из различных интервалов верхнего мела Среднего и Нижнего Поволжья, интерпретированные как ядра нор хищных полихет, охотившихся на рыб на морском дне и поедавших их трупы (рис. 1) [Иванов и др., 2024а, 2024б; Сенников и др., 2025].

Одним из ключевых признаков, позволяющих диагностировать встреченные ихнообразования как ядра ходов червей-полихет, является наличие внутри них скоплений остатков рыб. Следует обратиться к общим особенностям ископаемых остатков позднемиоценовых рыб в Поволжье, которые разнообразны и разноразмерны. Находки сочлененных элементов скелета редки — в подавляющем большинстве случаев материал представлен отдельными костями, зубами, чешуями. *Макроразмерные* (сантиметры и более) остатки встречаются преимущественно в терригенных отложениях — крупные зубы акул, скатов, челюстные пластины химер. Наиболее крупными представителями рыб в позднемиоценовое время на рассматриваемой территории были лососевые — до 3 м; сохраняются крупные гвоздевидные зубы и осетровые — до 10 м (встречаются фрагменты черепных пластин с характерной бугорчатой скульптурой) [Ebersole et al., 2022]. Наименьшие по размерам (доли миллиметра — *микроихтиолиты*) остатки из верхнемеловых отложений Поволжья изучаются относительно недавно и выделяются с помощью методики промывки породы на специальном оборудовании [Попов, Иванов, 2001].

Помимо этого, встречаются остатки рыб «промежуточной» размерности (от долей миллиметра до около сантиметра) — их возможно позиционировать как *миниихтиолиты*. В эту категорию попадают массово встречающиеся некрупные зубы акул, а также кости и чешуи костистых рыб. Миниихтиолиты костистых рыб встречаются по верхнемеловому разрезу во всех стратиграфических интервалах и фациальных разностях: карбонатных (маастрихт Вольска и др.), кремниевых (силициты и смешанные алевро-глино-силициты и др. [Ахлестина, Иванов, 2009; Олферьев и др., 2004 и др.]); в сантоне Саратова, Пудовкино, Нижней Банновки и др. и терригенных (сеноман Саратова, Нижней Банновки, Безобразовки и др.), а также смешанных карбонатно-терригенных (маастрихт Щербаковки и др.), карбонатно-кремниевых (кампан Саратова и др.) породах.

Некоторые факты находок ранее упоминались в литературе. Так, например, в книге Е.Ф. Ахлестиной и А.В. Иванова обобщенно отмечается их наличие в кремниевых породах верхнего мела Поволжья «в виде беспорядочно рассеянных включений различных фосфатизированных органических остатков (ядра моллюсков, зубы, косточки рыб, обрывки водорослей)» [Ахлестина, Иванов, 2009, с. 44]. Более подробно захоронения скоплений миниихтиолитов костистых рыб упоминаются, например, при описании разреза «Мизино-Лапшиновка», интервала мезинолапшиновской свиты (сантон), сложенной чередованием трепельных мергелей и опок, связанных друг с другом постепенными переходами. «В кровле четко выражены следы перерыва в виде твердого дна, представленного темно-серой до черной крупноблочной опокой мощностью 0,3 м с многочисленными норами ракообразных, дно которых выполнено чешуей рыб. В материале, заполняющем ходы, наблюдаются зерна кварца и глауконита,

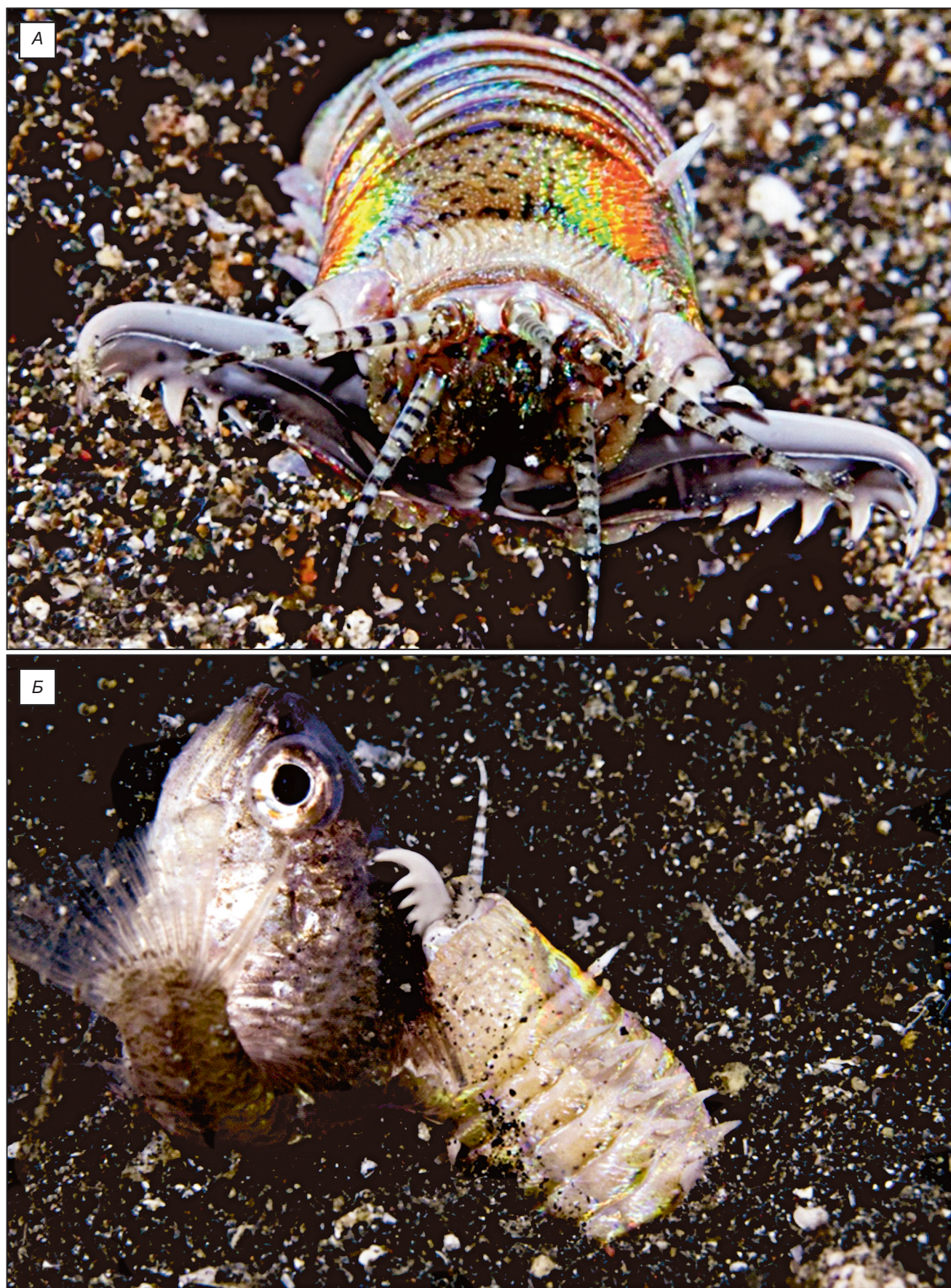


Рис. 1. Современная гигантская хищная полихета *Eunice aphroditois*: А — головная часть (по [Сенников и др., 2025]); Б — сцена охоты на рыб (по [Сенников и др., 2025])



Рис. 2. Схема расположения изученных разрезов

происходящие из вышележащего слоя» [Сельцер, Иванов, 2010, с. 105]. Таким образом, предыдущие находки миниихтиолитов (в том числе в виде скоплений в норах *Lepidenteron lewesiensis*) никак не связывались с деятельностью полихет — такая интерпретация аналогичного материала предлагается впервые.

Учитывая экологическую специфику полихет и их роль в экосистемах, а также приуроченность ядер их нор не только к разновозрастным интервалам верхнемелового разреза, но и к различным литологическим разностям, мы решили специально обратиться к палеоэкологическим и палеогеографическим интерпретациям на примере конкретных местонахождений.

Материалы и методы исследования. В полевые сезоны 2015–2024 гг. в ходе научно-просветительской экспедиции «Флотилия плавучих университетов» [Иванов и др., 2021] целенаправленно изучены 9 разрезов (рис. 2; 3; 4) верхнемеловых отложений Нижнего Поволжья: Ахмат, Саратов (Разбойщина), Речная, Поливановка (Школа), Рыбушка, Щербаковка, Вольск (Рыбное), Захаровка, Трубино.

Проведено первичное полевое литологическое описание с установлением возраста и генезиса отложений. Послойно отобраны остатки макрофауны, часть из которых удалось определить до рода и вида. В первых восьми перечисленных точках наблюдений также были обнаружены ходы полихет, содержащие скелетные остатки рыб. Подробное палеонтологическое описание ихнофоссилий *Lepidenteron lewesiensis* дано в работе [Сенников и др., 2025]. В местонахож-

дении Трубино была найдена большая нора, отличающаяся от *L. lewesiensis*. По составу ориктоценоза реконструированы палеоэкологические условия палеоценоза и уточнены палеогеографические условия седиментации.

Местонахождения и геологическая позиция.

Находки нор полихет собраны из сеноманских, туронских, сантонских, кампанских и маастрихтских отложений Саратовского и Волгоградского Правобережья. Представительство материала из конкретных местонахождений различно — от единичных фрагментов ядер ходов и их отпечатков до массовых сборов. Также на сегодняшний день различна степень изученности разрезов и сопутствующей фауны. Приведем ниже краткую характеристику местонахождений, уделив наибольшее внимание тем, из которых происходит наиболее массовый и разнообразный материал.

Сеноман. Местонахождение «Трубино» представляет собой протяженный береговой обрыв по правому берегу Волги у села Трубино (Красноармейский район Саратовской области, рис. 2). Разрез сложен толщей сеноманских песков и алевритов (с прослоями, обогащенными желваковыми фосфоритами), перекрываемых нижней частью мел-мергельной турон-коньякской толщи с фосфоритовым прослоем в основании. В целом строение разреза аналогично таковому у села Нижняя Банновка (около 10 км южнее), изученному более детально [Архангельский, 1912; Милановский, 1940; Волго-Уральская..., 1959; Герасимов и др., 1962; Камышёва-Елпатьевская, 1967; Глазунова, 1972; Первушов и др., 1999; Габдуллин и др., 2010 и др.]. В 2015 г. у села Трубино в верхах песчано-алевритовой толщи обнаружено ядро крупного хода (диаметром до 10 см, длиной около 30 — фрагмент), содержащее скопления чешуй и костей (рис. 5, А–Д). Данная нора по своему размеру и строению не соответствуют диагнозу *Lepidenteron lewesiensis* — она существенно крупнее, большего диаметра и несколько уплощенная. Кажется невероятным, чтобы черви были такой большой толщины — самые крупные современные полихеты *Eunice aphroditis* достигают только 4 см в поперечном сечении. Кроме того, скопления костей и чешуй рыб в норах из Трубино небольшие, изолированные, не заполняют весь ход и не выстилают его стенки, как у *Lepidenteron lewesiensis*, и не исключено, что могли быть занесены туда случайно. Принадлежность данной большой норы из Трубино не вполне ясна. В качестве гипотезы можно предположить, что это нора крупной угреобразной рыбы [Aoyama et al., 2005; Gonzales et al., 2008; Tomie et al., 2013], однако данных для подтверждения этого недостаточно. Подобные морфологически образования наблюдаются на контакте сеноман-турон в разрезах у сел Нижняя Банновка и Белогорское, но на сегодняшний день они нами не отобраны и не исследованы. Сопутствующая фауна, характерная для данного интервала разреза в районе, — это многочисленные



Рис. 3. Изученные разрезы верхнемеловых отложений: Ахмат (А — общий вид; Б — с увеличением); Саратов (Разбойщина) (В — общий вид; Г — с увеличением); Поливановка. Школа (Д — общий вид; Е — с увеличением); Рыбушка (Ж — общий вид; З — с увеличением). Длина изображенного геологического молотка составляет 30 см

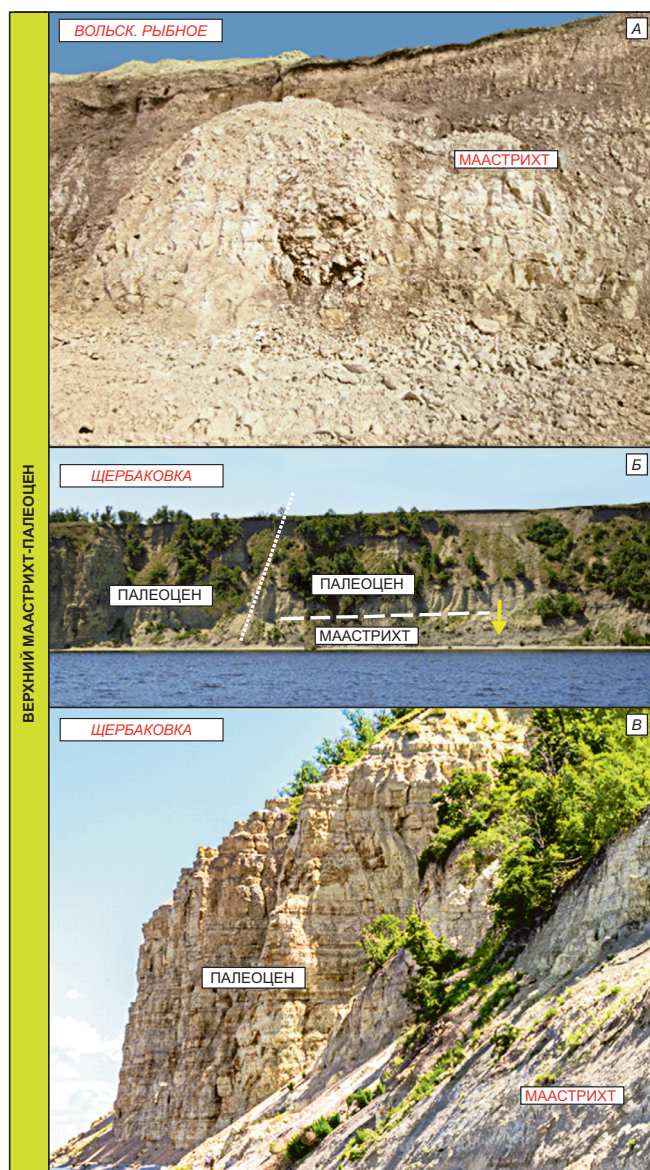


Рис. 4. Изученные разрезы пограничных мел-палеогеновых отложений: А — Вольск. Рыбное; Б и В — Щербаковка. Желтой стрелкой показано расположение изученного разреза

зубы селяхий, фосфатизированные ядра с остатками раковин двустворчатых и брюхоногих моллюсков [Архангельский, 1912; Камышёва-Елпатьевская, 1967; Глазунова, 1972; Первушов и др., 1999].

Турон. Местонахождение «Ахмат» (овраз Гремучий) — это береговой обрыв по правому берегу Волги в 10 км ниже села Ахмат (Красноармейский район Саратовской области, рис. 2), в котором хорошо обнажены турон-коньякская толща мел-мергельных пород (рис. 3 А, Б) с прослоем фосфоритов в основании и верхи песков сеномана (меловатская свита). Здесь у уреза воды в 2015 г. извлечена глыба мела с отпечатком внешней части хода *Lepidenteron lewesiensis* с серией чешуй *Clupeocephala indet* (Таксон 2) [Сенников и др., 2025] (рис. 5, Е, Ж). Сопутствующая фауна представлена раковинами иноцерармов (рис. 6, А), устриц *Rusnodonte* sp. и пектинид *Chlamys* sp.

Описание местонахождения впервые выполнено в 2015 г. и ранее не публиковалось. Разрез представляет собой вертикальный, свежий абразионный уступ, который сформировался относительно недавно вследствие абразионных процессов (активизировавшихся после создания водохранилища в 1970-е годы). Стратиграфически сверху вниз в разрезе обнажаются следующие слои.

Банновская свита (турон-коньяк). Слой 1. Пачка мел-мергельных пород, светло серых, средне глыбоватого сложения. Встречены раковины иноцерармов и пикнодонтных устриц. Мощность 5 м.

Слой 2. Крупноглыбовый (до 2 м) известняк, белый, слабо пачкающий. В основании — глинизированный прослой (0,2 м). Мощность 2–2,5 м.

Слой 3. Мергель светло-серый, средне-глыбового сложения. В основании — глинизированный прослой (0,2 м). Мощность 2–2,5 м.

Слой 4. Известняк светло-серый, крупно-глыбовый. В основании — глинизированный прослой (0,2 м). Мощность около 1 м.

Слой 5. Известняк песчаный (псаммитовая составляющая представлена кварцем, к подошве слоя концентрация увеличивается), светло-серый до белого. В основании — глинизированный прослой (около 0,2 м). По слою рассеяны фосфоритовые желваки размером 1–3 см, слабо концентрирующиеся к подошве. Встречены иноцерармы хорошей сохранности. Мощность около 1 м.

Слой 6. Песчаник известковый. Насыщен белыми ходами полихет *Lepidenteron lewesiensis* (1–3×3–10 см). Такие же норы найдены в осыпи ниже этого слоя. Встречены единичные железисто-охристые конкреции размером до 10 см. Мощность около 1 м.

Слой 7. Песок-песчаник рыхлый, известковистый, кварцевый, разнозернистый (мелко-крупнозернистый). Неравномерно насыщен черными фосфоритовыми желваками размером 2–5 см. Местами слой неравномерно ожелезнен. Подошва распычатая. Мощность 0,1–0,2 м.

В мел-мергельной части все контакты слоев достаточно четкие, ровные. Хорошо визуальнo выражена веерная система трещиноватости. Отмечены сейсмодислокации.

Меловатская свита (сеноман). Слой 8. Песок кварцево-глауконитовый, средне-мелкозернистый, светло-серо-зеленоватый. Встречаются рассеянные фосфоритовые желваки, как и в перекрывающем слое. Наблюдаются светлые карбонатные ходы *Lepidenteron lewesiensis*, трубчатые, размер 1–3×5–10 см. Фосфориты и ходы вниз исчезают. Видимая мощность около 2 м.

В туронское время палеоглубина бассейна в регионе по данным Р.Р. Габдуллина [Габдуллин и др., 2007а, 2007б, 2010, 2021] оценивается около 10–50 м и менее в раннем туроне (сублитораль). Этому интервалу разреза соответствует один эвстатический цикл. В составе палеоценоза доминировали планктон с карбонатным скелетом, бентосные формы



Рис. 5. Ископаемые норы. А–Д — предположительно, угребобразных рыб из сеноманских отложений разреза Трубино: А — три фрагмента ископаемых нор. Деление масштабной линейки — 1 см. Б — Д — то же, но с увеличением. Видны костные фрагменты скелета рыб — чешуя (Б и В) и кости (Г и Д). Е и Ж — ископаемые норы многощетинковых червей — полихет *Lepidenteron lewesiensis* в разрезе туронских отложений Ахмат: скопление чешуи

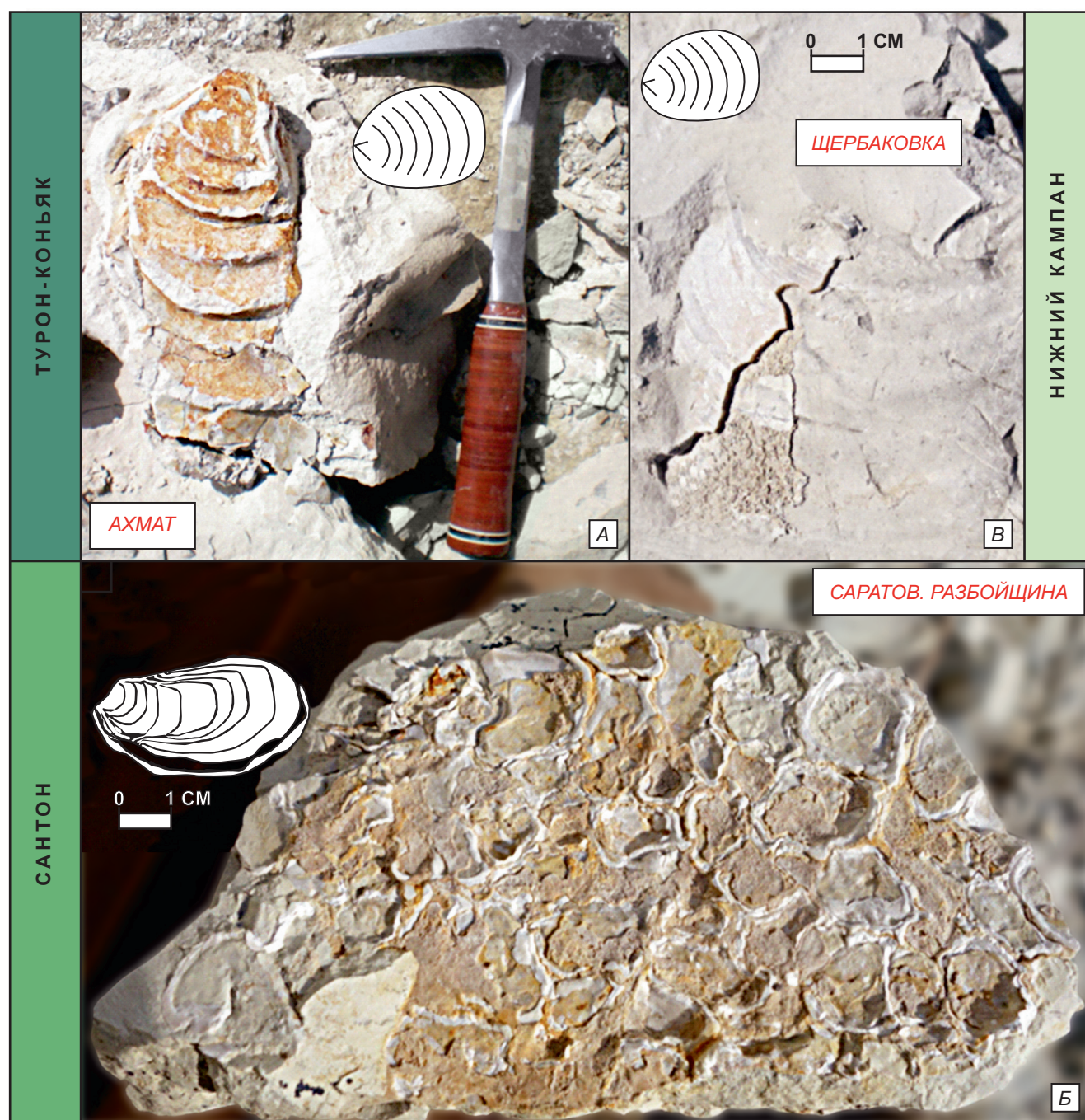


Рис. 6. Раковины ископаемых двустворчатых моллюсков: А — иноцерам из разреза Ахмат; Б — устричная банка *Liostrea* (?) из разреза Саратов (Разбойщина); В — иноцерам из разреза Щербаковка. Длина изображенного геологического молотка составляет 30 см

животных (пелециподы, брахиоподы) — над нектонными (белемниты, акуловые (*Cretoxyrhina* sp.) и костистые рыбы), вентрикулитидные губки, цидароидные морские ежи, иноцерамы, многочисленные устрицы и пектениды (наиболее мелководные представители сообщества).

Местонахождение Захаровка — протяженное (десятки метров) обнажение в стенках глубокой выемки под трассу газопровода в месте пересечения с автодорогой 18А-3 в 3 км к северо-востоку от села Захаровка (Солодчинское сельское поселение, Ольховский район, Волгоградская область). Район Каменно-Бродских меловых возвышенностей (часть

Донской гряды). Разрез представлен ритмичной пачкой мел-мергельных пород. В осыпи обнаружен единственный экземпляр ядра норы полихеты. Недостаточность материала пока не позволяет дать детальную палеореконструкцию для данной точки наблюдения.

Сантон. Местонахождение «Саратов. Разбойщина» — действующий карьер, вскрывающий одним уступом почти полный разрез сантонских отложений (чередование мергелей, глин, силицитов, с прослоями рыхлых песчаников и редкими фосфоритовыми уровнями (рис. 2, рис. 3, В, Г). Фаунистические остатки редки — преимущественно

раковины двустворчатых моллюсков (окситомы, лиостреи (рис. 6, Б), хламисы, иноцерамы) и ростры белемнитов. Норы полихет *Lepidenteron lewesiensis* приурочены к верхней части разреза (рис. 7, А–Г), описание которой приведено ниже стратиграфически сверху вниз.

Слой 1. Карбонатно-глинистая пачка — чередование прослоев светло-серых мергелей и опоквидных глин. Помимо бровки карьера пачка прослеживается и наращивается вверх по отвершкам расположенного рядом небольшого оврага. Видимая мощность пачки составляет около 2–3 м.

Слой 2. Глина карбонатная светло-серая. Контакты слоя расплывчатые. Мощность 0,2–0,5 м.

Слой 3. Мергель светло-серый, местами слабо окремнелый, что придает всей толще крупнопятнистую светло-серую окраску. Местами наблюдаются светло-бурые разводы слабо ожелезнения. В толще заметна система трещиноватости и дислоцированности, предположительно сейсмической природы. Видимая мощность 3–4 м.

Слой 4. Глина карбонатная темно-серая, слабо неравномерно окремнелая, листоватого сложения. Контакты слоя четкие, относительно ровные. Мощность 0,1–0,2 м.

Слой 5. Пачка чередования мергеля светло-серого, слабо неравномерно окремнелого и силицита карбонатного серо-синеватого. Границы прослоев нечеткие, расплывчатые — пачка имеет пятнисто-слоистый облик. Мощность прослоев составляет 0,2–0,3 м. Книзу усиливается общее окремнение. Нижняя часть пачки (около 0,5 м) наиболее окремнелая, более темная и плотная, слабо выступает в профиле выветривания разреза. Наблюдается густая сеть трещин, по которым развиты минеральные дендриты (до черных корочек, заполняющих трещины). Встречены крупные горизонтально ориентированные ростры белемнитов, раковины двустворчатых моллюсков *Oxytoma tenuicostata* (Roemer), *Pycnodonte* sp. Мощность 2–2,5 м.

Слой 6. Мергель светло-серый, пачкающий, сильно (особенно в нижней половине слоя) неравномерно окремнелый до пятнистого облика. В нижней своей половине слой песчанистый за счет присутствия зерен глауконита мелкой и средней размерности. В средней части слоя неравномерно рассеяны железисто-охристые стяжения размером 0,02–0,15 м. Наблюдается густая сеть трещин, по которым развиты минеральные дендриты (до черных корочек, заполняющих трещины). Кровля нечеткая, а подошва четкая, ровная. Лиостреи и окситомы образуют локальные скопления в виде захоронения типа «ракушечная мостовая». Пикнодонты в виде редких небольших (до 50 особей) банок с плотным прижизненным прирастанием друг к другу, в результате ксеноморфизма раковины искажены, определение видовой принадлежности затруднительно. Встречены редкие скопления миниихтиолитов в ходах

полихет *Lepidenteron lewesiensis*, а также линзочками (первые см) вне ходов. Мощность около 0,3–0,4 м.

Слой 7. Песчаник среднезернистый глауконитовый, карбонатный, плотный. Железисто-охристые конкреции редкие, до 0,2 м, внутри встречаются жилы металлического блеска (лимонит, гематит?) и рудные сульфиды. Встречаются редкие фосфориты черные, размером 1–6 см, неправильной формы с штрихами на поверхности (длинные тонкие борозды, рисунок слабо упорядочен, напоминает «погрызы» — возможно это переотложенные фрагменты ядер нор со следами обитателей-строителей). Единичные светло-мергелевые норы цилиндрической формы, размером до 0,5×10 см (фрагменты). Встречаются крупные ростры белемнитов (и пустотки от них), ориентированные преимущественно диагонально под углом около 45°, а также параллельно границам слоя, и, кроме того, ростры мелких форм. Ростры сильно трещиноватые фрагментированные, рассыпающиеся при попытке их извлечения. В подошве наблюдаются редкие остатки ожелезненных фрагментов стенок губок. Встречены раковины *Liostrea vegmaniana*?, *Pycnodonte* sp. (в том числе форма с необычно вытянутой в длину левой створкой), *Agerostrea* sp., *Chlamys* sp. Раковины моллюсков ориентированы хаотично. Видны многочисленные неравномерно рассеянные элементы миниконхиокластики. Заметим, что псаммитовая составляющая в слое очень неравномерно распределена и породу сложно однозначно определить — имеют место локальные серые карбонатные зоны неправильной формы без песчаной примеси, эклектично чередующиеся с зонами фактически карбонатного песчаника. Близ подошвы такая зональность особенно хаотична — зоны сменяют друг друга, сохраняя относительные четкие границы, что придает породе пятнистый облик. Кровля расплывчатая, подошва четкая ровная. Близ подошвы фиксируется зона неравномерного уплотнения (окремнения?). В подошве наблюдаются зеркала скольжения, ориентированные различно (субгоризонтально, «пучками», зонально до «узловатого» эффекта). Мощность 0,2–0,5 м.

Слой 8. Глина темно-серая до черной, умеренно жирная, чешуйчатого сложения. Наблюдаются редкие охристые включения размером 0,1–0,2 м. Местами наблюдаются отдельные группы слойков, сильно завернутых «пачками» вплоть до вихреобразных локальных структур размером до первых дециметров по падению, а также деформация задирания в условиях зажатости между более плотными и мощными слоями. Среди глин встречаются редкие линзы песчаника перекрывающего слоя размером до 4×10 см. Слоистость в линзах субпараллельна кровле слоя глин. В ориктоценозе глин и перекрывающих их песчаников проявлена белемнито-устрично-спонгивая ассоциация. Видимо, в наблюдаемой части разреза это наиболее насыщенный и разнообразный по систематическому и экологическому составу ориктоценоз. Встречен крупный ростр белемнита, сильно



Рис. 7. Ископаемые норы многостинковых червей — полихет *Lepidenteron lewesiensis* из сантонских отложений разреза Саратов (Разбойщина), заполненные фрагментами чешуи и костей рыб (А–Г). Деление масштабной линейки — 1 см. Д — норы полихет из кампанских отложений разреза Поливановка, в которых костные фрагменты рыб не обнаружены. Норы полихет из маастрихтских отложений разреза Вольск, заполненные чешуей и костями рыб (Е) и то же, но с увеличением (Ж)

деформированный в субгоризонтальной плоскости, а также много ростров мелких форм. Подошва слоя нечеткая. Мощность 0,2–0,3 м.

Слой 9. Мергель светло-серый, слабо равномерно окремненный. В верхней части наблюдаются расплывчатые пятна окремнения более темного цвета. Подошва слоя четкая, ровная. Наблюдается слабо выраженная цикличность — визуальна на выветрелой поверхности фиксируются несколько прослоев очень слабой глинизации мощностью около 0,1 м каждый (порода немного более серого цвета). Встречены ростры мелких белемнитов-актинокамаксов, а также хрупкие рассыпающиеся раковины *Oxytoma densicostata*, *Chlamys* sp., *Pycnodonte* sp., *Acutostrea* sp. Выявлены в 2023 г. линзочки с плотно упакованными миниихтиолитами — норы полихет *Lepidenteron lewesiensis*, которые содержат остатки рыб: чешуи *Clupeocephala* indet. (таксон 3), боковые щитки и позвонки *Dercetidae* gen. indet. (таксон 4) [Сенников и др., 2025] (рис. 7, А–Г). Встречены редкие цилиндрические окремненные образования — плотные сердцевина синева-серого цвета. Ходы 3–5×7–9 см (фрагменты). В сечении одного из ходов наблюдается линзочка с плотно упакованными миниихтиолитами (вне линзы, в остальном пространстве хода миниихтиолиты совсем не наблюдаются). Мощность 2 м.

Сантон-кампан. Местонахождение «Речная» представляет собой разрез сантон-кампанских отложений в котловане под строительство коттеджного жилого дома, изученный в 2019 г. на северной окраине Саратова в поселке Поливановка, правый берег реки Янтарная, на улице Маяковского (рис. 2, рис. 7, Д). Частичный досбор материала осуществлен из этого интервала последние годы в траншеях, временно появившихся рядом при прокладке линии «скоростного трамвая» в Саратове. В этом районе ранее изучались аналогичные сантон-кампанские разрезы («Седьмая дачная», «Разъезд», «Поливановка») [Первушов и др., 1999; Сельцер, Иванов, 2010; Сельцер, Иванов, 2016], однако ихтиолиты лишь отмечены в пудовкинской свите как «чешуи костных рыб» [Сельцер, Иванов, 2016] без связи с ходами *Lepidenteron lewesiensis*, которые содержат остатки рыб: чешуи *Clupeocephala* indet. (таксон 3), боковые щитки и позвонки *Dercetidae* gen. indet. и крупные позвонки неизвестных *Teleostei* [Сенников и др., 2025]. Наиболее известный в районе Саратова разрез этого интервала — «г. Саратов — Лысая гора» (разрез известен как один из классических для всего верхнего мела Русской плиты и многократно был описан, например [Иванов, Первушов, 1999]). При его изучении в можжевелоовражной свите (сантон) упомянуты только отдельные «находки чешуи рыб» [Сельцер, Иванов, 2010, с. 99] без связи с жизнедеятельностью полихет.

Местонахождение «Поливановка. Школа». Район поселка Поливановка тектонически приурочен к юго-западной части Елшано-Сергиевской флексуры (рис. 2, рис. 3, Д, Е), что обусловило про-

тяженный выход верхов сантонских и маломощных кампанских отложений на поверхность. Однако естественные обнажения здесь редки и на сегодняшний день многие уничтожены хозяйственной деятельностью. Но урбанизация в этом плане дает и обратный эффект — систематически появляются новые обнажения в том числе сантон-кампанских отложений, представляющие собой как правило временные траншеи и котлованы для строительных работ. В одном из котлованов под строительство частного дома нами изучен разрез сантон-кампанских отложений, в котором вскрыты пограничные интервалы сантонских и кампанских отложений — на отложениях верхов можжевелоовражной свиты (верхний сантон) залегают мергели пудовкинской свиты (нижний кампан). Снизу вверх изучены следующие слои.

Можжевелоовражная свита. K_2st_2 Слой 1. Ритмичное чередование плотных синева-серых силицитов (опок, мощность прослоев около 0,4 м) и кремнистых черных глин (мощность прослоев около 0,2 м). Встречены равномерно рассеянные тонкостворчатые раковины двустворчатых моллюсков *Oxytoma tenuicostata* (Roem.), *Liostrea vegmaniana* (Orb.) хорошей сохранности. Близ кровли наблюдаются многочисленные крупные (2–3×6–10 см) и мелкие (1–2×10–15 мм) ходы, выполненные породой вышележащего слоя.

В крупных ходах *Lepidenteron lewesiensis*, хорошо выделяющихся на фоне силицитов, встречены скопления миниихтиолитов. Во вмещающей породе встречены разрозненные редкие миниихтиолиты. Видимая мощность слоя составляет около 1,5 м.

Пудовкинская свита. $K_2cp_2^1$ Слой 2. Мергель песчанистый, светло-серый, рыхлый. Псаммитовая составляющая кварцево-глауконитовая, разнотекстурированная (преимущественно — мелко- и среднетекстурированная). Встречаются единичные, неравномерно рассеянные коричневые фосфориты, неправильной формы размером 2–10 см. Фаунистические остатки хорошей сохранности распределены неравномерно. Остатки фосфоритов так же сконцентрированы на одном уровне (0,4–0,6 м ниже кровли) с фосфоритовыми желваками. Встречены раковины устриц *Monticulina vesicularis* (Lam.), *Gryphaeostrea* sp., *Hyotissa* sp., ядра гастропод *Solariella* sp., ядра аммонитов-пахидисцид, наutilus *Eutrophoceras* sp., скелеты губок, одиночных кораллов, ростры белемнитов (массово, иногда гроздевидные скопления, рис. 8, В, Г) *Belemnelloccamax mammilatus volgensis* Najd., *Belemnitella mucronata mucronata* (Schloth.).

Встречены многочисленные ходы (сложены мергелем с неравномерными кварц-глауконитовыми псаммитовыми средне-мелкозернистыми включениями) размером 5–25×1–4 см, овальные, округлые или линзовидные в сечении, иногда несущие на внешней стороне концентрические насечки, различно ориентированные в слое, но почти лишенные остатков рыб [Сенников и др., 2025]. Некоторые из них (первые

проценты от общего числа) содержат скопления миниихтиолитов (иногда единичные чешуи и кости). Как правило, это локальные ориктоценозы высокой насыщенности с преобладанием многочисленных слабо фосфатизированных костных и чешуйных остатков рыб. Все эти норы имеют одинаковый размер и строение и могут быть интерпретированы как ходы червей-полихет *Lepidenteron lewesiensis*. Из иных фоссилий в них редко присутствуют раковины ювенильных форм устриц (рис. 8, А, Б), окситом, а также крупных фораминифер. Единичны крупные экземпляры — дугообразно изогнутый ход длиной более 0,2 м на глыбе песчанистого мергеля, содержащий множество миниихтиолитов, в том числе сочлененные элементы скелета (часть позвоночного столба и других костей). Скопления как правило представляют собой массу различно ориентированных чешуй и костей, упакованных в линзы размером первые см (приурочены обычно к стенке хода) или распределенных по стенкам и всему объему полости хода. В некоторых линзах сосредоточены остатки, вероятно, одной особи — наблюдаются случаи сочлененных элементов (например, до 5 позвонков) и «поля» однотипных одноразмерных чешуй, ориентированных определенным образом (по всей видимости, согласно прижизненному расположению в покрове рыбы).

Вне ходов встречены единичные (редко небольшие хаотичные скопления) чешуи и кости — как в карбонатизированных, так и окремнелых, и насыщенных псаммитовой составляющей микрозонах (первые см) в пределах слоя. Исключением является находка непосредственно в породе слоя небольшого комплекса костных элементов, содержащего три сочлененных позвонка (отметим более крупную размерность этих ихтиолитов в сравнении с иными). Мощность — 1,2–1,4 м.

$K_2Cr_2^1$ Слой 3. Мергель песчанистый, серый, с характерным синеватым пятнистым окрашиванием за счет неравномерного окремнения. Встречены раковины устриц *Kosmospirella* cf. *similis* (Pusch.), *Monticulina vesicularis* (Lam), рostrы *Belemnites mucronata* (Schloth.) хорошей сохранности. Видимая мощность — 0,2 м.

На данной точке удалось отбирать материал лишь в течение года — обнажение было быстро уничтожено вследствие строительных работ, часть материала обнаружена в перевезенных отвалах на террасе реки Елшанки (ныне закрыты несанкционированной свалкой). Среди сопутствующей макрофауны наиболее часты раковины остреоидных и пектиноидных двустворчатых моллюсков, скелеты кремниевых губок, рostrы белемнитов, реже встречаются ядра гастропод, аммонитов и наутилид. Как правило, встречаются отдельные чешуи и кости костистых рыб, иногда локально сконцентрированные по ходам полихет.

Ранее [Сельцер, Иванов, 2016] анализ собранного из иных сходных разрезов района фоссильного ма-

териала по фауне беспозвоночных позволил более полно представить систематический состав и экологические взаимоотношения населения кампанского эпиконтинентального морского бассейна, а также уточнить стратиграфическую позицию пудовкинской свиты в действующей субрегиональной схеме. Контакт свит хорошо выражен во всех разрезах и подчеркивается субвертикально и диагонально ориентированными ходами *Lepidenteron lewesiensis*, пронизывающими кровлю силицитов и выделяющимися визуально вследствие их заполненности светлой породой перекрывающего слоя.

При общем сходстве с изученными ранее разрезами в плане послойного строения и фоссильного наполнения [Иванов, Первушов, 1999; Сельцер, Иванов, 2016] описываемое местонахождение несколько выделяется особенностями сохранности миниихтиолитов в ходах полихет *Lepidenteron lewesiensis*. Помимо единичных чешуй и фрагментированных костей здесь обнаружены находки, которые могут быть интерпретированы как части скелета — фрагменты позвоночного столба (серии сочлененных позвонков), поля слабо разобщенных однотипных чешуй (вероятно одной особи — сохранилась прижизненная ориентация их рядов на теле рыбы). Причем, учитывая объем извлеченного материала (десятки образцов) при скромных размерах обнажения (первые метры по латерали) и непродолжительность изучения разреза и отвалов, можно констатировать необычную продуктивность местонахождения.

Непосредственно в породе, вмещающей ихнофосильные объекты, ихтиолиты встречаются несравнимо реже и сильно разрозненны (вариантов сочлененных костных элементов или рядов чешуй почти не встречено, только три «крупных» позвонка).

Кампан. Местонахождение «Рыбушка». Северо-восточнее села Рыбушка (Саратовский район Саратовской области) расположен протяженный овраг, в котором в 1990-е годы по серии обнажений в бортах А.В. Ивановым, Е.М. Первушовым, Е.В. Поповым и Т.И. Бишевым был описан разрез кампанских отложений с выделением рыбушкинской свиты (рис. 2, 3 Ж, 3). При этом были отмечены «остатки костистых рыб» [Иванов, 1995, стр. 64]. В 2022 г. А.В. Ивановым по серии шурфов (вследствие существенной потери обнаженности) были проведены сборы ископаемых остатков, среди которых в слое плотных глауконитовых карбонатных песчаников были обнаружены ходы полихет *Lepidenteron lewesiensis* хорошей сохранности, которые содержат остатки рыб: чешуи, плавниковые шипы и дермальные кости Teleostei indet. (таксон 1), чешуи Clupeocephala indet. (таксон 2) и боковые щитки и позвонки Dercetidae gen. indet. [Сенников и др., 2025]. Сопровождающая фауна — рostrы белемнитов (и пустотки от них), губки (рис. 8, Д), устричные и пектиновые (*Entolium* sp., рис. 8, Е) двустворчатые моллюски.

Маастрихт. Местонахождение «Вольск. Рыбное» — карьер по добыче мел-мергельного сырья,



Рис. 8. Раковины ископаемых беспозвоночных из нижнекампанских отложений. Разрез Поливановка. Школа (А–Г): раковины устриц *Ruspodonte* (А, Б) и ростры белемнитов *Belemnitella* (В, Г). Разрез Рыбушка: губка (Д) и двустворчатый моллюск *Entolium* (Е). Длина изображенного геологического молотка составляет 30 см

вскрывающий верхним уступом маастрихтскую меловую толщу (рис. 2, 4, А). Встречены единичные ядра аммонитов-скафитов, бакулитов (на определении у профессора Е.Ю. Барабошкина, МГУ), панцири морских ежей, устрицы *Pycnodonte* sp. В верхней части разреза отобраны единичные ходы полихет *Lepidenteron lewesiensis* хорошей сохранности, которые содержат остатки рыб: чешуи, плавниковые шипы и дермальные кости Teleostei indet. (таксон 1) и боковые щитки и позвонки Dercetidae gen. indet. [Сенников и др., 2025] (рис. 7, Ж, 3).

Местонахождение Щербаковка (Волгоградская область) — береговой обрыв Волги южнее села Щербаковка Камышинского района Волгоградской области (рис. 2, 4, Б, В), вскрывающий толщу мергелей маастрихта в районе известного «Щербаковского сброса». Объект впервые детально описан Е.В. Милановским [1940] и с тех пор неоднократно изучался, в том числе [Коковкин и др., 2018]. В нижней части разреза встречаются ходы полихет *Lepidenteron lewesiensis*, содержащих плотно упакованные скопления миниихтиолитов. В северном блоке сброса сверху вниз обнажаются слои.

Слой 1. Песчаник кварцево-глауконитовый, мелко-тонкозернистый, алевроитовый, грязно-желто-сериозеленоватый, пятнистого облика. Подошва слоя четкая неровная. Мощность около 7 м. Возраст — палеоцен.

Верхний мел. Маастрихтский ярус. Слой 2. Алевролит слюдистый, плотный, темно-серый. В верхней части слоя наблюдается слабое неравномерное опесчанивание породы кварцевой тонкозернистой псаммитовой составляющей. Наблюдаются редкие железисто-охристые желто-бурые стяжения овально-неправильной формы размером до 0,5×20 см. Наблюдается неравномерное слабое оползание слоя в виде небольших блоков. По слою хорошо фиксируется визуальная система трещин, оперяющих разлом сброса. Некоторые трещины раскрыты, имеют ширину до 0,1 м и заполнены красновато-бурым железисто охристым материалом. Мощность слоя составляет около 3 м.

Слой 3. Алевролит глинистый, карбонатистый, темно-серый. Подошва слоя расплывчатая — он плавно переходит в подстилающий. Встречены остатки раковин двустворчатых моллюсков *Oxytoma* cf. *danica* Ravn., *Liostrea* sp., *Pycnodonte* sp., ходы полихет *Lepidenteron lewesiensis*, которые содержат остатки рыб: чешуи *Clupeocephala* indet. (таксон 2). Мощность составляет около 1 м.

Слой 4. Мергель алевроитистый, слюдистый, светло-серый, плитчатый и глыбовый. Наблюдается карбонатизация породы вниз по слою. Прослеживаются редкие неравномерные красновато-бурые ожелезнения по трещинам. Слой плавно переходит в нижележащий. В слое встречены остатки раковин двустворчатых моллюсков *Oxytoma* cf. *danica* Ravn., *Liostrea* sp., *Pycnodonte* sp., *Inoceramus* sp., субгоризонтально захороненные слабо поврежденные панцири

морских ежей *Echinocorys* sp., роостры белемнитов *Belemnella* sp., ядра аммонитов *Baculites* sp. Видимая мощность слоя составляет около 1,5 м.

Слой 5. Мергель алевроитистый, слюдистый, светло-серый. Наблюдается глинизация к низу. В нижней части (0,3 м) слоя неравномерно рассеяны черные округлые желваковые фосфориты размером до 3–4 см. Подошва четкая, ровная. Мощность 1 м.

Слой 6. Силицит плотный. Кремнистая составляющая распределена по слою неравномерно, что обуславливает щебнистость. Слой слабо выступает в профиле выветривания. В верхней части (0,2 м) слоя наблюдается прослой карбонатных глин темно-серого цвета. Видимая мощность 1,5 м.

Палеоэкологические и палеогеографические модели. На основе приведенных выше описаний разрезов дадим краткую палеоэкологическую и палеогеографическую характеристики (рис. 9) условий седиментации и развития экосистем.

Сеноманский век. Меловатское время. Для разреза «Трубино» реконструируется песчаный грунт, заселенный двустворчатыми моллюсками гастроподами и роющими животными. В составе палеоценоза присутствуют акуловые и костные рыбы, в том числе, возможно, крупные угреобразные, которым могут принадлежать большие норы. Глубина эпиконтинентального моря оценивается приблизительно в 50 м.

Туронский век. Банновское время. Для разреза «Ахмат» характерен очень богатый палеоценоз, заселявший дно, покрытое карбонатным илом. Бентос объединяет эхиноиды, брахиоподы, белемниты, пелициподы-иноцерамы; пелициподы-устрицы; пелициподы-пектениды; червей-полихет, губок. Нектон — костных и хрящевых (акуловых) рыб. Глубина эпиконтинентального моря составляла около 10–50 м. Температура поверхностных вод от 18 до 22 °С [Габдуллин, 2023].

Ранний сантон. Можжевелоовражное время. Для разреза «Речная» характерен скудный палеоценоз, заселявший дно, покрытое карбонатно-кремнисто-глинистым илом. Бентос объединяет пелициподы-устрицы и прочих пелициподов, червей-полихет, а нектон — костных и хрящевых (акуловых) рыб. Глубина эпиконтинентального моря составляла около 6–60 м. Температура поверхностных вод от 14 до 16 °С [Габдуллин, 2023].

Для разреза «Саратов, Разбойщина» характерен относительно богатый палеоценоз, заселявший дно, покрытое кремнисто-глинистым илом. Бентос объединяет иноцерамы, устрицы пектениды, и прочих пелициподов, а также червей-полихет, а нектон — белемнитов и костных рыб. Глубина эпиконтинентального моря составляла до 100 м. Температура поверхностных вод от 13 до 16 °С [Габдуллин, 2023].

Ранний кампан. Пудовкинское время. Для разреза «Поливановка, школа» характерен бедный палеоценоз, заселявший дно, покрытое песчаным грунтом. Бентос — это черви-полихеты, а нектон — костные

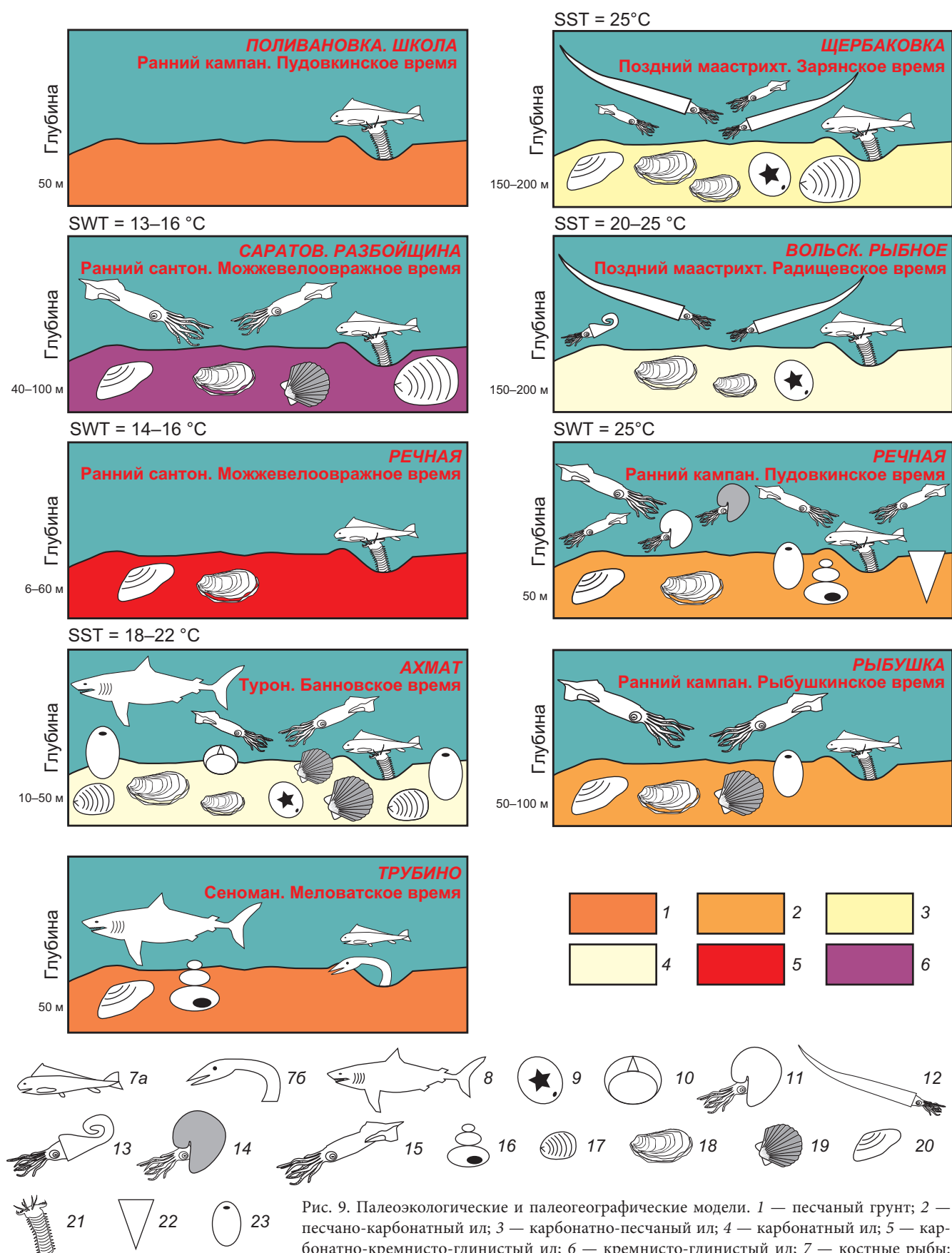


Рис. 9. Палеоэкологические и палеогеографические модели. 1 — песчаный грунт; 2 — песчано-карбонатный ил; 3 — карбонатно-песчаный ил; 4 — карбонатный ил; 5 — карбонатно-кремнисто-глинистый ил; 6 — кремнисто-глинистый ил; 7 — костные рыбы: а — без идентификации; б — морские угри; 8 — акулы; 9 — эхиноидеи; 10 — брахиоподы; 11 — аммониты без точной идентификации; 12 — аммониты-бакулиты; 13 — аммониты-скафиты; 14 — наутилоидеи; 15 — белемниты; 16 — гастроподы; 17 — двустворчатые моллюски (пелициподы); 18 — пелициподы-иноцерамы; 19 — пелициподы-пектениды; 20 — пелициподы-устрицы; 21 — черви-полихеты; 22 — кораллы; 23 — губки

рыбы. Глубина эпиконтинентального моря не превышала 50 м.

Рыбушкинское время. Для разреза «Рыбушка» характерен палеоценоз, заселявший дно, покрытое песчано-карбонатным илом. Бентос — это устрицы, пектениды и прочие двустворчатые моллюски, губки и черви-полихеты, а нектон — белемниты и костные рыбы. Глубина эпиконтинентального моря не превышала 50 м.

Пудовкинское время. В разрезе «Речная» богатый палеоценоз, заселявший дно, покрытое песчано-карбонатным илом. Бентос — это устрицы и прочие двустворчатые моллюски, гастроподы, кораллы, губки и черви-полихеты, а нектон — белемниты, аммониты, наутилоидеи и костные рыбы. Глубина эпиконтинентального моря не превышала 50 м. Температура морской воды, в которой обитали кораллы составляла выше 20 °C и ближе к 25 °C [Габдуллин, 2023].

Поздний маастрихт. Радищевское время. В разрезе «Вольск, Рыбное» бентос обитал на карбонатном иле, покрывавшем морское дно эпиконтинентального бассейна глубиной около 150–200 м. В составе бентоса эхиноидеи и иноцерамы, а также черви-полихеты. Нектон — гетероморфные аммониты — бакулиты и скафиты. Температура поверхностных вод от 20 до 25 °C [Габдуллин, 2023].

Зарянское время. В разрезе «Щербаковка» бентос обитал на карбонатно-песчаном иле, покрывавшем морское дно эпиконтинентального бассейна глубиной около 150–200 м. В составе бентоса эхиноидеи, устрицы, иноцерамы и прочие двустворчатые моллюски, черви-полихеты. Нектон — гетероморфные аммониты — бакулиты и белемниты. Температура поверхностных вод около 25 °C [Габдуллин, 2023].

Отражение палеообстановок в музейном пространстве. Открытие нор хищных полихет *Lepidenteron lewesiensis* и исследование содержащихся в них остатков рыб из верхнего мела Нижнего Поволжья существенно дополняет наши знания о морских палеоэкосистемах позднемеловой эпохи на территории региона. Полихеты, бывшие тогда массовыми донными организмами, охотящимися на костных рыб, осуществляли пищевые связи между бентосным и нектонным сообществами, делая их трофическую структуру более сложной и взаимосвязанной. Эти данные усиливают представление о разнообразии вариантов экологических взаимоотношений, широте спектра экологических ниш и физико-географических обстановок — позднемеловые экосистемы Поволжья являются во многих отношениях показательными, а связанные с ними натурфакты могут быть эффектно задействованы в научно-просветительских целях и представлены в музейном пространстве. При этом, полихетам, как оригинальным элементам экосистемы, рационально уделить особое внимание.

Проектируя музейные решения, возможно комбинировать различные формы материала и информации: собственно экспонаты, сопровождающие

информационные плакаты и панели, модельные блок-диаграммы, элементы интерактива. Целесообразно синтезировать экспозиционные и интерактивные технологии, комплексируя: собственно фоссильный материал (массивы пород с остатками поселения полихет, отдельные ядра ходов с массивом микроихтиолитов, фрагменты ядер ходов с наиболее визуально воспринимаемыми частями скелетов рыб и полями чешуи), палеоанималистические и современные фотографические изображения, видео сюжеты из повседневности морского дна. Как вариант интерактивного подхода, в частности в стиле квеста, возможно предложить посетителям по сколам ядер ходов с обилием микроихтиолитов определить части скелетов рыб, отдельные костные элементы, выявить положение участников экологических взаимоотношений в трофической сети.

Представление палеоэкологической ситуации «с участием» полихет в музейном пространстве позволяет наглядно продемонстрировать посетителю: 1 — оригинальный нестандартный вариант трофических взаимоотношений в экосистеме обитателей водной толщи и донного населения; 2 — многие элементы вернадистской концепции биосферы (взаимодействие геосфер, сложность и функциональность «пленки жизни» морского дна, транзит «живого вещества» из биосферы в литосферу на уровне отдельных организмов и фрагментов сообществ); 3 — сущность нектона, бентоса (инфауны); 4 — суть ихнофауны как «невидимого» элемента палеоэкосистем, выявляемого лишь при углубленном анализе «каменной летописи»; 5 — сложность и условность интерпретаций палеонтологических находок и палеоэкологических реконструкций.

Подобные подходы показаны к применению не только в стационарном музее, но и при реализации мобильно-сетевых проектов на базе региональных узлов «Молодежного музея», а также в режиме научно-просветительской экспедиции «Флотилия плавучих университетов» [Иванов и др., 2023, 2024а, 2024б]. При этом эффективна подача материала именно на уровне целостной биогеосистемы с отражением всех обитателей экосистемы и особенностей геолого-геоморфологического субстрата на конкретный временной интервал позднемеловой эпохи, как показано в данной статье.

Заключение. Приведено послышное описание 8 разрезов, в которых впервые были описаны ходы червей-полихет *Lepidenteron lewesiensis* и присутствуют крупные норы, возможно, угреобразных рыб.

Дана палеоэкологическая и палеогеографическая характеристика условий осадконакопления в эпиконтинентальном бассейне в пределах Ульяновско-Саратовского прогиба.

Наиболее глубоководные условия характерны для маастрихта (до 150–200 м), наиболее тепловодные — для кампана и маастрихта (до 20–25 °C).

Финансирование. Материал для исследования получен в ходе научно-просветительской экспе-

диции «Флотилия плавучих университетов». Исследование выполнено при финансовой поддержке государственных заданий Музея землеведения МГУАААА-А16-116042010089-2 «Биосферные функции экосистем, их компонентов и рациональное природопользование» (научный руководитель, профессор А.В. Смуров) и АААА-А16-116042710030-7 «Музееведение и образование музейными средствами в области наук о Земле и жизни» (научный руководитель, профессор В.В. Снакин), в рамках темы государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (1021051703468-8) «Биотические, географо-гидрологические и ландшафтные оценки окружающей среды для создания основ рационального природопользования» (научный руководитель, член-корр. РАН А.А. Тишков).

Работа выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш02-17 «Разработка основ создания, функционирования и развития комплексного научно-просветительского универси-

тетского молодежного музея на примере МГУ имени М.В. Ломоносова» (руководитель А.В. Иванов). Проект реализуется в рамках НОШ МГУ (Ш02): Междисциплинарная научно-образовательная школа «Сохранение мирового культурно-исторического наследия».

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Палеонтологического института им. А.А. Борисяка РАН (А.Г. Сенников, А.С. Бакаев, И.В. Новиков), а также при финансовой поддержке государственных заданий Удмуртского государственного университета FEWS-2024-0011 и Казанского (Приволжского) федерального университета FZSM-2023-0023 (А.С. Бакаев).

Участие Н.В. Бадулиной осуществлялось в рамках темы государственного задания № АААА-А16-116033010119-4 «Геодинамика полярных и приполярных областей Российской Федерации». Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Архангельский А.Д. Верхнемеловые отложения востока Европейской России // Материалы для геологии России. СПб.: Изд.-во Имп. минерал. об-ва, 1912. Т. XXV. С. 138–353.

Ахлестина Е.Ф., Иванов А.В. Кремниевые породы мела и палеогена Поволжья. М.: Издательский дом «Камертон», 2009. 210 с.

Барaboшкин Е.Ю., Гужиков А.Ю., Александрова Г.Н. и др. Новые седиментологические, магнитостратиграфические и биостратиграфические данные по разрезу кампана-маастрихта горы Бешкош, юго-западный Крым // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2020. Т. 28, № 6. С. 125–170.

Волго-Уральская нефтеносная область. Юрские и меловые отложения / Отв. ред. Т.Л. Дервиз. Л.: Гостоптехиздат, 1959. С. 8–352.

Габдуллин Р.Р. Высокоточная циклическая корреляция разрезов фанерозоя Северной Евразии как основа для актуальных палеогеографических и палеоклиматических реконструкций: Дисс. ... докт. геол.-минерал. наук. М., 2023. 550 с.

Габдуллин Р.Р., Пузик А.Ю., Меренкова С.И. и др. Литолого-геохимическая характеристика и палеоклиматические условия формирования верхнемеловых отложений эпиконтинентального бассейна Русской плиты в районе Ульяновско-Саратовского прогиба // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 2. С. 20–33.

Габдуллин Р.Р., Бадулина Н.В., Иванов А.В. Скорости осадконакопления в эпиконтинентальном бассейне Русской плиты в кампанском и маастрихтском веках // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2007 а. № 6. С. 35–38.

Габдуллин Р.Р., Бадулина Н.В., Иванов А.В. и др. Скорости осадконакопления в поздне меловом эпиконтинентальном бассейне Русской плиты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2007 б. № 4. С. 36–41.

Габдуллин Р.Р., Иванов А.В., Шешнев А.С. Микрорельеф дна — причина изменчивости мощности туронконьякской карбонатной толщи на участке Меловое — Нижняя Банновка (Саратовская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 2. С. 20–27.

Герасимов П.А., Мигачева Е.Е., Найдин Д.П., Стерлин Б.П. Юрские и меловые отложения Русской платформы. М.: Изд.-во Моск. ун-та, 1962. С. 88–181.

Глазунова А.Е. Палеонтологическое обоснование стратиграфического расчленения меловых отложений Поволжья. Верхний мел. М.: Недра, 1972. 204 с.

Иванов А.В. Маринакулаты — проблематичный новый тип животных из мела и палеогена России. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1995. 152 с.

Иванов А.В., Первушов Е.М. «Губковые горизонты» и «птериевые слои» Саратовского Поволжья // Недра Поволжья и Прикаспия. 1999. Вып. 17. С. 24–30.

Иванов А.В., Яшков И.А., Захаров Е.Е. Экспедиции по Поволжью и Прикаспию. Этюды половины тысячелетия. От первых путешественников до «Флотилии плавучих университетов». М.: Русский Мир, 2021. 224 с. (Труды «Флотилии плавучих университетов». Т. 1).

Иванов А.В., Яшков И.А., Смуров А.В., Снакин В.В., Колотилова Н.Н., Козачек А.В., Максимова Е.Е. Мобильные выставки в научно-просветительской экспедиции как драйвер развития молодежного музея: опыт «Флотилии плавучих университетов» // Жизнь Земли. 2023. Т. 45, № 4. С. 573–583. DOI: 10.29003/m28.0514-7468

Иванов А.В., Сенников А.Г., Бакаев А.С., Новиков И.В. Первые находки нор полихет *Lepidenteron* в верхнем мелу Нижнего Поволжья // Палеострат — 2024. Годичное собрание (научная конференция) секции палеонтологии МОИП и Московского отделения Палеонтологического общества при РАН, Москва, 29–31 января 2024 г. Тезисы докладов / Ред. В.К. Голубев, В.М. Назарова. М.: Палеонтологический институт имени А.А. Борисяка РАН, 2024. С. 30–31.

Иванов А.В., Смуров А.В., Снакин В.В., Богданов В.П. Мобильно-сетевой «Молодежный музей» Московского университета — контуры концепции и принципы развития на этапе становления // Вестн. Моск. ун-та. Серия 8. История. 2024. Т. 65. № 3. С. 3–26.

Камышёва-Елпатьевская В.Г. Атлас мезозойской фауны и спорово-пыльцевых комплексов Нижнего Поволжья и сопредельных областей. Вып. 1. Общая часть.

Фораминиферы. Саратов: СГУ имени Н.Г. Чернышевского, 1967. 257 с.

Коковкин А.А., Иванов А.В., Тюленева В.М., Яшков И.А. Тектоника, сейсмоструктурная и гидротермальный метасоматоз в новейшей структуре Волжского (Саратовско-Камышинского) правобережья: новые данные // Отечественная геология. 2018. № 6. С. 51–66.

Милановский Е.В. Очерк геологии Среднего и Нижнего Поволжья. М.; Л.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1940. 308 с.

Олферьев А.Г., Алексеев А.С., Беньямовский В.Н. и др. Опорный разрез верхнего мела у с. Мизино-Лапшиновка и проблема границы сантона и кампана в Саратовском Поволжье // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2004. Т. 12, № 6. С. 69–102.

Первушов Е.М., Архангельский М.С., Иванов А.В. Каталог местонахождений остатков морских рептилий в юрских и меловых отложениях Нижнего Поволжья. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 1999. 230 с.

Попов Е.В., Иванов А.В. Перспективы применения нестандартных методик отбора микроостатков макрофауны из юры-палеогена юго-востока Русской плиты // Проблемные вопросы региональной и местной стратиграфии фанерозоя Поволжья и Прикаспия: Материалы первой региональной научно-практической конференции 9–12 октября 2001 г. Саратов, 2001. С. 14–15.

Сельцер В.Б., Иванов А.В. Атлас поздне меловых аммонитов Саратовского Поволжья. М.: Книжный дом «Университет», 2010. 152 с.

Сельцер В.Б., Иванов А.В. Моллюсковый комплекс нижнего кампана юго-западной части Елшано-Сергиев-

ской флексуры (Саратовское Поволжье) // Золотой век российской малакологии. Сборник трудов Всероссийской научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения профессора Виктора Николаевича Шиманского / Редколлегия: И.С. Барсков, А.В. Иванов, Т.Б. Леонова, С.В. Николаева, И.А. Яшков. М.; Саратов: ПИН РАН им. А.А. Борисяка — СГТУ им. Ю.А. Гагарина — ООО Кузница рекламы, 2016. С. 271–289.

Сенников А.Г., Иванов А.В., Бакаев А.С. и др. Норы полихет *Lepidenteron lewesiensis* (Mantell, 1822) из верхнего мела Нижнего Поволжья // Палеонтологический журнал. 2025. № 3. С. 91–112. (В печати)

Aoyama J., Shinoda A., Sasai S. et al. First observations of the burrows of *Anguilla japonica* // Journal of Fish Biology. 2005. Vol. 67. P. 1534–1543.

Ebersole J.A., Solonin S.V., Cicimurri D.J., et al. Marine Fishes (Chondrichthyes, Holocephali, Actinopterygii) from the Upper Cretaceous (Campanian) Rybushka Formation near Beloe Ozero, Saratov Oblast, Russia. Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia (Research in Paleontology and Stratigraphy). 2022; 128(2): 369–409. DOI:10.54103/2039-4942/16954.

Gonzales T.T., Katoh M., Ishimatsu A. Intertidal burrows of the air-breathing eel goby, *Odontamblyopus lacepedii* (Gobiidae: Amblyopinae) // Ichthyological Research. 2008. Vol. 55. Iss. 3. P. 303–306.

Tomie J.P.N., Cairns D.K., Courtenay S.C. How American eels *Anguilla rostrata* construct and respire in burrows // Aquatic biology. 2013. Iss. 3. Vol. 19. P. 287–296.

Статья поступила в редакцию 10.02.2024,
одобрена после рецензирования 12.03.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-51-56

ПОВЕДЕНИЕ РАСТВОРЕННЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД

Елена Александровна Данченко¹, Андрей Юрьевич Бычков²,
Ванда Здиславовна Хилимонюк³, Евгений Викторович Сафронов⁴,
Виктор Григорьевич Чевеверев⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lena7dan@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; andrewbychkov66@yandex.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vanda@geol.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; evgenii567@yandex.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; cheverev44@mail.ru

Аннотация. Разработка месторождений углеводородного сырья сопровождается строительством разведочных и эксплуатационных скважин. При этом более 70 % объема буровых работ приходится на экологически уязвимые территории криолитозоны с ограниченной способностью к самоочищению и слабыми защитными свойствами.

При утилизации отходов бурения их взаимодействие с многолетнемерзлыми породами и поведение при многократных циклических процессах промерзания-оттаивания в условиях Крайнего Севера изучены недостаточно и остаются актуальными.

Для оценки динамики изменения концентраций ионов при многократных циклических процессах промерзания-оттаивания был проведен химический анализ на определение концентрации ряда ионов токсичных металлов с учетом нормативных показателей предельно допустимых концентраций элементов в воде. При этом показано, что в ряде случаев происходит значительное снижение предельно допустимых концентраций отходов бурения.

Ключевые слова: циклические геокриологические процессы, утилизация буровых растворов, криолитозона, многолетняя мерзлота

Для цитирования: Данченко Е.А., Бычков А.Ю., Хилимонюк В.З., Сафронов Е.В., Чевеверев В.Г. Поведение растворенных металлов при утилизации отходов буровых растворов в зоне распространения многолетнемерзлых пород // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 51–56.

BEHAVIOR OF DISSOLVED METALS IN THE DISPOSAL OF DRILLING MUD WASTE IN THE PERMAFROST ZONE

Elena A. Danchenko¹, Andrey Yu. Bychkov², Vanda Z. Khilimonyuk³,
Evgeniy V. Safronov⁴, Viktor G. Cheverev⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lena7dan@gmail.com

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; andrewbychkov66@yandex.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vanda@geol.msu.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; evgenii567@yandex.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; cheverev44@mail.ru

Abstract. The development of hydrocarbon deposits is accompanied by the construction of exploration and production wells. At the same time, more than 70 % of the drilling volume falls on ecologically vulnerable areas of the cryolithozone with limited self-cleaning ability and weak protective properties.

During the disposal of drilling waste, their interaction with permafrost rocks and behavior during multiple cyclic freezing-thawing processes in the conditions of the Far North have not been sufficiently studied and remain relevant.

To assess the dynamics of changes in ion concentrations during multiple cyclic freezing-thawing processes, a chemical analysis was carried out to determine the concentration of a number of toxic metal ions, taking into account the normative indicators of the maximum permissible concentrations of elements in water (MPC). At the same time, it is shown that in some cases there is a significant decrease in the MPC of drilling waste.

Key words: cyclical geocryological processes, utilization of drilling fluids, cryolithozone, permafrost

For citation: Danchenko E.A., Bychkov A.Yu., Khilimonyuk V.Z., Safronov E.V., Cheverev V.G. Behavior of dissolved metals in the disposal of drilling mud waste in the permafrost zone. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 51–56. (In Russ.).

Введение. Объем образования отходов при строительстве только одной эксплуатационной скважины составляет от 800 до нескольких тысяч м³, объемы отходов на месторождении могут достигать сотен тысяч м³. С учетом освоения новых месторождений углеводородов в восточных и северных регионах, проблема обращения с отходами бурения приобретает серьезное экологическое и экономическое значение [Вакуленко и др., 2016].

Насущной проблемой является разработка и внедрение экономичных методов переработки буровых отходов. Для решения этой задачи необходимы исходные данные о составах и физико-химических характеристиках буровых отходов.

В процессе бурения в скважину подается буровой раствор, который смазывает и охлаждает инструмент, выводит на поверхность выбуренную породу, компенсирует внутрискважинное давление и укрепляет стенки скважины. В результате на поверхности образуются сточные буровые воды, отработанный буровой раствор и загрязненная выбуренная порода (буровой шлам) [Голубев и др., 2010].

Цель настоящей работы — изучение изменения состава отходов буровых растворов (ОБР) при циклических процессах промерзания и оттаивания, которые происходят в местах их хранения. Эти знания могут быть полезны специалистам, занимающимся оценкой нефтяного загрязнения, обустройством и эксплуатацией углеводородных месторождений, а также для прогнозирования поведения элементов-поллютантов в условиях криолитозоны.

Проблема хранения ОБР. При бурении на поверхность из ствола скважины выносятся буровые отходы, состоящие из отходов бурового раствора, бурового шлама (БШ) и буровых сточных вод (БСВ). Загрязняющая способность отходов бурения обусловлена как токсичностью химических реагентов, применяемых для обработки бурового раствора, который подается на забой скважины, так и токсичностью выбуренной породы, находящейся на поверхности.

В результате промывки очистных устройств и разбавления остатков бурового раствора технической водой образуются буровые сточные воды, которые вместе с твердой фазой бурового шлама размещают в шламонакопителях. Жидкие отходы бурения и нефтедобычи являются источниками загрязнения окружающей среды [Приказ..., 2010].

Рядинский В.Ю. и соавторы занимались изучением состава и свойств буровых отходов Западной Сибири [Рядинский и др., 2004]. Согласно их исследованиям, среди химических элементов буровых отходов преобладают: кислород, водород, алюминий, кремний, углерод, железо, кальций, магний, марганец, натрий, калий, хлор, бром, йод.

В меньших количествах встречаются: кадмий, свинец, цинк, медь, кобальт, ртуть, мышьяк, бор, барий, фосфор, титан, хром, никель, вольфрам и другие элементы.

Среди химических соединений буровые отходы содержат воду (20...50 %), оксиды кремния (40...60 %), алюминия (10...20 %), углерода (7...9 %), железа (5...8 %), кальция (2...5 %), магния (1,5...3 %), натрия (0,5...1 %), калия (0,4...2 %), бора (0,3...0,5 %), фосфора (0,03...0,05 %), марганца (0,03...0,1 %) и других вышеуказанных элементов, их сульфаты и хлориды.

В составе отходов бурения содержание нефти и нефтепродуктов достигает 1 %, поверхностно-активных веществ (ПАВ) 0,5 %. Обычные показатели для углеводородов 50...100 мг/кг, ПАВ — 1...10 мг/кг [Голубев и др., 2010].

Эта информация может служить основой для более детального изучения поведения буровых отходов при их утилизации в криолитозоне, в том числе для изучения поведения растворенных в них металлов при многократном циклическом процессе промерзания и оттаивания.

Технология поверхностных захоронений. На современном этапе развития технологии нефтедобычи при эксплуатации нефтяных месторождений образуются большие объемы отходов, преимущественное количество которых накапливается в шламовых амбарах.

В процессе эксплуатации амбары заполняются буровыми и тампонажными растворами, буровыми сточными водами и шламом, пластовыми водами, продуктами испытания скважин, материалами для приготовления и химической обработки буровых и тампонажных растворов, хозяйственно-бытовыми сточными водами и твердыми бытовыми отходами, ливневыми сточными водами.

Наиболее распространенный способ обезвреживания отходов бурения и нефтедобычи, а также ликвидации шламовых амбаров выглядит следующим образом. Амбары освобождают от жидкой фазы, которую направляют в систему сбора и подготовки нефти с последующим использованием ее в системе поддержания пластового давления. Оставшийся шлам засыпают минеральным грунтом.

Описанный способ ликвидации шламовых амбаров имеет ряд серьезных недостатков, одним из которых является содержание в буровом шламе достаточно высоких концентраций нефтепродуктов, тяжелых металлов в подвижной форме, ПАВ и других токсичных веществ [Шорникова, 2002]. При этом предполагается существенное влияние на концентрацию токсичных химических элементов процессов циклического промерзания-оттаивания ОБР в местах их хранения на Крайнем Севере.

Методика и материалы экспериментальных исследований. *Свойства отходов буровых растворов.* Образец ОБР для испытания циклическим промерзанием-оттаиванием был получен с нефтегазоконденсатного месторождения Бованенково (п-в Ямал) при бурении скважины на глубине 908 м. Он представлял собой текучую пастообразную массу

темно-серого цвета с металлическим оттенком, маслянистую на ощупь с запахом нефти.

Буровые отходы, это обычно суспензии глины, песка, химических реагентов и нефти в воде. Их состав определяется составом выбуренной породы и бурового раствора, приготовленного из ряда компонентов. В качестве компонентов в него входят бентонитовый глинопорошок, сидеритовый утяжелитель, регуляторы pH, различные смазывающие, антисептические, пеногасительные, антифильтрационные и гидрофобизирующие компоненты [Волков, Иванов, 2015]. Состав исходного бурового раствора, который использовался в данном исследовании, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Состав исходного бурового раствора

Наименование реагента	Назначение реагента в растворе	Концентрация, кг/м ³
Бикарбонат натрия	Регулятор pH, Ca	0,5
Сода кальцинированная	Регулятор pH, Ca	1,0
Сода каустическая	Регулятор pH	3,0
Глинопорошок ПБМБ	Структурообразователь	20,0
Сидеритовый утяжелитель	Утяжелитель	200,0
ПАЦ-В	Понижитель фильтрации	2,0
ПАЦ-Н	Понижитель фильтрации	5,0
Полиэколь	Смазка	20,0
Смазочная добавка Микан-40	Сухая смазочная добавка	12,0
СМЭГ-5	Жидкая смазочная добавка	40,0
Пеногаситель Полидефом	Пеногаситель	2,0
No FOAM	Пеногаситель	3,0
ТПФН	Регулятор вязкости бурового раствора	0,5
ФХЛС	Регулятор вязкости бурового раствора	8,0

Методика экспериментов. В 10 герметичных полипропиленовых контейнерах объемом 100 см³ помещалось 50 мл отходов буровых растворов и 50 мл дистиллированной воды. Суспензия перемешивалась встряхиванием. Затем все контейнеры помещались в криокамеру при температуре –15 °С. Через сутки все контейнеры извлекались из криокамеры и оттаивали сутки при комнатной температуре. При каждой повторности один контейнер вскрывался, и из него отбиралась проба осветленного раствора. Затем не вскрытые контейнеры вновь помещались в криокамеру для выполнения следующего цикла. Таким образом, первый контейнер прошел один цикл промерзания-оттаивания, а последний — девять циклов.

Отобранные растворы фильтровались через мембранный фильтр Владипор (0,22 мкм) и консервировались азотной кислотой до концентрации 3 %.

Измерения проводились с использованием оборудования для высокочувствительного элементного анализа состава природных объектов (масс-спектрометр с ионизацией в индуктивно-связанной плазме Supres 7000), приобретенного по Программе развития МГУ. Калибровку чувствительности прибора по всей шкале масс проводили по эталонным 68-элементным растворам (ICP-MS-68A, раствор А и В), включающим все анализируемые элементы в пробах. Для контроля качества измерений и учета дрейфа чувствительности прибора анализы образцов чередовали с анализами эталонного образца с периодичностью 1:10. В качестве внутреннего стандарта в пробы вводился индий в концентрации 10 мкг/дм³. В качестве вторичного стандарта использовали стандартный образец воды TMDW. Погрешность анализа составляла от 0,5 до 2 отн. %. Для расчета концентраций элементов использовали серию градуировочных растворов, приготовленных из стандартного раствора ICP-MS-68A, в диапазоне концентраций 0,03–10 мкг/дм³. Методические особенности опубликованы в работе [Бычкова и др., 2020].

Содержание основных компонентов анализировалось в исходном растворе титриметрическими методами в лаборатории экспериментальной геохимии МГУ (табл. 2).

Таблица 2

Содержание основных компонентов в жидкой фазе шлама

Показатель	мг-экв/л	мг/л
HCO ₃ ⁻	23,6	1442,0
Ca ²⁺	1,38	27,7
Mg ²⁺	0,48	5,84
Cl ⁻	1,38	492,0
SO ₄ ²⁻	<предела обнаружения	<предела обнаружения
Na + K ⁺	23,2	533,0
Минерализация		2500,0
pH = 8,5		

Термодинамические расчеты промерзания проводились с использованием программного комплекса HCh [Шваров, 2008]. Использована 6-компонентная мультисистема C-Ca-Cl-H-Mg-Na-O, в которой возможно образование 10 минералов и водного раствора, описываемого 21 формой нахождения элементов. Термодинамические характеристики для иона кальция, карбонатных и бикарбонатных комплексов кальция и натрия взяты из работы [Bychkov, et al., 2020]. Промерзание моделировалось при постоянной температуре 0 °С и давлении 1 атм. Образование льда задавалось уменьшением количества жидкой воды.

Таблица 3

Содержание микроэлементов в жидкой фазе шлама в циклах промерзания-оттаивания, мкг/дм³

Элемент	ПДК	Число циклов									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Li	80	52,01	43,93	32,65	20,77	15,52	26,11	17,67	29	26,2	25,39
Rb	100	10,25	6,47	5,37	5,62	7,85	6,64	7,27	6,63	4,93	3,64
Cd	5	0,44	0,21	0,16	0,19	0,27	0,18	0,13	0,13	0,15	0,08
Sn	112	2,28	0,98	0,64	0,91	0,41	0,47	0,28	0,32	0,44	0,34
Cs	1000	0,51	0,32	0,36	0,38	0,96	0,85	0,51	0,58	0,48	0,34
Co	10	3,84	3,26	2,46	1,78	1,33	1,26	0,7	1,26	1,18	1,11
Sr	400	949	724	483	296	246	308	205	249	301	286
Ba	740	332	255	159	107	106	114	78,13	97,3	115	112
Ti	60	364	253	222	180	139	77,4	11,4	85,8	98,3	159
V	1	56,4	41,9	30,8	18,9	16,1	23,1	15,6	26,6	26,4	27,2
Cr	20	36,7	26,5	19,2	14,3	13,8	11,0	6,84	12,8	13,6	13,1
Mn	10	40,6	25,3	21,5	19,9	13,7	14,2	8,04	15,9	13,1	12,4
Ni	10	32,5	25,5	18,9	16,9	16,37	20,9	15,2	20,8	20,2	16,8
Cu	1	70,0	14,2	12,5	20,2	12,4	9,1	13,5	9,64	11,0	2,82
Pb	6	7,86	4,85	4,15	4,26	2,49	1,91	1,16	1,66	1,83	1,67
Zn	10	119	28,4	109	38,9	62,0	45,8	20,8	75,8	37,9	20,3

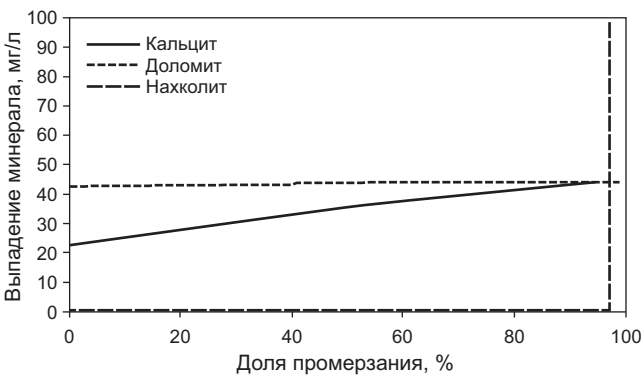


Рис. 1. Отложение минералов из раствора при промерзании

Результаты исследований и их обсуждение. Жидкая фаза шлама представляет собой раствор бикарбоната натрия с небольшим содержанием хлоридов кальция и магния (табл. 2). По сравнению с исходным буровым раствором жидкая фаза шлама разбавлена, по меньшей мере, двукратно, видимо за счет пресной грунтовой воды и льда. Участие рассолов не обнаруживается. Кислотность раствора задается бикарбонатным буфером и составляет 8,5. В этих условиях большинство металлов в растворе малоподвижно, что приводит к образованию труднорастворимых карбонатов. Термодинамические расчеты показали, что этот раствор при температуре 0°С и давлении 1 атм пересыщен относительно кальция и доломита (рис. 1). Из 1 дм³ раствора должно выпасть 22,6 мг кальцита и 42,3 мг доломита. Однако, пересыщенные растворы карбонатов, особенно, доломита, устойчивы при низкой температуре. При промерзании кальцит выпадает дополнительно, его

количество возрастает до 44,6 мг из 1 дм³ раствора. При кристаллизации 98 % воды начинает выпадать нахколит (NaHCO₃).

Изменение содержания микроэлементов в растворе в циклах промерзания-оттаивания приведено в табл. 3. Сопоставление исходного содержания микроэлементов с предельно допустимыми концентрациями токсичных элементов в воде показывает существенное превышение по ряду элементов. Показано, что по общему содержанию вредных для здоровья ионов, превышающих ПДК, преобладают в основном щелочноземельные металлы (стронций и барий).

Содержание всех элементов в циклах промерзания-оттаивания снижается. Исключение составляет только цезий, концентрация которого возрастает в 4 цикле и превышает исходное содержание. Из-за большой разницы в содержании разных элементов, графически удобно изображать тренд изменения в относительных единицах, рассчитанных по формуле:

$$C_i^* = C_i / C_i^0 \cdot 100 \%,$$

где C_i^* — относительная величина, %; C_i — содержание микроэлемента в жидкой фазе в определенном цикле, мкг/дм³; C_i^0 — содержание микроэлемента в жидкой фазе в нулевом цикле, мкг/дм³.

Изменение относительных концентраций в циклах промерзания-оттаивания показано на рис. 2.

Для щелочных металлов основными формами нахождения в растворе являются однозарядные ионы, их выведение из раствора возможно благодаря сорбции на поверхности глинистых минералов. Предполагалось, что в процессе промерзания и оттаивания

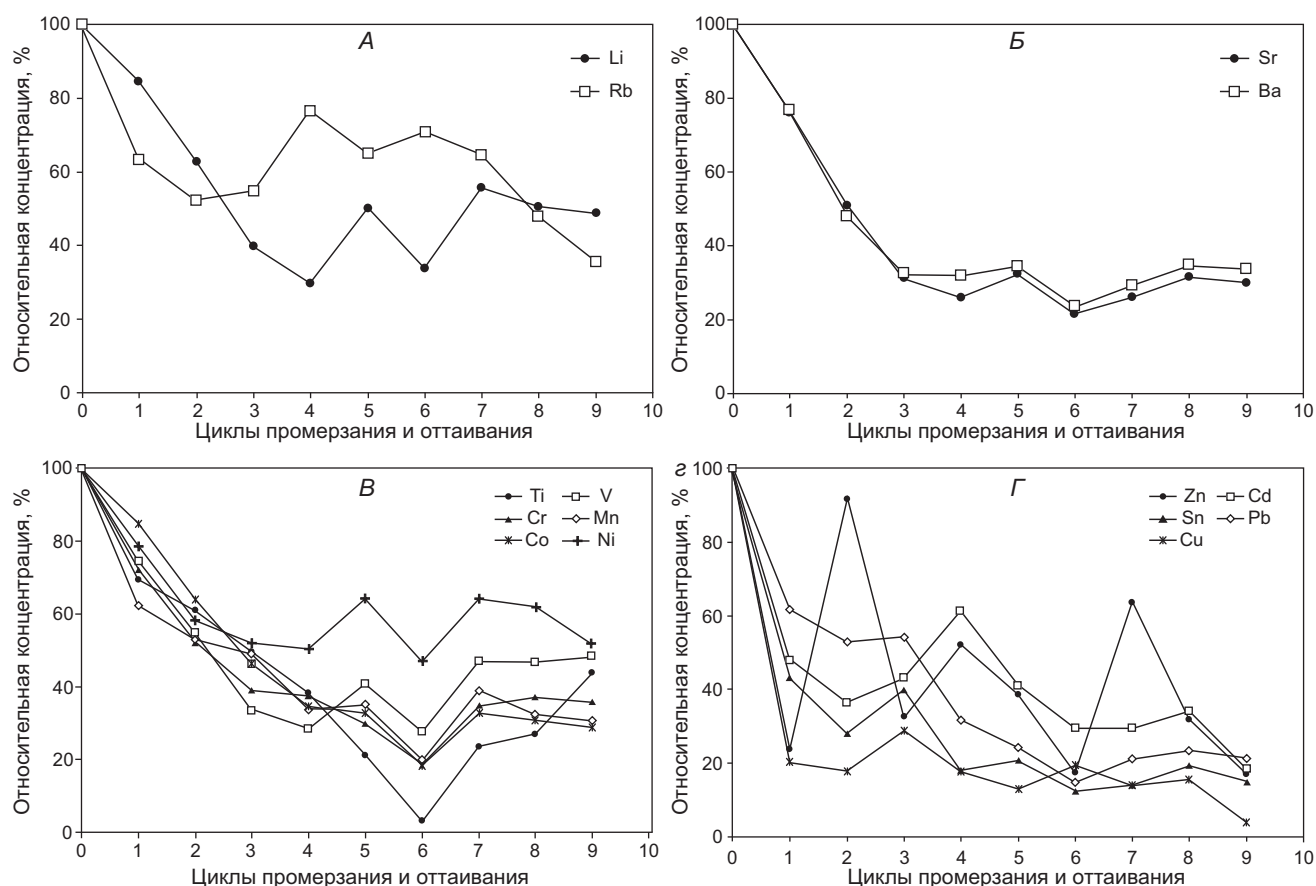


Рис. 2. Изменение концентрации элементов в растворе в циклах промерзания — оттаивания: А — щелочные металлы; Б — щелочноземельные металлы; В — d-элементы; Г — халькофильные элементы

будет меняться толщина двойного электрического слоя (ДЭС) частиц бентонитовой глины и иных коллоидов, образованных органическими компонентами, входящими в нефтепродукты. За счет этого будет происходить интенсивный обмен между ионами на поверхности твердых частиц и в толщине ДЭС с буровым раствором, при котором концентрация ионов в растворе будет интенсивно меняться. В этом случае могли происходить процессы как адсорбции ионов из бурового раствора, так и замещения части этих ионов на другие ионы из ДЭС бентонита, который мог адсорбировать значительное количество ионов еще до добавления в ОБР.

В случае однозарядных ионов щелочных металлов такой тенденции в случае легких ионов не прослеживается, что вполне соответствует специфике обмена ионов в ДЭС в связи с постепенным замещением катионов ионами, вызывающими большую поляризуемость молекул воды по сравнению с натрием и калием.

На рис. 2, А видно отсутствие систематики обмена щелочных металлов в цикле промерзания-оттаивания в случае лития, как самого легкого однозарядного иона, вызывающего низкую поляризацию воды в растворе, и появление некоторой тенденции поглощения у более тяжелых металлов.

Для щелочноземельных элементов Sr и Ba наблюдается одинаковое снижение концентрации

в растворе (рис. 2, Б). После 3 цикла промерзания-оттаивания содержание становится равным 30 % от исходного значения и далее практически не меняется. Такое снижение можно объяснить соосаждением этих элементов с новообразованным карбонатом кальция. Выведение карбоната кальция из раствора необратимо, поэтому дальнейшее снижение концентрации не происходит.

На рис. 2, В показано поведение d-элементов (Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni). Концентрация этих элементов в растворе быстро снижается и достигает минимума к шестому циклу. Титан, ванадий и хром являются элементами — гидролизатами, для них главные формы нахождения в растворе — коллоидные частицы. Снижение может объясняться коагуляцией коллоидов с образованием агрегатов размером более 0,45 мкм, которые остаются на фильтре. Коагуляция может происходить благодаря дегидратации коллоидов при промерзании или кристаллизационному давлению между кристаллами льда. Важно отметить, что после шестого цикла наблюдается повышение концентрации, особенно заметное для титана. Это свидетельствует о том, что агрегаты коллоидных частиц могут разрушаться. Для Mn, Co и Ni наряду с коллоидами играют роль формы нахождения в растворе в виде ионов и комплексов. Это может объяснять относительно меньшее выведение никеля из раствора.

На рис. 2, Г показано поведение халькофильных элементов в циклах промерзания и оттаивания. Их относительная концентрация быстро снижается уже после первого цикла промерзания. По доле выведения они образуют ряд: $Cu > Zn > Sn > Cd > Pb$. Цинк образует наименее прочные формы, связывающие его на твердой фазе, поскольку наблюдаются существенные изменения степени выведения в ряде циклов. В меньшей степени этот эффект наблюдается для кадмия. Объяснение механизма выведения халькофильных элементов из раствора имеет комплексный характер и может быть связан с адсорбцией на поверхности глинистых минералов, соосаждением с новообразованными карбонатами и коагуляцией коллоидов.

Комплекс процессов приводит к уменьшению подвижности всех элементов в циклах промерзания-оттаивания и в результате концентрация опасных компонентов снижается.

Выводы. По общему содержанию вредных для здоровья ионов в исследуемом ОБР, превышающих ПДК, преобладают в основном щелочноземельные металлы (стронций и барий).

В циклах промерзания-оттаивания для большинства токсичных металлов наблюдается общая тенденция снижения концентрации в водном растворе. Предлагается три механизма связывания элементов при промерзании:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бычкова Я.В., Стародымова Д.П., Шайхутдинова К.В. и др. Особенности химической подготовки проб донных отложений для мультиэлементного анализа методом ИСП-МС // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 4. С. 45–54.

Вакуленко И.С., Смирнов В.И., Сурин С.Д. Опыт строительства и перспективы использования подземных резервуаров в многолетнемерзлых породах для захоронения отходов бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 1. С. 222–229.

Волков И.М., Иванов В.Б. Инновационные подходы в проектировании объектов размещения буровых отходов в свете послепроектной оценки воздействия на окружающую среду объектов обустройства месторождений Среднего Приобья // Культура, наука, образование: проблемы и перспективы. 2015. С. 21–24.

Голубев Е.В., Соромотин А.В., Вепренцева Н.А., Микушина Н.Б. Состав и свойства буровых отходов Западной Сибири // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 6 (25). С. 319–320.

Рядинский В.Ю., Соромотин А.В., Денек Ю.В. Состав и свойства буровых отходов Западной Сибири // Вестник

1. Адсорбция на поверхности глинистых минералов, которая увеличивается с ростом минерализации и, соответственно, ионной силы раствора в ходе кристаллизации льда. Этот процесс контролирует поведения, главным образом, щелочных металлов, для которых главной формой нахождения в растворе является ионы.

2. Соосаждение с карбонатом кальция. По результатам расчетов, раствор пересыщен относительно кальцита, при промерзании степень пересыщения возрастает. Этот процесс представляется наиболее важным для щелочноземельных элементов.

3. Коагуляция коллоидных растворов, которая происходит как за счет роста минерализации, так и за счет механического сдавливания между кристаллами льда. Этот эффект наиболее значим для элементов-гидролизатов (Ti, Cr, V), для которых коллоиды являются главной формой нахождения в водных растворах.

Многочисленное циклическое промерзание-оттаивание приводит к снижению содержания вредных для здоровья человека ионов щелочноземельных металлов, преобладающих в ОБР.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № АААА-А16-116033010094-4 «Теоретические основы геокриологического прогноза и картирования криолитозоны России».

Тюменского государственного университета. 2004. № 3. С. 51–54.

Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, представленные Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898–903.

Шорникова Е.А. Некоторые возможные способы утилизации отходов бурения и нефтедобычи // Биологические ресурсы и природопользование. Сургут: Дефис, 2002. Вып. 5. С. 99–109.

Приказ Росрыболовства от 18.01.2010 № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 09.02.2010 № 16326).

Bychkov A.Yu, Bénézeth P, Pokrovsky O.S., et al. Experimental determination of calcite solubility and the stability of aqueous Ca- and Na-carbonate and -bicarbonate complexes at 100–160 °C and 1–50 bar pCO₂ using in situ pH measurements // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2020. Vol. 290. P. 352–365.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 549.01

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-57-64

ГЕОХИМИЯ ЦИРКОНИЯ В ПОЗДНЕМАГМАТИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ В УЛЬТРАМАФИТ-МАФИТОВЫХ ИНТРУЗИВАХ НА ПРИМЕРЕ КИВАККСКОГО РАССЛОЕННОГО МАССИВА (СЕВЕРНАЯ КАРЕЛИЯ)

Елизавета Петровна Микляева¹, Андрей Юрьевич Бычков²,
Ирина Юрьевна Николаева³, Мария Евгеньевна Тарнопольская⁴,
Елена Анатольевна Минервина⁵

¹ Геологический институт РАН, Москва, Россия; yxenon@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; andrewbychkov@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2560-6423>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; niko-geo@mail.ru

⁴ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия; mashatarnopolskaya@yandex.ru

⁵ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия; elena-minervina@yandex.ru

Аннотация. Циркон является важным минералом, который сохраняет геохимические индикаторы магматического процесса и широко используется для геохронологии. В последнее время помимо циркона магматического происхождения выделяют зерна гидротермального генезиса. Однако термодинамического описания поведения циркония в постмагматических процессах до сих пор не получено. В данной работе на примере Киваккского расслоенного массива рассмотрено поведение циркония в ультрамафит-мафитовых интрузивах. Цирконий, как некогерентный элемент накапливается в расплаве в ходе кристаллизации массива, происходит его кристаллизация в верхней приконтактной части интрузива, а затем гидротермальное преобразование и переотложение в постмагматическом процессе.

Ключевые слова: циркон, расслоенный массив, постмагматический процесс, геохимия циркона, Кивакка

Для цитирования: Микляева Е.П., Бычков А.Ю., Николаева И.Ю., Тарнопольская М.Е., Минервина Е.А. Геохимия циркония в позднемагматическом процессе в ультрамафит-мафитовых интрузивах на примере Киваккского расслоенного массива (Северная Карелия) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 57–64.

ZIRCONIUM GEOCHEMISTRY IN THE LATE MAGMATIC PROCESS IN ULTRAMAFIC-MAFIC INTRUSIONS ON THE EXAMPLE OF THE KIVAKKA LAYERED MASSIF (NORTH KARELIA)

Elizaveta P. Miklyaeva¹, Andrey Yu. Bychkov², Irina Yu. Nikolayeva³,
Mariya E. Tarnopolskaya⁴, Elena A. Minervina⁵

¹ Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; yxenon@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; andrewbychkov@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0003-2560-6423>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; niko-geo@mail.ru

⁴ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS), Moscow, Russia; mashatarnopolskaya@yandex.ru

⁵ Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry (IGEM RAS), Moscow, Russia; elena-minervina@yandex.ru

Abstract. The zircon is an important mineral that preserves geochemical indicators of the magmatic process and is widely used for geochronology. Recently, in addition to zircon of magmatic origin, grains of hydrothermal origin have been isolated. However, a thermodynamic description of the behavior of zirconium in postmagmatic processes has not yet been obtained. In this work, using the example of the Kivakka layered massif, the behavior of zirconium in ultramafic-mafic intrusions is considered. Zirconium, as an incoherent element, accumulates in the melt during crystallization of the massif; it crystallizes in the upper contact part of the intrusion, and then undergoes hydrothermal transformation and re-deposition in the postmagmatic process.

Keywords: zircon, layered massif, post-magmatic process, zircon geochemistry, Kivakka

For citation: Miklyaeva E.P., Bychkov A.Yu., Nikolayeva I.Yu., Tarnopolskaya M.E., Minervina E.A. Zirconium geochemistry in the late magmatic process in ultramafic-mafic intrusions on the example of the Kivakka layered massif (North Karelia). *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 57–64. (In Russ.).

Введение. Раннепротерозойские расслоенные мафит-ультрамафитовые интрузии образуют протяженный пояс в северной Фенноскандии вдоль Полярного круга [Alapieti et al., 1990]. Многочисленные петрологические и геохимические исследования различных мафит-ультрамафитовых пород расслоенных интрузивов показывают, что основным механизмом их образования является фракционная кристаллизация. Несмотря на различия в составе родительских магм, общая последовательность кристаллизации обеспечивается физико-химическими условиями застывания массива.

Образование расслоенных интрузивов интерпретировалось различными исследователями как результат направленной кристаллизации интрузии от границ камеры до ее центральной части [Martin, 1990; Latypov, Chistyakova, 2009], или к образованию кристаллов в своде камеры с последующим их погружением и скоплением на дне [Коптев-Дворников и др., 2001; Бычкова, Коптев-Дворников, 2004]. Как правило, в центре внимания исследований расслоенных интрузивов находятся расслоенные серии, а лейкократовые породы верхних зон массивов, расположенных непосредственно под крышей интрузивной камеры не вызывают интереса, так как не перспективны с точки зрения минеральных ресурсов. Тем не менее, они интересны нетипичным химическим и минеральным составом по сравнению с расслоенными сериями. В некоторых крупных массивах, таких как Бушвельд, лейкократовые породы изучены достаточно хорошо [Van Tongeren, 2010; Cawthorn, 2013], но эти породы никогда не изучались или исследованы фрагментарно в других массивах. Помимо кристаллизации, могут существовать другие факторы, также вовлеченные в процесс генезиса лейкократовых пород, такие как контаминация, смешение мантийных и коровых магм, минеральное растворение, несмесимость силикатных расплавов и постмагматические процессы. Анализ публикаций, посвященных различным расслоенным интрузиям [Wager, Brown, 1968; Cawthorn, 2013] показывает, что в большинстве расслоенных массивов Верхняя приконтактовая зона представлена лейкократовыми породами, существенно обогащенными некогерентными элементами, имеет нетипичный для расслоенного массива химический и минеральный состав.

В породах Верхней приконтактовой зоны Киваккского массива присутствуют различные акцессорные минералы, в том числе кристаллы циркона разных форм, затронутые постмагматическими гидротермальными процессами. Стабильность циркона делает его мощным геохронологическим, изотопным и геохимическим инструментом, однако при этом важно оценивать вероятность подвижности элементов в цирконе в зависимости от степени метамиктизации и гидротермальных изменений в поврежденных зонах.

В данной работе рассматривается химический состав минералов циркония, особенности изменений и взаимного расположения акцессорных минералов

лейкократовых стяжений габбро-норитов Верхней приконтактовой зоны Киваккского массива. На основе рассмотренного материала делаются выводы о мобилизации циркония и переотложении минералов в постмагматическом процессе.

Характеристика Киваккского расслоенного интрузива. Геологическое строение ультрамафит-мафитового Киваккского расслоенного интрузива хорошо изучено [Коптев-Дворников и др., 2001]. Интрузия отличается неоднородностью и выраженной стратификацией. Кажущаяся толщина интрузивного тела в центральной части достигает ~2000 м. Возраст массива оценивается по Sm-Nd модели в 2423–2420 млн лет [Amelin, Semenov, 1996].

В отличие от большинства докембрийских массивов Балтийского щита, Киваккский массив сложен относительно свежими неизмененными породами. Для структуры массива характерна последовательная смена пород различной степени дифференциации, осложненная ритмичным переслаиванием.

Геологический разрез массива также подробно изучен [Коптев-Дворников и др., 2001; Бычкова, Коптев-Дворников, 2004], включая детальное петрографическое описание с акцентом на основные порообразующие и акцессорные минералы среди кумулятивных минералов (кумулус) и интеркумулятивной основной массы (интеркумулус).

Большая часть верхних зон расслоенных интрузий разного возраста, например, Бушвельд (Южная Африка), Скаергаард (Гренландия), Стиллуотер (Монтана, США), Йоко-Довырен (Байкальский регион, Россия), Ципринга (Северная Карелия, Россия), а также Кивакка, характеризуются систематическим появлением экзотических лейкократовых пород с необычными химическими характеристиками по сравнению с вмещающими породами этих массивов [McCallum, 1996; Cawthorn, 2013].

Данные породы всех названных массивов, называемые гранофирами, характеризуются симплектитовыми сростаниями кварца и полевого шпата. Они обогащены титаном, калием, фосфором и редкоземельными элементами.

Систематический анализ полученных данных о химическом составе продуктов магматической дифференциации Киваккского интрузива и лейкократовых гранофировых тел во вмещающих габбро-норитах показывает, что эти породы существенно отличаются от всех известных пород массива, в том числе от вмещающих габбро-норитов, где они локализируются. Например, гранофиры характеризуются аномально высокими концентрациями фосфора и редкоземельных элементов и циркония. Еще одна особенность лейкократовых линз — наличие отрицательной Eu аномалии, тогда как вмещающие габбро-нориты имеют положительную Eu аномалию, указывающую на наличие значительной доли плагиоклаза в породах [Bychkova et al., 2019a].

Материалы и методы исследования. Материалом для исследования послужили образцы из пород

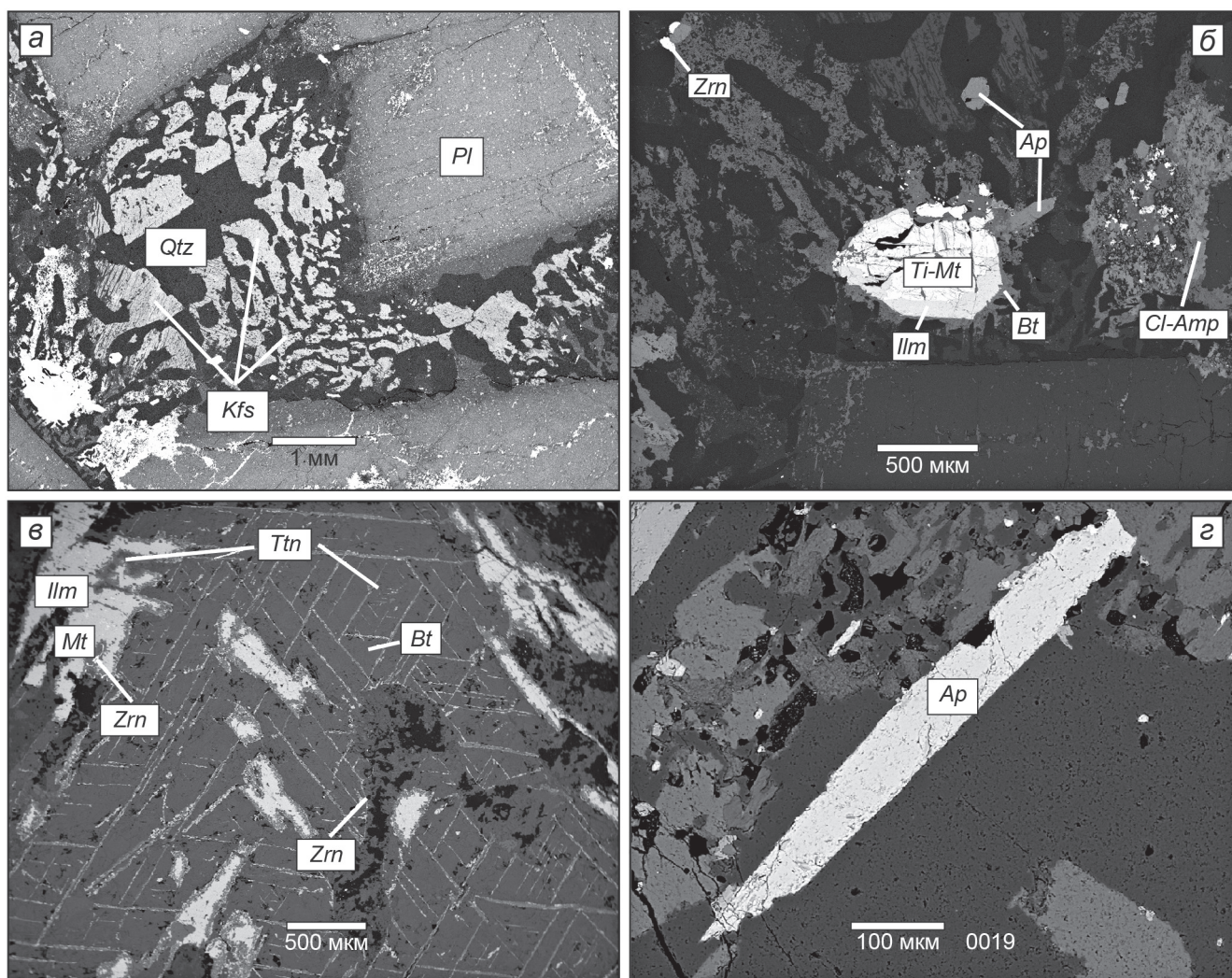


Рис. 1. Минералы лейкокатовых стяжений Верхней приконтактной зоны Кивакского массива: а — симплектитовые срастания кварца с КПШ, б — титаномагнетит и ильменит, в — замещение рудных минералов биотитом с оторочками циркона в трещинах, г — кристалл апатита

лейкокатовых стяжений в габбро-норитах Верхней приконтактной зоны Кивакского массива — KVP 74, KVP 76, KVP 73 и KVP 84, из которых были изготовлены прозрачно-полированные шлифы.

Микронзондовые исследования минералов выполнены на электронном микроскопе «Jeol» (JSM6480LV) в лаборатории локальных методов исследования вещества геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Локальный количественный анализ химического состава минералов проводили с помощью приставки для энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа «IncaEnergy-350». Аналитик В.О. Япаскерт.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой в сочетании с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) использовалась с целью определения редкоземельных элементов и других примесей в ИГЕМ РАН. Анализ проводился на квадрупольном масс-спектрометре ThermoXSeries 2 с системой лазерного пробоотбора NewWaveUP213. Размер кратеров составлял 80–100 мкм. Исследуемый материал образца отбирается под воздействием сфокусированного

лазерного луча и транспортируется газом-носителем (гелием) в высокотемпературную (6000–8000 °C) плазму, где ионизируется аналогично аэрозолю жидкого образца. В качестве градуировочной серии использовались стандартные образцы силикатных стекол NIST-SRM-610, NIST-SRM-612, NIST-SRM-614.

Термодинамические расчеты проводились с использованием программного комплекса HCh [Шваров, 2008]. Использована 14-компонентная мультисистема Al-Ca-Cl-F-Fe-H-K-Mg-Na-O-P-Si-Ti-Zr, в которой возможно образование 34 минералов и водного раствора, описываемого 71 формой нахождения элементов. Термодинамические характеристики комплексов циркония взяты из работ [Shock, et al., 1997; Migdisov, et al., 2011; Тарнопольская, Бычков, 2019].

Результаты и их обсуждение. Особенности минерального состава пород верхней приконтактной зоны Кивакского массива. Стяжения верхней приконтактной зоны обладают нехарактерным для массива минеральным составом. Размер графических срастаний кварца с полевым шпатом, встреча-

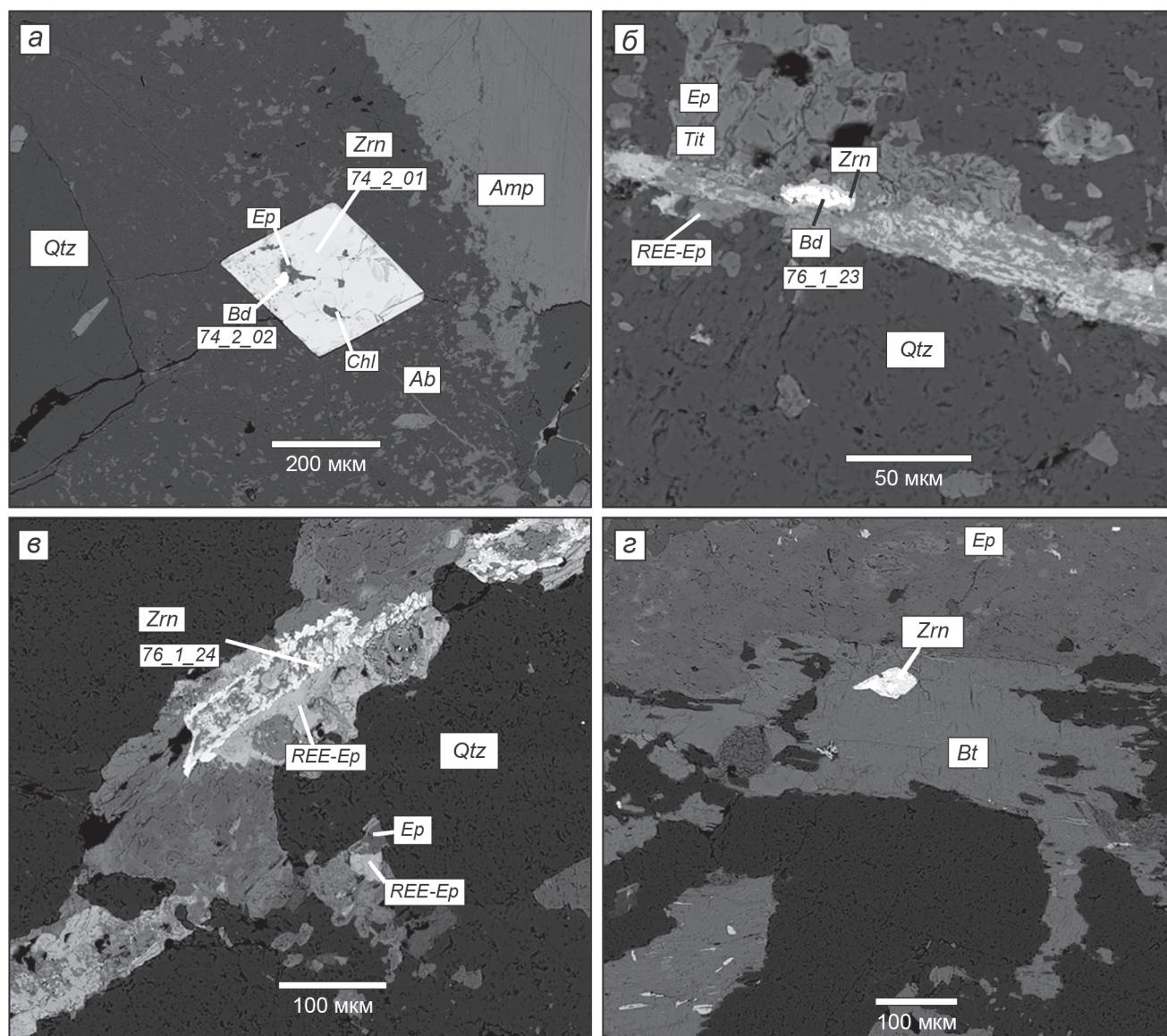


Рис. 2. Минералы Zr в породах лейкократовых стяжений Верхней приконтактной зоны Кивакского массива: а — идиоморфный кристалл циркона (KVP74.2), б — кайма циркона на зерне бадделеита (KVP76.1), в — замещение зерна бадделеита (?) цирконом (KVP76.1), з — субидиоморфное зерно циркона (KVP84.2)

ющихся среди крупно- и гигантозернистых пород линзовидных стяжений, составляет около 1–10 мм (рис. 1, а). Наряду с симплектитовыми срастаниями в линзах присутствуют отдельные крупные зерна кварца (около 15%), плагиоклаза и полевых шпатов (20–30%). Зерна плагиоклаза субидиоморфны, около 2 мм длиной, с учетом вторичных изменений, альбитизации и сосюритизации. Биотит присутствует в виде крупных таблитчатых и мелких ксеноморфных кристаллов размером до 1,8 мм, содержание его в породах около 10–15%. Зерна пироксена крупные, субидиоморфные, размером около 1–2 мм, часто полностью или частично заменяются амфиболом. Присутствует и клинопироксен, и пижонит. Часто зерна пироксена частично замещаются амфиболом. Размеры неизмененных зерен пироксена около 0,5 мм. Содержание пироксена в породах составляет от 5 до 10%.

Амфибол представлен крупными ксеноморфными кристаллами, плеохроирующими в сине-зеленых тонах с ярко-зеленой хлорсодержащей зоной по краю, около 2 мм в длину. Содержание амфибола в породе около 20%.

Рудные минералы представлены титаномагнетитом, ассоциирующим с ильменитом (рис. 1, б). В ильмените наблюдаются ламели магнетита. Первичные субидиоморфные кристаллы рудного минерала размером в первые миллиметры, в стяжениях были замещены биотитом. Многочисленные трещины по спайности исходного кристалла заполнены оторочками титанита и циркона (рис. 1, в).

Апатит присутствует в виде игольчатых кристаллов различного размера, до 2 мм (рис. 1, з). Распределены они неравномерно и сложно определить их количественное содержание в породе. Некоторые из апатитов идиоморфны, в то время как другие ха-

рактируются наличием трещин и неровных краев. Во многих кристаллах присутствуют участки, обогащенные Cl. Среди акцессорных минералов встречается титанит, возможно вторичный, бесцветный, размером до 0,9 мм, связанный с оксидами Fe и Ti. Также наблюдаются продолговатые, таблитчатые, бесцветные кристаллы эпидота (10 %).

В лейкократовых крупнозернистых стяжениях габбро-норитов Верхней приконтактной зоны Киваккского массива встречаются зерна циркона и бадделеита. Зерна в основном имеют размеры от 50 до 100 мкм (рис. 2, г). В ряде случаев центр зерна выполнен бадделеитом, кристаллизовавшимся на более ранних стадиях дифференциации расплава, а циркон образует вокруг него кайму (рис. 2, б), в некоторых случаях циркон замещает его полностью (рис. 2, в). Такие зерна субидiomорфны, присутствуют в ассоциации с биотитом, эпидотом и амфиболом, имеют вторичное происхождение.

Также в шлифах было обнаружено более крупное идиоморфное зерно циркона размером 300 мкм (рис. 2, а). В зерне наблюдаются трещины, ведущие к хлоритизированным и эпидотизированным участкам. Внутри этой зоны находится мелкое (около 40 мкм) зерно бадделеита. Значительных следов метамиктизации циркона на изображении СЭМ не было обнаружено. Для данного зерна был проведен анализ методом LA-ICP-MS, установлено распределение редкоземельных элементов (rare-earth element, REE).

Геохимические особенности минералов циркония. В образцах лейкократовых стяжений присутствуют кристаллы циркона разных форм — крупные идиоморфные, каймы из мелких кристаллов циркона на других минералах и отдельные мелкие зерна, а также бадделеит и цирконолит. Химический состав минералов циркония был определен с помощью электронного микрозонда (табл. 1). Отношения Zr/Hf в некоторых цирконах различаются в два раза, разброс значений от 35 до 78. Крупный кристалл циркона был проанализирован методом LA-ICP-MS. В распределении редкоземельных элементов идиоморфного циркона верхней приконтактной зоны Киваккского массива присутствует характерное для циркона обогащение тяжелыми REE и обеднение легкими, относительно CI хондрита [McDonough, Sun, 1995]. При этом наблюдаются положительная Ce аномалия (18,3 и 5,5) и отрицательная Eu аномалия (0,04 и 0,07) (рис. 3).

Суммарное содержание REE в цирконе Киваккского массива высоко (8735; 9637 ppm, табл. 2), что сравнимо с содержанием в гранитоидах [Thomas et al., 2002] и значительно превышает суммарное со-

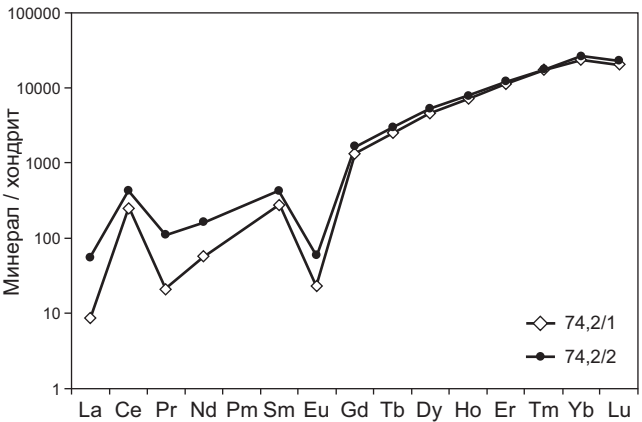


Рис. 3. Диаграмма распределения редкоземельных элементов в цирконе ВПЗ Киваккского массива

Таблица 1
Состав макрокомпонентов циркона и бадделеита ВПЗ Киваккского массива (мас. %)

	SiO ₂	CaO	TiO ₂	FeO	ZrO ₂	HfO ₂	Total	ZrO ₂ /HfO ₂
Циркон								
KVP76.1	32,47	0,09	–	0,36	64,86	1,84	99,61	35,25
KVP74.2	32,20	–	–	–	64,14	1,65	97,99	38,87
KVP73	32,17	0,15	–	0,22	64,14	0,82	99,59	78,22
KVP84.2	32,86	–	0,51	1,01	65,60	0,90	102,53	72,89
KVP 16_08	31,32	–	0,32	0,24	64,53	0,49	96,9	131,69
KVP 16_09	31,63	–	–	0,92	64,75	–	97,3	–
Бадделеит								
KVP73	–	–	0,62	0,12	95,44	1,37	99,94	69,66
KVP76.1	–	0,11	0,66	0,28	96,36	2,57	99,97	37,49

держание REE циркона аналогичного расслоенного комплекса Стиллаутер, где наибольшее суммарное значение REE в цирконе обнаружено в анортозитах Средней расслоенной серии и не превышает 2452 ppm [Wall et al., 2018]. Также в цирконе Киваккского массива резко отрицательные Eu аномалии, сопоставимые по значениям только с аномалиями циркона из анортозитов в комплексе Стиллаутер (0,03) [Wall et al., 2018].

В Киваккском массиве это обусловлено высокой степенью дифференциации пород стяжений Верхней приконтактной зоны Киваккского массива, валовое значение REE в породах массива растет вверх по разрезу, достигая резкого пика концентрации в породах лейкократовых стяжений [Бычкова и др., 2019].

В цирконе присутствуют Ce-аномалии, по величине занимающие промежуточное положение между

Содержание REE в цирконе ВПЗ Киваккского массива (ppm)

	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Eu/Eu*	Ce/Ce*	(La/Yb) _n	(Sm/La) _n	Сумма
74.2/1	2	147	1.9	26	41	1.3	263	92	1117	405	1795	413	3927	503	0,04	18,33	0,0003	33,06	8735
74.2/2	13	259	10.1	74	62	3.3	323	110	1282	434	1927	428	4152	560	0,07	5,47	0,0021	7,77	9637

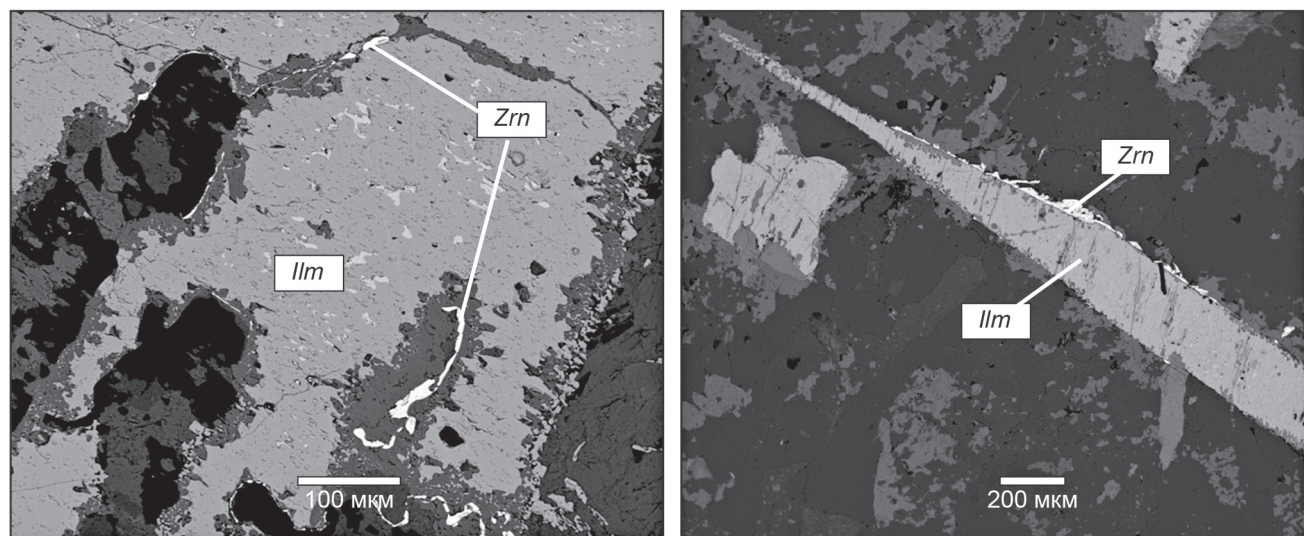


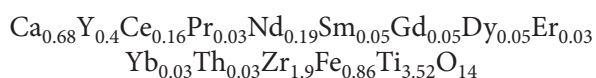
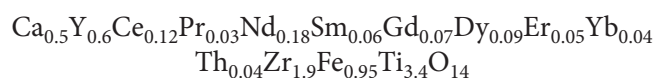
Рис. 4. Оторочки циркона на ильмените в Верхней приконтактной зоне Киваккского массива

цирконами магматического и гидротермального происхождения. Отношение $(\text{Sm}/\text{La})_n$ в одной части зерна циркона соответствует магматическому циркону, в другой приближается к значениям для гидротермального. Сопоставления отношения $(\text{Sm}/\text{La})_n$ с Се-аномалией и содержанием La также показывают, что циркон занимает промежуточное положение, причем одна зона более тяготеет к циркону магматического происхождения, другая — гидротермального. Подобное распределение REE характерно для циркона магматического происхождения, затронутого гидротермальными изменениями [Hoskin, 2005]. На гидротермальную переработку также указывает наличие обогащенной хлором каймы на апатитах и эпидотах лейкократовых стяжений Киваккского массива, трещины в кристалле циркона, сопровождающиеся хлоритизированными и эпидотизированными зонами.

Циркон обогащен легкими REE. Подобное обогащение было показано и для циркона в гранофирах массива Стиллуотер [Wall et al., 2018], из чего исследователями был сделан вывод об обогащенности флюида легкими REE.

Для циркона, замещающих кристаллы бадделеита и других минералов провести анализ REE не представляется возможным, но по их форме и взаимоотношениям с другими минералами можно сделать вывод об их постмагматическом происхождении.

Также в линзовидных образованиях Верхней приконтактной зоны присутствуют мелкие кристаллы цирконолита. По результатам микрозондового анализа было обнаружено его обогащение REE и установлена химическая формула для двух зерен цирконолита:



Условия и механизм образования минералов циркония. Основная часть пород Верхней приконтактной зоны, представленных равномернозернистыми габбро-норитами, кристаллизовалась при температуре около 1200 °C [Bychkova et al., 2019a]. Кристаллы, слагающие габбро-нориты, субидiomорфные, по мере приближения к лейкократовым стяжениям размеры кристаллов увеличиваются от долей мм до первых см.

В очагах остаточного расплава происходит кристаллизация апатита и титаномagnetита. Кристаллы апатита идиоморфные, удлиненные, достигают размеров до первых миллиметров в длину, иногда образуют сростки с титаномagnetитом. Кристаллизация апатита начинается еще на последних стадиях кристаллизации габбро-норитов, предположительно при температурах около 1000–900 °C, единичные кристаллы апатита захватываются крупными кристаллами пироксена. Часть кристаллов апатита захвачена измененными зернами амфибола, в основном же апатит сосредоточен в кварц-полевошпатовых сростаниях. На этой стадии образуются также субидiomорфные кристаллы сфена и циркона магматического происхождения, также мелкие кристаллы рутила и цирконолита.

Режим фтора и хлора в постмагматических флюидах установлен по составу апатита с использованием уравнений из работы [Коржинский, 1981; Аксюк, 2002]. Результаты показали, что в равновесии с апатитом флюиде соотношение активности $\lg(X_{\text{HF}}/X_{\text{H}_2\text{O}}) = -2,4$, $\lg(X_{\text{HCl}}/X_{\text{H}_2\text{O}}) = -3,0$.

Кристаллы титаномagnetита субидiomорфные, размером до первых миллиметров. При температуре около 690 °C [Ghiorso, Evans, 2008] происходит распад твердого раствора с образованием ильменита и magnetита. При дальнейшем понижении температуры в данных структурах распада происходит замещение magnetита биотитом. Происходит также амфиболизация пироксенов по краям кристаллов, амфиболовые оторочки обогащены хлором. Соглас-

но расчетам в комплексе программ NCh концентрация Zr, находящегося во флюиде преимущественно в виде фторидных комплексов, начинает снижаться при температуре 600 °C и падает до минимума при 350 °C. Эти условия соответствуют выпадению из раствора гидротермального циркона. Мы наблюдаем тонкие оторочки гидротермального циркона на зернах ильменита (рис. 4). Ti, обладающий схожими свойствами с Zr, вступает с ним в конкуренцию, что вызывает разрушение комплексов Zr и отложение циркона на поверхности Ti-содержащих минералов. Этот циркон обладает низким содержанием Hf по сравнению с магматическим цирконом ВПЗ Кивакского массива (KVP 16_08, KVP 16_09, табл. 1).

Процесс кристаллизации завершается образованием кварц-полевошпатовых сростаний при температуре около 570 °C, рассчитанной с помощью двуполевошпатового геотермометра [Putirka, 2008]. Симплектиты локализуются между крупными кристаллами плагиоклаза и концентрируют в себе большую часть апатита и других акцессорных минералов.

При дальнейшем остывании массива происходит ряд низкотемпературных изменений: серицитизация, хлоритизация, эпидотизация. Часть эпидота обогащено REE, также обогащаются редкоземельными элементами и некоторые зоны кристаллов апатита.

Образование гидротермального циркония может быть объяснено путем термодинамических расчетов. Используя оценки температуры и давления, полученных при исследовании становления верхней приконтактной зоны [Brychkova et al., 2019a] и оценок, выполненных в настоящей работе, можно реконструировать взаимодействие вода/порода. Флюид отделился от габбро-норитового расплава при кристаллизации парагенезиса плагиоклаз+бронизит+пижонит (900 °C, 2 кбар). При снижении температуры флюид находится в равновесии с минералами верхней приконтактной зоны при порододоминирующем режиме. Отношение порода/вода выбрано 20, что соответствует содержанию воды в остаточном расплаве 5 масс.%. Во флюиде задано соотношение H_2O , HCl и HF согласно оценке, приведенной выше. Остальные компоненты в растворе определяются насыщением относительно минералов породы. Состав породы соответствует составу гранофира Верхней приконтактной зоны из работы [Brychkova, et al., 2019a]. Рассчитаны равновесные состояния системы при снижении температуры от 900 °C (шаг 1) до 100 °C (шаг 17) и давлении 2 кбар.

Результаты расчетов показали, что при температуре выше 600 °C устойчив парагенезис плагиоклаз + диопсид + тремолит ($\pm$ парогонит, $\pm$ эпидот + хлорит), при меньшей температуре устойчивы кварц + плагиоклаз + волластонит + эпидот + хлорит (рис. 5, а). При температуре 200 °C появляется парогонит. Эти парагенезисы в целом отвечают наблюдаемым вторичным минералам в Верхней приконтактной зоне. Во всех парагенезисах присутствует циркон и F-apatit. Устойчивость апатита приводит

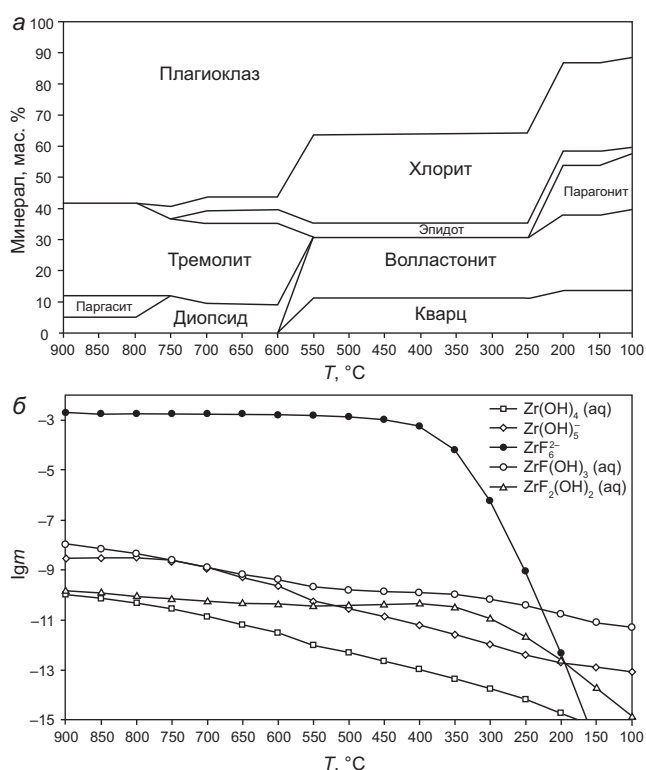


Рис. 5. Результаты термодинамических расчетов взаимодействия гранофира Верхней приконтактной зоны с постмагматическим флюидом: равновесные парагенезисы (а) и формы переноса циркония в растворе (б)

к тому, что активность HF в растворе задается его растворимостью. В результате общая концентрация фтора оказалась ниже, чем заданная изначально и составила 0,006–0,012 моль/кг. Формы нахождения циркония в растворе показаны на рис. 5, б. При температуре свыше 200 °C преобладает комплекс ZrF_6^{2-} , он обеспечивает высокую растворимость циркона, достигающую 180 ppm при 800 °C. В этих условиях практически весь фтор оказывается связан с цирконием.

При снижении температуры в интервале 400–300 °C происходит резкое уменьшение концентрации циркония и отложение гидротермального циркона. Результаты расчетов показали, что при постмагматических процессах в присутствии фтора на уровне насыщения по F-apatиту, растворимость циркона очень велика и может обеспечить его переотложение. Интересно отметить, что связь циркона и ильменита может объясняться тем, что происходит конкуренция за фтор между комплексами этих элементов.

Выводы. В результате работы было проведено комплексное исследование химического состава пород и минералов наименее изученной Верхней приконтактной зоны Кивакского расслоенного интрузива. Среди однородных мелко-, средне- и крупнозернистых габбро-норитовых пород Верхней приконтактной зоны выделяются линзовидные стяжения контрастного состава, обогащенные некогерентными элементами, представляющие собой крайние дифференциаты массива. Подобные образования характерны и для других расслоенных

массивов, следовательно, это явление закономерно и его нельзя считать случайным.

В стяжениях выявлено наличие обогащенных REE минеральных фаз, минералов циркония, следы гидротермальной переработки минералов богатым Cl флюидом. Характер взаимоотношений минералов и особенности распределения REE в цирконе позволяет предположить переотложение циркона вследствие мобилизации Zr флюидом при определенных условиях, а также гидротермальную переработку магматического циркона и обогащение его легкими REE.

Результаты термодинамических расчетов показали, что в постмагматических процессах комплекс ZrF_6^{2-} обеспечивает высокую растворимость цир-

кона, превышающую 100 ppm. При этом большая часть фтора оказывается связанной в этот комплекс.

Финансирование. Работа выполнена в рамках темы государственного задания Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова № 121061600048-7 «Развитие комплексных методов физической, прогнозно-поисковой и экологической геохимии». Исследование выполнено с использованием оборудования ЦКП «Электронно-зондовый микроанализ минерального вещества», приобретенного по Программе развития МГУ.

Благодарности. Авторы благодарны Я.В. Бычковой за постановку задачи и материалы для исследования, а также В.О. Япаскурту за проведение микрозондовых исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксюк А.М. Экспериментально обоснованные геофториметры и режим фтора в гранитных флюидах // Петрология. 2002. № 10. С. 630–644.

Бычкова Я.В., Бычков Д.А., Минервина Е.А. и др. Закономерности распределения редкоземельных элементов в Кивакском оливинит-габброноритовом расслоенном интрузиве (Северная Карелия) // Геохимия. 2019. Т. 64, № 2. С. 145–167.

Бычкова Я.В., Коптев-Дворников Е.В. Ритмическая расслоенность кивакского типа: геология, петрография, петрохимия, гипотеза формирования // Петрология. 2004. Т. 12, № 3. С. 281–302.

Коптев-Дворников Е.В., Киреев Б.С., Пчелинцева Н.Ф., Хворов Д.М. Распределение кумулятивных парагенезисов, породообразующих и второстепенных элементов в вертикальном разрезе Кивакского интрузива (Олангская группа интрузивов, Северная Карелия) // Петрология. 2001. Т. 9, № 1. С. 3–27.

Коржинский М.А. Апатитовый твердый раствор как индикатор летучести HCl и HF в гидротермальном флюиде // Геохимия. 1981. № 5. С. 689–706.

Тарнопольская М.Е., Бычков А.Ю. Экспериментальное исследование устойчивости ZrF_6^{2-} в гидротермальных растворах при 90–255°C // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 6. С. 107–111.

Шваров Ю.В. HCh: новые возможности термодинамического моделирования геохимических систем, представленные Windows // Геохимия. 2008. № 8. С. 898–903.

Alapieti T., Filén B., Lahtinen J., et al. Early Proterozoic layered intrusions in the northeastern part of the Fennoscandian Shield // Miner. Petrol. 1990. Vol. 42. P. 1–22.

Amelin Yu. V., Semenov V.S. Nd and Sr isotope geochemistry of the mafic layered intrusions in the eastern Baltic shield: implications for the sources and contamination of Paleoproterozoic continental mafic magmas // Contrib. Mineral. Petrol. 1996. Vol. 124. P. 255–272.

Bychkova Y.V., Miklaieva E.P., Koptev-Dvornikov E.V., et al. Proterozoic kivakka layered mafic-ultramafic intrusion, northern Karelia, Russia: Implications for the origin of granophyres of the upper boundary group // Precambrian Research. 2019a. Vol. 331. P. 1–21.

Cawthorn R.G. The residual of Roof Zone of the Bushveld Complex, South Africa // Journal of Petrology. 2013. Vol. 54, № 9. P. 1875–1900.

Ghiorso M.S., Evans B.W. Thermodynamics of rhombohedral oxide solid solutions and a revision of the Fe-Ti two-oxide

geothermometer and oxygen-barometer. American Journal of Science. 2008. Vol. 308. P. 957–1039.

Hoskin P.W. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. Vol. 69, № 3. P. 637–648.

Latypov R., Chistyakova S. Phase equilibria testing of a multiple pulse mechanism for origin of maficultramafic intrusions: a case example of the Shiant Isles Main Sill, NW Scotland // Geol. Mag. 2009. Vol. 146, № 6. P. 851–875.

Martin D. Crystal settling and in situ crystallization in aqueous solutions in magma chambers // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. Vol. 96. P. 336–348.

McCallum I.S. The Stillwater complex // Developments in Petrology. 1996. Vol. 15. P. 441–484.

McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. Vol. 120. P. 223–253.

Migdisov Art. A., Williams-Jones A.E., van Hinsberg V., Salvi S. An experimental study of the solubility of baddeleyite (ZrO_2) in fluoride-bearing solutions at elevated temperature // Geochim. Cosmochim. Acta. 2011. Vol. 75, № 23. P. 7426–7434.

Putirka K.D. Thermometers and Barometers for Volcanic Systems // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2008. Vol. 69(1). P. 61–120. doi:10.2138/rmg.2008.69.3

Shock E.L., Sassani D.C., Willis M., Sverjensky D.A. Inorganic species in geologic fluids: Correlations among standard molal thermodynamic properties of aqueous ions and hydroxide complexes // Geochim. et Cosmoch. Acta. 1997. Vol. 61, № 5. P. 907–950.

Thomas J.B., Bodnar R.J., Shimizu N., Sinha A.K. Determination of zircon/melt trace element partition coefficient from SIMS analysis of melt inclusions in zircon // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. Vol. 66, № 16. P. 2887–2901.

VanTongeren J.A., Mathez E.A., Kelemen P.B. A felsic end to Bushveld differentiation // Journal of Petrology. 2010. Vol. 51. P. 1891–1912.

Wager L., Brown G. Layered Igneous Rocks. Edinburgh and London, 1968.

Wall C.J., Scoates J.S., Weis D., et al. The Stillwater Complex: Integrating Zircon Geochronological and Geochemical Constraints on the Age, Emplacement History and Crystallization of a Large, Open-System Layered Intrusion // Journal of Petrology. 2018. Vol. 59, № 1. P. 153–190.

Статья поступила в редакцию 09.10.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.853

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-65-71

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОЛОГО-ПРОМЫСЛОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НИЗКОПРОНИЦАЕМЫХ КОЛЛЕКТОРОВ НА ПРИМЕРЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ШИРОТНОГО ПРИОБЬЯ

Ольга Валерьевна Тюкавкина¹, Валентин Васильевич Шелепов²,
Владимир Львович Шустер³, Ирина Леонидовна Капитонова⁴

¹ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; tov.sing@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1607-531X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; shelepov_s@mail.ru

³ Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; tshuster@mail.ru

⁴ Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия; kapitonova_il@pfur.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9707-1240>

Аннотация. Рассмотрены вопросы изучения фильтрационно-емкостных свойств низко-проницаемых коллекторов пласта Ю₂ тюменской свиты для оценки нефтенасыщенности в переходной зоне и определения положения уровня водо-нефтяного контакта с целью повышения эффективности моделирования пласта Ю₂ и установления параметров для уточнения запасов нефти. Значительные залежи нефти тюменской свиты открыты в центральной части, западном, восточном и юго-восточных крыльях Сургутского свода, которые характеризуются существенным различием дебитов скважин от долей до десятков кубических метров в сутки. Наличие переходной зоны вода-нефть в низко-проницаемых коллекторах, которая может составлять 2/3 мощности продуктивного пласта, предопределяет повышенные требования к проектированию системы разработки таких залежей, так как традиционные подходы в этом случае оказываются не всегда эффективными.

Ключевые слова: нефтенасыщенность, водо-нефтяной контакт, капиллярные силы, низко-проницаемый коллектор

Для цитируемости: Тюкавкина О.В., Шелепов В.В., Шустер В.Л., Капитонова И.Л. Результаты геолого-промыслового моделирования низкопроницаемых коллекторов на примере месторождений Широтного Приобья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 65–71.

THE RESULTS OF GEOLOGICAL MODELING OF LOW-PERMEABILITY RESERVOIRS ON THE EXAMPLE OF DEPOSITS OF THE OB RIVER REGION

Olga V. Tyukavkina¹, Valentin V. Shelepov², Vladimir L. Shuster³, Irina L. Kapitonova⁴

¹ Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; tov.sing@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1607-531X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; shelepov_s@mail.ru

³ Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; tshuster@mail.ru

⁴ RUDN University, Moscow, Russia; kapitonova_il@pfur.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9707-1240>

Abstract. The issues of studying the filtration and capacitance properties of low-permeable reservoirs of the Ю₂ formation of the Tyumen formation are considered to assess oil saturation in the transition zone and determine the position of the water-oil contact level in order to increase the efficiency of modeling the Ю₂ formation and establish parameters for clarifying oil reserves. Significant oil deposits of the Tyumen formation have been discovered in the central part, the western, eastern and southeastern wings of the Surgut arch, which are characterized by a significant difference in well flow rates from fractions to tens of cubic meters per day. The presence of a water-oil transition zone in low-permeable reservoirs, which can account for 2/3 of the capacity of a productive reservoir, determines increased requirements for the design of a system for developing such deposits, since traditional approaches in this case are not always effective.

Keywords: oil saturation, water-oil contact, capillary forces, low-permeable reservoir

For citation: Tyukavkina O.V., Shelepov V.V., Shuster V.L., Kapitonova I.L. The results of geological modeling of low-permeability reservoirs on the example of deposits of the Ob River Region. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 65–71. (In Russ.).

Введение. Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция — крупнейший нефтедобывающий регион России, на сегодняшний день здесь открыты сотни залежей нефти и газа разного типа и масштаба. Наиболее перспективными на поиски нефти по площади Сургутского свода являются нижне- и среднеюрские отложения, которые в тю-

менской свите (восточная часть свода) представлены континентальными и переходными фациями, переходящими в морские фации (северная часть свода) [Бембель и др., 2012; Гурари и др., 2005; Тюкавкина, 2020]. Многие месторождения характеризуются наличием большого фонда эксплуатационных скважин и находятся на завершающей стадии разработки.

В связи со сложными условиями формирования юрских коллекторов, в общей структуре запасов месторождений Сургутского свода существенно увеличивается доля трудноизвлекаемых запасов и труднодоступных ресурсов углеводородов.

Целью настоящего исследования является повышение качества модели низко-проницаемых коллекторов пласта Ю₂ тюменской свиты на основе новых данных фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС), полученных при дополнительных исследованиях переходной зоны водо-нефтяного контакта (ВНК).

Особенности тектонического строения исследуемой площади в разное время рассматривали многие ученые [Гогоненков и др., 2007; Гурари и др., 2005; Ермаков и др., 1997; Жеро, 1984; Конторович и др., 1975; Медведев, 2004; Мухер и др., 2005; Никонов и др., 1998; Соколов и др., 1989]. По данным предшествующих исследований Сургутский свод сформировался в доюрское или ранне-среднеюрское время. Раннеюрский возраст так же характерен для большинства средних и малых структур Сургутского свода, развитие которых характеризуется их неравномерным ростом. Необходимо подчеркнуть, что при формировании структур исследуемой площади происходили интенсивные дифференцированные тектонические движения, которые оказывали существенное влияние на условия формирования и фациальные особенности разреза юрских отложений, при этом были сформированы литологические и тектонически-экранированные ловушки [Гогоненков и др., 2007; Дружинин и др., 2009; Жеро, 1984; Конторович и др., 1975].

Все вышесказанное говорит об исключительно сложной обстановке образования юрских пород-коллекторов и предопределяет дополнительные исследования специфики заполнения ловушек углеводородами, фильтрационно-емкостных свойств, изменяющихся за счет тектоно-сейсмической деятельности, что требует детального и более сложного, комплексного подхода к изучению физико-химических и коллекторских свойств пород продуктивных пластов [Ермаков и др., 1997; Иванов, 2012; Соколов и др., 1989]. Важно отметить, что при исследовании геологических условий формирования нижнеюрских низко-проницаемых отложений, необходимо уделять внимание вопросам появления возможных зон раздробленных пород в кристаллическом фундаменте и в коре выветривания, которая может быть проницаема и насыщена углеводородами [Ивашко, 2004; Мухер и др., 2005; Сурков и др., 1981]. Эти особенности формирования низко-проницаемых коллекторов тюменской свиты подчеркивают актуальность исследования и являются основанием для детального изучения фильтрационно-емкостных свойств породы и оценки ее начальной нефтенасыщенности (потенциальной емкости).

Оценка проявлений капиллярных сил и их влияния на процессы формирования начальной нефтенасыщенности. Нефтяные залежи, подстилаемые

водой, характеризуются наличием зоны постепенного перехода от нефти к воде («переходной зоны»). Установлено, что на положение ВНК и размер переходной зоны оказывают существенное влияние ряд факторов: гидравлический напор вод, капиллярные силы, тектонические движения, литологические особенности коллектора, условия формирования залежей, неоднородное строение продуктивных пластов, поверхностные явления, разность удельного веса и вязкости нефти и воды, эксплуатация залежей и др. [Бембель, 2008; Никонов и др., 1998; Шелепов и др., 2020]. Следовательно, правильная оценка проявлений капиллярных сил и их влияния на процессы формирования начальной нефтенасыщенности, а так же процессы вытеснения нефти позволяют оценить их проницаемостную анизотропию, установить закономерности, критерии определения размеров (мощности) переходной зоны, что даст возможность с максимальной точностью построить модель эксплуатационного объекта (пласта) и провести подсчет запасов углеводородов.

Характер распределения макропотоков в пределах залежи и определение направления потоков при ее разработке во многом зависит от литолого-петрографического состава коллектора и его текстурных особенностей, которые можно определить по результатам трассерных исследований [Бембель, 2008; Тюкавкина, 2020; Тюкавкина и др., 2020], а для оценки капиллярных сил (P_k — капиллярное (менисковое давление)) конкретного пласта воспользоваться статистическими методами, например обобщенной функцией: $P_k = f(S_v)$, где S_v — остаточная водонасыщенность. При таком подходе оценка емкостных свойств коллектора будет проведена для определенной зоны продуктивного пласта некоторой средней проницаемости, при этом зависимость $P_k = f(S_v)$ можно получить экспериментально различными методами или способами, в частности, применением ультрацентрифуги с высокой разрешающей способностью.

Методы и результаты исследований. Для построения геологической модели по ограниченному числу пробуренных скважин, предварительно были установлены качественные и количественные параметры изменения ФЕС коллектора, которые определялись как эмпирическими, так и лабораторными методами. Результаты исследований для новых скважин вносились в ПК Petrel и дополнили базу данных, представленную в предыдущих работах авторов [Тюкавкина, 2020; Тюкавкина и др., 2020; Шелепов и др., 2020]. Физико-химическая характеристика состава и свойств углеводородов пласта ЮС₂ исследована на новых 18 образцах поверхностных проб из 13 скважин.

Стандартные исследования керна проводились в соответствии с требованиями отраслевых регламентов — открытая пористость (K_p) определялась методом насыщения (в качестве насыщающей жидкости использовались вода и керосин); про-

нищаемость ($K_{пр}$) определялась фильтрацией газа; водонасыщенность определялась косвенным методом центрифугирования на определенном режиме, применяемом при изучении коллекторов Западной Сибири. Средние значения коллекторских свойств по пластам рассчитывались как средневзвешенные по эффективной толщине. Зона корректировки положения ВНК определялась эмпирическими методами путем построения и интерпретации кривых капиллярного давления, определения остаточной водонасыщенности и сравнения результатов с данными испытаний скважин.

Лабораторный анализ глубинных проб выполнялся на стандартной аппаратуре высокого давления типа ACM-300, PVT System RUSKA-2370 и PVT System Chandler 3000-G.

Методическое обеспечение работ соответствовало требованиям отраслевого стандарта ОСТ-39-112-80 «Нефть. Типовое исследование пластовой нефти» (в новой редакции [ОСТ 153-39, 2003] «Нефть. Типовое исследование пластовых флюидов и сепарированных нефтей»).

Обоснование и обсуждение численных значений средних параметров пластовых флюидов проведены в соответствии с «Методическими рекомендациями по проектированию разработки нефтяных и газонефтяных месторождений» [Методические..., 2007].

Наиболее сложной задачей при моделировании низко-проницаемого коллектора пласта ЮС₂ был процесс корректировки зоны ВНК для отложений мощностью 10–12 м, где она составляла в среднем 5–7 м и в некоторых залежах могла достигать 11 м. В этом случае по результатам значений удельного электрического сопротивления (УЭС) породы, амплитуды изменения амплитуды α ПС и значений нефтенасыщенности (K_n — коэффициент нефтенасыщенности, $K_{ов}$ — коэффициент остаточной водонасыщенности) были выделены три составляющих зоны ВНК: 1 — зона максимального нефтенасыщения ($K_n = 1 - K_{ов}$); 2 — зона пониженной нефтенасыщенности, в пределах которой нефтенасыщенность изменяется от $(1 - K_{ов})$ до нуля; 3 — зона полного водонасыщения.

Большую сложность также вызвал процесс моделирования второй зоны, которая является переходной от полного водонасыщения к максимальному нефтенасыщению следовательно, на основании характера нефтенасыщенности она, в свою очередь, так же делится на составляющие части: нижнюю зону с наличием свободной капиллярной воды, которая в процессе эксплуатации может отдаваться пластом и верхнюю часть с повышенным содержанием связанной воды, не отдающейся пластом при его эксплуатации.

Были построены кривые капиллярного давления, выражающие зависимость $P_k = f(S_v)$, которые позволили отметить некоторые особенности для коллекторов с проницаемостью меньше $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм² (рис. 1).

Породы месторождений центральной части Сургутского свода (Федоровская вершина) с проницаемостью менее $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм², где величина S_v изменялась в пределах 67–72 %, характеризуются отсутствием извлекаемой нефти и соответствуют непродуктивной части (рис. 1, з). Для аналогичных пород месторождений восточного склона Сургутского свода (рис. 1, а, б) величина неснижаемой водонасыщенности изменялась в пределах 37–58 %, что характеризует их как коллектор.

Пласты с остаточной водонасыщенностью 58–60 %, принимая во внимание остаточную нефтенасыщенность при заводнении, равную приблизительно 30 %, могут, хотя и незначительно, отдавать нефть (по результатам отнесены нами к вероятно продуктивным). Низкопроницаемые коллекторы с установленной неснижаемой водонасыщенностью 28 и 42 % с большой вероятностью будут продуктивными (рис. 1, в).

Анализируя полученные результаты изменения значений кривых капиллярного давления для пласта Ю₂ месторождений восточного склона Сургутского свода, следует обратить внимание на высокие значения P_k , при которых достигается и неснижаемая водонасыщенность, что соответствует зонам предельного насыщения для данной породы.

Исходя из равенства менискового давления в пласте $P_k = (H \cdot \Delta \gamma) / 0$ (где $\Delta \gamma$ — разность плотностей воды и нефти, H — высота над ВНК), зона переменной насыщенности над зеркалом воды ($P_k = 0$) в низко-проницаемых коллекторах может быть достаточно большой. Проведенные статистические и аналитические исследования показали, что при типичных градиентах давления в пластовых условиях водная фаза становится подвижной, когда водонасыщенность превысит неснижаемую в среднем на 12–14 %.

Следовательно, при $\Delta \gamma = 0,25$ и поверхностном натяжении на границе нефть — вода, равном 20 дин/см, водная фаза становится подвижной при P_k порядка 0,1 МПа, т. е. на высоте от зеркала воды примерно 11 м (рис. 1). Водонасыщенность порядка 50 % (обычно принимаемая за ВНК при подсчете запасов) и для исследуемых коллекторов будет наблюдаться на высоте от зеркала воды 3,7–4,5 м над ВНК, следовательно зона ВНК составит 6,5–7,3 м (рис. 1, а, б). Остаточная нефтенасыщенность для исследованного диапазона проницаемостей составила 0,26–0,29 (минимальные значения остаточной нефтенасыщенности соответствовали низко-проницаемым разностям менее $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм²).

Авторы пришли к выводу, что для детального изучения верхней части зоны ВНК с повышенным содержанием связанной воды можно получить более качественную модель при комплексировании полученных данных с результатами геолого-геофизических параметров пласта (табл. 1).

Итоговые результаты лабораторных и эмпирических исследований, сгруппированные в табл. 1, были

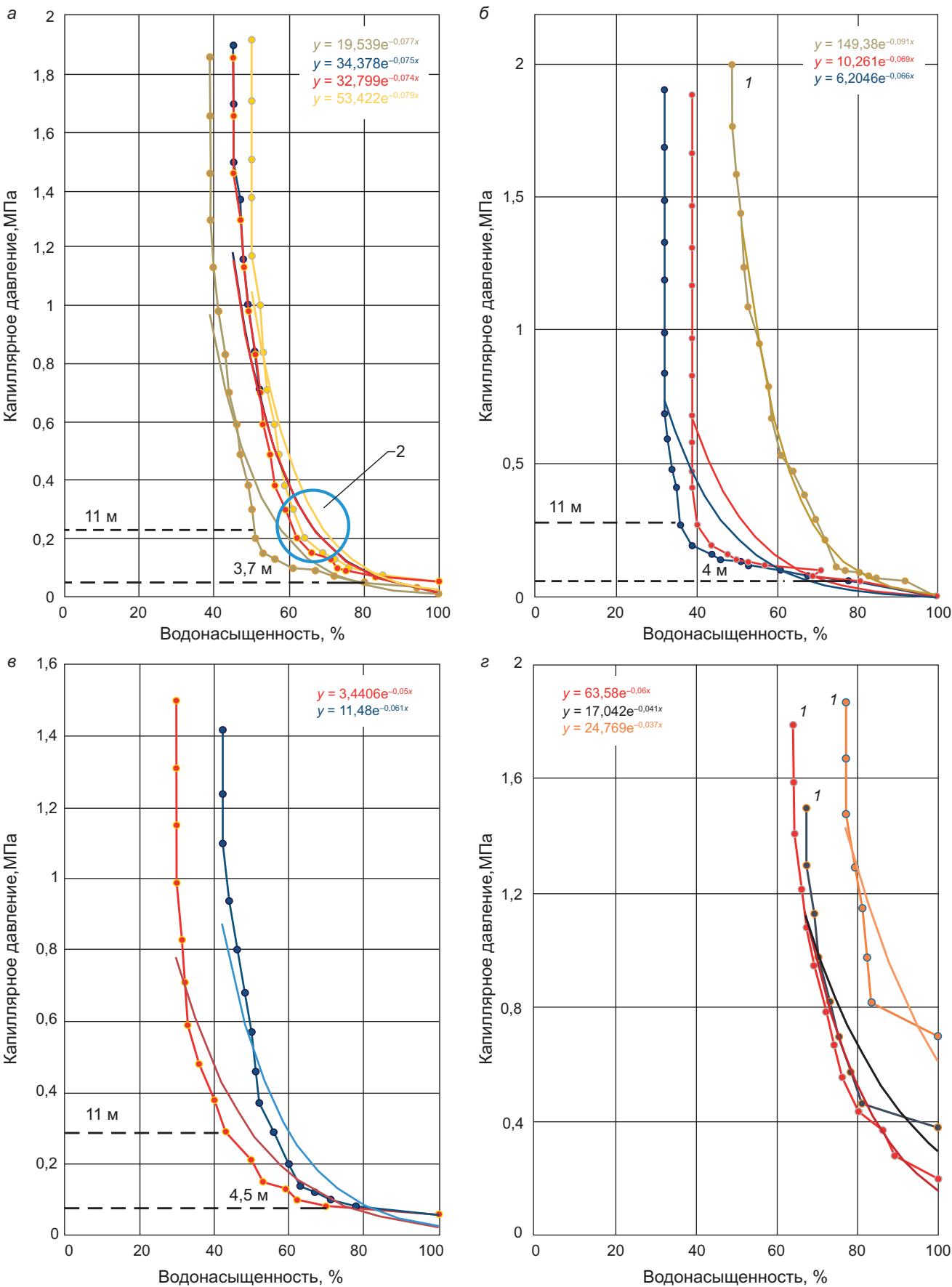


Рис. 1. Эталонные кривые остаточной водонасыщенности для низко-проницаемого коллектора (газопроницаемость менее $1,5 \cdot 10^{-3}$ мкм²) мощностью 10–12 м. Месторождения восточного склона (а, б) и центральной части (в, г) Сургутского свода (Широтное Приобье), пласт Ю₂. 1 — порода не является коллектором, 2 — порода может являться коллектором, 3,7–4–4,5 м — высота от зеркала воды, где водная фаза становится подвижной

Таблица 1

Геолого-геофизические параметры моделирования зоны ВНК (5 м).
Расчетный участок залежи Ю₂ месторождение Сургутского свода

Размеры ячеек залежи			Геолого-геофизические параметры зоны ВНК				
Кол-во ячеек по оси X	Кол-во ячеек по оси Y	Кол-во ячеек по оси Z	Глубина, м	Зона ВНК (OWC)*	αПС SP (Spontaneous Potential log)*	КС (Ом·м) (Focused Electrode Logs)*	К _н , % (Oil saturation)*
219	314	65	2920–2921	зона максимального нефтенасыщения	0,89	16	72
			2921–2921,5	зона максимального нефтенасыщения	0,72	8,6	54
			2921,5–2923	зона с повышенным содержанием связанной воды	0,87	7,5	54
			2923–2924	зона с наличием свободной капиллярной воды	0,87	4,5	32
			2924–2925	зона полного водонасыщения	0,89	3,2	12

Примечание: * — в скобках указаны параметры, которые дополнительно вносились в ПК Petrel либо были уточнены при исследованиях и откорректированы в соответствующих модулях ПК Petrel.

использованы при уточнении моделей искомого куба нефтенасыщенности сложнопостроенного коллектора горизонта Ю₂ (рис. 2).

Результаты и их обсуждение. По результатам проведенных исследований переходной зоны ВНК и оценки проявлений капиллярных сил, а так же оценки влияния процессов формирования начальной нефтенасыщенности были уточнены границы положения ВНК, которые для разных частей залежи изменялись в широких пределах от 3,7 до 11 м, что позволило определить зоны низко-проницаемого коллектора с максимальным насыщением углеводородами доступными к извлечению при существующих методах эксплуатации залежи пласта ЮС₂.

В процессе выполнения работы основными дискуссионными вопросами стали критерии оценки нефте- и водонасыщенности методами ГИС, в том числе корректность определения значений удельного электрического сопротивления (УЭС) горной породы (коллектора) после проведенных методов воздействия на пласт и увеличения их дебитов.

Данные вопросы обсуждались на кафедрах геологии и разведки месторождений углеводородов и геофизики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе и в Департаменте недропользования и нефтегазового дела РУДН. При обсуждении учитывались результаты только новых исследуемых 13 скважин.

В работах, проводимых с 2002–2007 г. Медведевым Н.Я., Новиковым Г.Р., Усмановым И.Ш., и др. [Медведев и др., 2002, 2004; Новиков и др., 2001], отмечалось, что «...в зависимости от изменения коллекторских свойств пласта Ю₂ дебиты скважин варьируют в широких пределах: от менее 1 до 35–50 т в сутки (скважины: 101 Быстринского, 1313 Западно-Сургутского месторождений). Однако, в некоторых случаях скважины с высокими дебитами не имеют видимой зависимости от коллекторских свойств

пласта, попадая в зоны с низкой проницаемостью (5–10 мД скв. 1406, 1330 Западно-Сургутского, 42, 34 Восточно-Сургутского, 208, 211 Русскинского и др. месторождений). Опираясь на эти результаты исследований, было принято решение продолжить начатую работу с учетом установления зон трещиноватого (разноплотностного) коллектора, что позволит закартировать (смоделировать) зоны с разной проницаемостью пород, и выделить перспективные направления для определения участков первоочередного разбуривания скважин, расположенных со смещением от основной сетки скважин.

Выводы. Таким образом, при моделировании сложнопостроенного коллектора необходимо использовать поэтапный подход и вводить несколько иерархических уровней (количество зависит от степени сложности строения и параметров объекта исследований), которые в дальнейшем необходимо делить на более мелкие с учетом предпочтительных параметров и их значений. Коллекторы в разрезах скважин можно выделить, используя как прямые (качественные), так и статистические (количественные) признаки.

По результатам выполненной работы подтверждено, что основные залежи низко-проницаемых коллекторов в исследуемом районе распределены неравномерно и в основном расположены на склонах крупных положительных структур. Поэтапный подход при сопоставлении результатов с учетом иерархических уровней: лабораторных исследований керна и эмпирической оценки положения зоны ВНК позволяет используя полученные прямые (качественные) и статистические (количественные) признаки уточнять как геометрию зоны с максимальной нефтенасыщенностью, так и границы залежи в целом, что является первоочередной задачей для установления объема продуктивной части коллектора при подсчете запасов нефти.



Рис. 2. Геологические модели пласта Ю₂ в пределах месторождения Сургутского свода: *a* — структурные модели (каркас), изменение параметра «литология»; *b* — изменение параметра «пористость»; *в* — изменение параметра «начальная нефтенасыщенность»

Основной сложностью при моделировании является участок зоны ВНК с наличием свободной капиллярной воды и связанной воды, которая не отдается пластом в процессе его эксплуатации.

Важными критериями оценки нефте- и водонасыщенности являются методы ГИС, в том числе корректность определения УЭС горной породы. В исследуемых интервалах юрских сложнопостроенных коллекторов выделенные критерии коллектора были сопоставлены с полученными данными литологического строения коллектора с учетом наличия дисперсной и слоистой глинистости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бембель С.Р. Моделирование сложнопостроенных залежей нефти и газа в связи с разведкой и разработкой месторождений Западной Сибири. Тюмень: ОГУП «Шадринский дом печати», 2008. 153 с.

Бембель С.Р., Бембель Р.М. О разведке многопластовых месторождений нефти и газа Западной Сибири // Нефть. хоз-во. 2012. № 5. С. 34–36.

Гогоненков Г.Н., Кашик А.С., Тимурзиев А.И. Горизонтальные сдвиги фундамента Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2007. № 3. С. 3–11.

Гурари Ф.Г., Девятков В.П., Демин В.И. и др. Геологическое строение и нефтегазоносность нижней-средней юры Западно-Сибирской провинции. Новосибирск: Наука, 2005. 156 с.

Дружинин В.С., Колмогорова В.В., Начапкин Н.И. и др. Карта доюрских вещественных комплексов северо-западной части Западно-Сибирской равнины на основе объемной модели земной коры // Отечественная геология. 2009. № 1. С. 104–112.

Ермаков В.Н., Скоробогатов В.А., Соловьев Н.Н. Геолого-геохимические и тектонические факторы прогноза газоносности севера Западной Сибири // Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений топливно-энергетического сырья: обзор. М.: Геоинформмарк, 1997. 134 с.

Жеро О.Г. Тектоника доюрского фундамента Западно-Сибирской плиты в связи с нефтегазоносностью палеозоя и триас-юрских отложений. Дисс. ... докт. геол.-минер. наук. Новосибирск, 1984. 492 с.

Закиров С.Н., Аникеев Д.П. Технологии скважин и алгоритмы интерпретации результатов // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. № 2 (21). С. 16.

Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Писецкий В.Б. и др. Новые данные о строении фундамента Западно-Сибирской плиты // Литосфера. 2012. № 4. С. 91.

Ивашко С.В. Анализ тектонических деформаций доюрской поверхности Западной Сибири с помощью компьютерного моделирования // Геология нефти и газа. 2004. № 6. С. 18.

Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К. и др. Геология нефти и газа Западной Сибири. М.: Недра, 1975. 680 с.

Медведев Н.Я., Кос И.М., Никонов В.Ф. и др. Юрские отложения западной части Среднего Приобья как объект для наращивания промышленных запасов нефти // Нефтяное хозяйство. 2002. № 8. С. 48–50.

Медведев Н.Я., Кос И.М., Никонов В.Ф. Геология и нефтеносность Большого Сургутского месторождения на Сургутском своде // Нефтяное хозяйство. 2004. № 2. С. 44–50.

Методические рекомендации по проектированию разработки нефтяных и газонефтяных месторождений

Важно отметить, что при переходе от этапа геометризации сложнопостроенного коллектора к 3D моделированию достаточно остро стоят вопросы определения параметров пористой среды исследуемого объекта (залежи), это отмечалось и другими исследователями: «...одним из важных параметров являются относительные фазовые проницаемости... однако может возникнуть ситуация получения множества... неактуальных определений открытой пористости и абсолютной проницаемости на кернах...» [Закиров и др., 2018].

(утверждены приказом МПР РФ от 21.03.2007 № 61). Электронный ресурс <https://docs.cntd.ru/document/902040320> (дата обращения: 12.11.2021)

Мухер А.Г., Мясникова Г.П., Тугарева А.В. и др. Строе-ние и перспективы нефтегазоносности ниже-среднеюрских отложений в связи с переоценкой потенциальных ресурсов на территории ХМАО // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО (Восьмая науч.-практ. конф.). Ханты-Мансийск, 2005. Т. 1. С. 164–176.

Никонов В.Ф., Санин В.П., Медведев Н.Я. и др. Геотектоническое районирование фундамента и чехла в свете современных данных и закономерности распространения залежей нефти и газа Сургутского свода и прилегающих территорий // Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Ханты-Мансийск, 1998. 150 с.

Новиков Г.Р., Усманов И.Ш. Геологические предпосылки развития ресурсно-сырьевой базы ОАО «Сургутнефтегаз». Вопросы геологии, бурения и разработки нефтяных и газонефтяных месторождений Сургутского региона // Сборник научных трудов СургутНИПИнефть. Вып. 3. Екатеринбург: Путеведь, 2001. 320 с.

ОСТ 153-39. 2-048-2003 «Нефть. Типовое исследование пластовых флюидов и сепарированных нефтей». Электронный ресурс <https://www.normacs.ru/Doclist/doc/V704.html> (дата обращения: 12.11.2021)

Соколов Б.А., Егоров В.А. Рифейские рифты-генераторы нефти // Природа. 1989. № 6. С. 73–78.

Сурков В.С., Жеро О.Г. Фундамент и развитие платформенного чехла Западно-Сибирской плиты. М.: Недра, 1981. 143 с.

Тюкавкина О.В. Контроль и регулирование процессов разработки, эксплуатации сложнопостроенных коллекторов с применением комплекса стандартных исследований фильтрационно-емкостных параметров // Технологии нефти и газа. Научно-технологический журнал. 2020. № 3(128). С. 37–42.

Тюкавкина О.В., Шустер В.Л. Анализ геофизических данных при разработке сложнопостроенных объектов юры месторождений Западной Сибири (методология и применение) // Технологии нефти и газа. Научно-технологический журнал. 2020. № 6 (131). С. 17–24.

Шелепов В.В., Тюкавкина О.В. Геофизические методы определения коллекторских свойств сложнопостроенных ниже-среднеюрских залежей в пределах месторождений Широкого Приобья // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2020. № 1. С. 37–41.

Статья поступила в редакцию 05.11.2024, одобрена после рецензирования 12.03.2024, принята к публикации 23.05.2025

УДК 622.276:553.98:550.8

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-72-79

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ ЗАКАЧКИ НЕФТЕКИСЛОТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОПОСТРОЕННЫХ ЗАЛЕЖЕЙ НЕФТИ ЧЕРЕПЕТСКОГО И КИЗЕЛОВСКОГО ГОРИЗОНТОВ ЮЖНО-ТАТАРСКОГО СВОДА

Вячеслав Вячеславович Мухаметшин¹, Любовь Сергеевна Кулешова²,
Руслан Альбертович Гилязетдинов³, Роберт Галимьянович Рамазанов⁴,
Алексей Николаевич Реймерс⁵, Фарит Азатович Шарипов⁶

¹ Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета, Октябрьский, Россия; vv@of.ugntu.ru

² Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета, Октябрьский, Россия; markl212@mail.ru

³ Институт нефти и газа Уфимского государственного нефтяного технического университета, Октябрьский, Россия; gilyazetdinov_2023@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ramazanovrg@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; areimers@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; farit.sharipov.2017@mail.ru

Аннотация. Исследование посвящено разработке комплексного подхода к вопросам определения результативности мероприятий по закачке нефтекислотных эмульсий в условиях значительной неоднородности продуктивных пластов. В качестве методологической базы использовались известные инструменты для статистической обработки данных, включая метод главных компонент и дискриминантный анализ. По результатам построения различных моделей установлено наличие обратной взаимосвязи между числом ступеней очистки пласта и параметром, отражающим величину удельного прироста дебита нефти на кубический метр используемого агента.

Ключевые слова: геолого-статистическое моделирование, обработка нефтекислотными эмульсиями, трехфакторная интегральная модель, разработка нефтяных месторождений, дифференциация и группирование залежей

Для цитирования: Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С., Гилязетдинов Р.А., Рамазанов Р.Г., Реймерс А.Н., Шарипов Ф.А. Комплексная оценка результативности закачки нефтекислотных эмульсий в условиях сложнопостроенных залежей нефти черепетского и кизеловского горизонтов Южно-Татарского свода // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 72–79.

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF INJECTION OF PETROLEUM ACID EMULSIONS IN THE CONDITIONS OF COMPLEX OIL DEPOSITS OF THE CHEREPETSKY AND KIZEL HORIZONS OF THE SOUTH TATAR ARCH

Vyacheslav V. Mukhametshin¹, Lyubov S. Kuleshova², Ruslan A. Gilyazetdinov³,
Robert G. Ramazanov⁴, Aleksey N. Reimers⁵, Farit A. Sharipov⁶

¹ Institute of Oil and Gas, Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky, Russia; vv@of.ugntu.ru

² Institute of Oil and Gas, Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky, Russia; markl212@mail.ru

³ Institute of Oil and Gas, Ufa State Petroleum Technological University, Oktyabrsky, Russia; gilyazetdinov_2023@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ramazanovrg@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; areimers@mail.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; farit.sharipov.2017@mail.ru

Abstract. The study is devoted to the development of an integrated approach to determining the effectiveness of oil-acid emulsion injection activities in conditions of significant heterogeneity of productive formations. As a methodological base, well-known tools for statistical data processing were used, including the principal component method and discriminant analysis. Based on the results of constructing various models, an inverse relationship was found between the number of formation cleaning stages and the parameter reflecting the specific increase in oil flow rate per cubic meter of the agent used.

Keywords: geological and statistical modeling, oil-acid emulsion treatment, three-factor integral model, oil field development, differentiation and grouping of deposits

For citation: Mukhametshin V.V., Kuleshova L.S., Gilyazetdinov R.A., Ramazanov R.G., Reimers A.N., Sharipov F.A. Comprehensive assessment of the effectiveness of injection of petroleum acid emulsions in the conditions of complex oil deposits of the Cherepetsky and Kizel horizons of the South Tatar arch. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 72–79. (In Russ.).

Введение. На текущем этапе эксплуатации месторождений нефтегазодобывающие предприятия повсеместно сталкиваются с проблемой снижения эффективности мероприятий, направленных на повышение производительности скважин [Моргачев и др., 2024]. По мере освоения остаточных запасов нефти изменяются и критерии оценки полноты достижения проектных показателей. С учетом существующей необходимости оперативного ввода в эксплуатацию запасов, сосредоточенных в сложных горно-геологических условиях, важным условием получения представительных результатов является реализация актуального научно-методического подхода к вопросу комплексного сопровождения процедур проектирования и проведения различных видов обработки призабойной зоны пласта (ПЗП).

Применение составов на основе кислотосодержащих систем, их производных, а также сложных комбинированных агентов можно отнести к одним из наиболее распространенных технологий обработки скважин в условиях карбонатных коллекторов. [Adewunmi, et al., 2022]. Значительное естественное и в той или иной мере техногенное усложнение геолого-технологических условий эксплуатации с момента вступления объектов в заключительную стадию разработки привело к необходимости тщательного подбора рецептуры состава и метода транспортировки агента в пласт, а также способа его размещения в поровом пространстве для снижения рисков закупоривания высокопроницаемых поровых каналов [Ganeeva, et al., 2020] и нарушения естественного равновесия в пластовых многофазных системах [Гарипова и др., 2024]. Несмотря на обширный накопленный опыт недропользователей в вопросах проведения кислотных обработок, как показывают исследования [Дерендяев, 2022; Чижов и др., 2020; Дмитриева и др., 2024], их успешность во многом не соответствует проектным показателям, предъявляемым к мероприятиям по обработке ПЗП, о чем свидетельствует тренд развития отрасли.

Опыт проведения закачек кислотных составов в различных геолого-технологических условиях демонстрирует, что обработки пористо-трещиноватых карбонатных коллекторов требуют детального выбора скважин-кандидатов и технологии воздействия в связи с риском снижения охвата порового объема воздействием из-за фильтрации кислотного состава по высокопроницаемым пропласткам [Силин и др., 2021].

Важно отметить, что приведенные выше особенности и текущие проблемы планирования и проведения кислотного воздействия по залежам карбонатных коллекторов значительно влияют на технико-экономические показатели разработки месторождений, исходя из чего в современных условиях вопрос оптимального выбора способа об-

работки пласта должен исходить не столько из потенциального прироста дебита нефти после закачки агента, сколько от стабильности и эффективности его работы в данных условиях. Одним из способов восстановления состояния призабойной зоны пласта добывающих и нагнетательных скважин, а также восстановления ее проницаемости является применение нефтекислотных эмульсий (НКЭ). В промышленной практике разработки месторождений Урало-Поволжья известно о том, что работы по закачке рассматриваемой двух- и более компонентной смеси характеризовались различными результатами [Gilyazetdinov, et al., 2024; Mukhametshin, et al., 2024]. Особенностью обработки призабойной зоны скважин с использованием нефтекислотных эмульсий является нелинейная динамика распада состава, что приводит к осаждению большего объема раствора вблизи нецелевых участков, их проникновению в «тупиковые» трещины и дальнейшему активному выносу на поверхность при освоении и выводе скважины на режим. В случае вторичного и третичного использования НКЭ величина удельного прироста дебита нефти изменяется в широких пределах, составляя в среднем от 0,03 до 1,2 т/сут на метр перфорированной толщины пласта. Вопрос релевантной оценки эффективности закачки нефтекислотных эмульсий в различных геолого-физических условиях разработки залежей карбонатных коллекторов является актуальным и требует применения передовых научно-методических подходов обработки геолого-промысловой информации [Kuleshova, et al., 2024].

В связи с этим целью данной работы является формирование алгоритмов для оценки эффективности применения нефтекислотных эмульсий в различных геолого-физических условиях. Для ее достижения выделены следующие задачи:

- провести первичную обработку имеющегося геолого-промыслового материала и сравнить динамику выхода скважин на режим в зависимости от количества обработок призабойной зоны пласта и технологии ее проведения;
- установить закономерности изменения различных показателей скважин и провести их группирование по двум наиболее релевантным критериям, характеризующим эффективность закачки нефтекислотных эмульсий;
- выявить оптимальные границы применения показателей результативности воздействия при помощи внедрения трехфакторной интегральной модели расчетов.

Материалы и методы. Объектом исследования выступают залежи карбонатных коллекторов Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна (НГБ), находящиеся длительное время в эксплуатации и приуроченные к отложениям верхнетурнейского

Таблица 1

Результаты анализа изменения ряда параметров, отражающих различные свойства пластов и насыщающих их флюидов по объектам верхнетурнейского подъяруса Южно-Татарского свода

Параметр (обозначение)	Интервал изменения	Вероятная ожидаемая величина при уровне значимости $p \leq 0,1$
1. Вязкость нефти (μ_n), мПа·с	8–109	17,3
2. Плотность нефти (ρ_n), кг/м ³	831–907	836,8
3. Газовый фактор (Г), м ³ /м ³	3,7–34,2	12,4
4. Объемный коэффициент нефти (β), ед.	1–1,29	1,093
5. Глубина залегания пласта ($H_{зал}$), м	929–1332	1104,6
6. Общая толщина пласта (H_p), м	0,45–78,3	20,4
7. Средняя толщина нефтенасыщенных пропластков (H_n), м	0,45–47,6	17,9
Пористость (m_1), доли ед.	0,05–0,247	0,165
Проницаемость (k), мкм ²	0,01–0,564	0,207
Нефтенасыщенность (K_n), доли ед.	0,265–0,88	0,477

подъяруса (ВП) черепетского и кизеловского горизонтов Южно-Татарского свода (ЮТС). Отложения ВП ЮТС представлены карбонатными породами, преимущественно известняками комковатыми и сгустково-детритовыми коллекторами с редкими вкраплениями доломитовых известняков [Гилязетдинов и др., 2023]. Проницаемость залежей варьируется от 0,01 до 0,564 мкм² при значении пористости от 0,05 до 0,247 доли ед. Общая толщина черепетского и кизеловского горизонтов в пределах Южно-Татарского свода достигает 55 м.

В свою очередь, отложения ВП классифицируются на 5 структурно-генетических типа известняков, различающихся между собой условиями осадконакопления, составом и размером породообразующих элементов: известняки комковатые и комковато-детритовые, известняки сгустковые и сгустково-детритовые, известняки шламово-детритовые, известняки обломочные, известняки зернистые. Каждый структурно-генетический тип имеет свой предел фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС). Наилучшими характеристиками при этом обладают известняки комковатые, средняя пористость составляет 0,15 доли ед., проницаемость — 0,057 мкм². Данный тип пород представлен комками микрозернистого кальцита, раковинами фораминифер с примесью крупного, водорослевого детрита. Наихудшими ФЕС характеризуются плотные обломочные и зернистые известняки (низкие коллекторские свойства обусловлены влиянием седиментационных и постседиментационных факторов) [Козина и др., 2005].

Данный объект характеризуется значительным количеством проведенных мероприятий по обработке призабойной зоны пласта (ОПЗ) (соотношение их количества к количеству скважин эксплуата-

ционного фонда 1,6:1) и низкой эффективностью реализованных геолого-технических мероприятий (соотношение среднего прироста дебита нефти после проведения мероприятия (т/сут) на количество скважин (шт (ед.)) 2,4:1) [Медведева и др., 2015]. В пределах выделенной тектоники-стратиграфической единицы (ЮТС) наблюдается нелинейное изменение геолого-физических параметров продуктивных пластов, на что указывают результаты статистической обработки данных (табл. 1).

Плотные структурно-генетические типы пород составляют большую часть продуктивных пластов, что осложняет процесс проведения объемных кислотных обработок и ванн с длительной выдержкой состава из-за высокой вероятности его утечек, нелинейного насыщения каналов фильтрации и уменьшения времени их растворения. Помимо этого, за счет особенностей геологического строения увеличение концентрации раствора кислотного состава оказывает различное влияние на время его нейтрализации и скорость движения [Сентемов, Дорфман, 2022]. При наличии промежуточных слоев, представленных частицами кальцита, как правило глубина проникновения состава в пласт возрастает на 11–17 %, а при воздействии на тонкогранулированные структуры происходит перенасыщение пористого объема.

Достаточно прочная плотная пленка, образуемая в результате нарушения термобарических условий в пласте, приводит к ранней нейтрализации состава и его налипанию в виде слоисто-неоднородной структуры на поверхность коллекторов. К тому же, анализ проведенных геофизических и гидродинамических исследований скважин, вскрывших отложения верхнетурнейского подъяруса Южно-Татарского свода, демонстрирует преобладание трещиноватости пород, что обусловлено существенными различиями в фильтрационно-емкостных показателях, определяемых в лабораторных и промысловых условиях, а также осложняет процессы компьютерного и имитационного моделирования различных видов воздействия на пласт [Kuleshova, 2024].

На рис. 1 отражена количественная диаграмма, построенная по данным группы месторождений ЮТС, эксплуатирующих отложения черепетского и кизеловского горизонтов, изменения величины стандартного отклонения для трех фильтрационно-емкостных характеристик продуктивных пластов объекта исследования. Величина стандартного отклонения по значению пористости составляет 49 %, проницаемости — 233 %, нефтенасыщенности — 51 %. Высокие значения отклонений, вероятно, связаны с отличиями проведения эксперимента в лабораторных условиях и в условиях продуктивного пласта, а также с ограниченным набором измеряемых показателей на промыслах.

Результаты. Отметим, что представленная тенденция не всегда отражается в явном виде при проведении геолого-статистического моделирования

для получения ряда зависимостей, характеризующих степень и уровень взаимосвязи между различными параметрами. Интерпретация результатов проведения различных ОПЗ кислотными составами и их производными по объекту исследования позволяет отметить следующее: градация эффективности первичных, вторичных и третичных обработок изменяется в широких пределах, что обусловлено высоким уровнем неоднородности геологического строения объектов в совокупности с техногенными причинами трансформации порового пространства [Мухаметшин, Кулешова, 2019]. Наиболее явно данный тренд прослеживается на скважинах, расположенных в центральной части верхнетурнейского подъяруса Южно-Татарского свода одного из крупных месторождений НГБ. Ниже представлены обобщенные статистические модели для описания динамики выхода скважин на режим после проведения классического кислотного воздействия:

– после первичной обработки (объем выборки — 24 скважин):

$$\sigma_{K_{\text{прод}}} / \sigma_{K'_{\text{прод}}} = 7,712 + 0,12 \ln t_1/t_2; \\ q_{\text{факт}} = q_{\text{прогноз}}/1,164 \quad (1)$$

– после вторичной обработки (объем выборки — 21 скважина):

$$\sigma_{K_{\text{прод}}} / \sigma_{K'_{\text{прод}}} = 2,412 + 0,07 \ln t_1/t_2; \\ q_{\text{факт}} = q_{\text{прогноз}}/3,43 \quad (2)$$

– после третичной обработки (объем выборки 19 скважин):

$$\sigma_{K_{\text{прод}}} / \sigma_{K'_{\text{прод}}} = 1,21 + 0,09 \ln t_1/t_2; \\ q_{\text{факт}} = q_{\text{прогноз}}/3,7 \quad (3)$$

где $\sigma_{K_{\text{прод}}}$ — стандартное отклонение коэффициента продуктивности скважин в момент времени t_1 , t_2 — время, которое прошло с момента пуска в эксплуатацию после воздействия и до момента выхода скважин на установившейся режим; $\sigma_{K'_{\text{прод}}}$ — стандартное отклонение коэффициента продуктивности скважин в момент времени t_1 , t_2 — время выхода скважин на максимальный оптимальный дебит; $q_{\text{факт}}$ — фактическое значение дебита нефти после воздействия; $q_{\text{прогноз}}$ — прогнозное значение дебита нефти после воздействия.

Как видно из зависимостей (1)–(3), свободный член уравнения изменяется пропорционально отклонению фактического дебита нефти от прогнозного значения, но в то же время коэффициент перед логарифмом времени для вторичного и третичного воздействия кислотными составами характеризуется отклонением от линейного тренда. Данная закономерность характерна и при реализации оценки эффективности обработок призабойной зоны пласта нефтекислотными эмульсиями по аналогичному алгоритму:

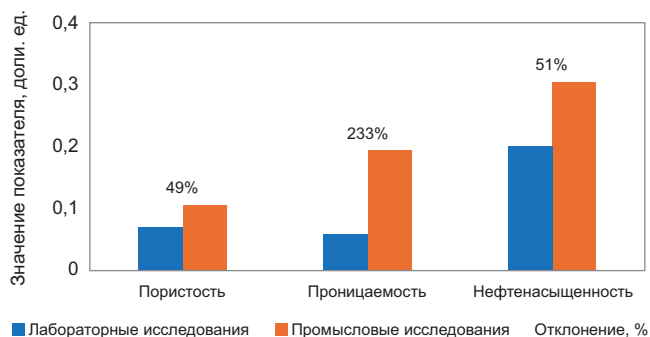


Рис. 1. Сравнение величины стандартных отклонений параметров, определяемых различными способами

– после первичной обработки (объем выборки — 51 скважина)

$$\sigma_{K_{\text{прод}}} / \sigma_{K'_{\text{прод}}} = 5,11 + 0,22 \ln t_1/t_2; \\ q_{\text{факт}} = q_{\text{прогноз}}/2,17 \quad (4)$$

– после вторичной обработки (объем выборки — 31 скважина)

$$\sigma_{K_{\text{прод}}} / \sigma_{K'_{\text{прод}}} = 1,99 + 0,11 \ln t_1/t_2; \\ q_{\text{факт}} = q_{\text{прогноз}}/3,97 \quad (5)$$

– после третичной обработки (объем выборки 25 скважин)

$$\sigma_{K_{\text{прод}}} / \sigma_{K'_{\text{прод}}} = 1,8 + 0,13 \ln t_1/t_2; \\ q_{\text{факт}} = q_{\text{прогноз}}/4,7 \quad (6)$$

Результативность прогнозирования при помощи моделей (5)–(6), описывающих динамику выхода скважин на режим после закачки НКЭ, в среднем на 21,4 % ниже по сравнению с зависимостями, которые получены для варианта классического воздействия, что обуславливает необходимость применения передовых методов структуризации и анализа информации.

Для проведения исследования были взяты данные эксплуатации более чем 600 скважин, вскрывших отложения ВП ЮТС и на которых была произведена ранее закачка НКЭ. На начальном этапе использован метод главных компонент для оценки вклада каждого из параметров в процент общей дисперсии параметров и релевантности анализируемых геолого-физических характеристик с использованием показателей, представленных в табл. 1. Уравнения в осях первых двух главных компонентах Z_1 и Z_2 (ГК) со стандартизированными коэффициентами имеют следующий вид:

$$Z_1 = 0,12 \mu_n - 0,14 \rho_n + 0,6 \Gamma - 0,11 \beta + 0,3 H_{\text{зал}} - \\ - 0,19 H_T - 0,1 H_{\text{п}} + 0,3 m_1 - 0,1 k - 0,32 K_n, \quad (7)$$

$$Z_2 = 0,65 \mu_n - 0,23 \rho_n - 0,1 \Gamma + 0,2 \beta - \\ - 0,47 H_{\text{зал}} + 0,05 H_T + 0,44 H_{\text{п}} - \\ - 0,23 m_1 + 0,19 k + 0,12 K_n. \quad (8)$$

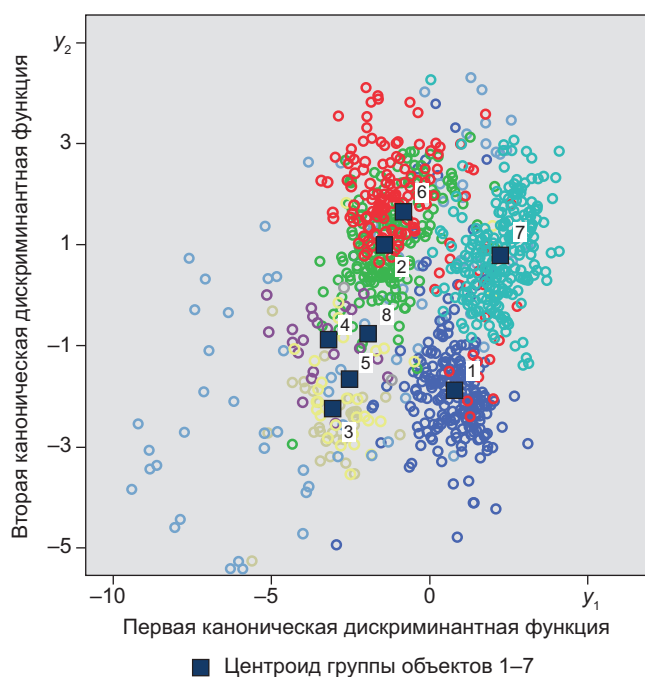


Рис. 2. Разделение объектов по качественному критерию оценки эффективности закачки нефтекислотных эмульсий в осях канонических дискриминантных функций (процент верно сгруппированных объектов равен 74,4 %)

Выбор данного способа обработки информации обусловлен его точностью при определении степени взаимосвязи между различными геолого-промысловыми показателями даже при условии ограниченного объема данных. Первая ГК характеризует в большей мере условия залегания залежей за счет преобладания по вкладу параметров $H_{зал}$ и $H_{т}$, вторая ГК — фильтрационно-емкостные свойства. Примечательно, что для двух ГК величина вклада физико-химических свойств нефти (первые четыре параметра моделей) практически идентична. Это указывает на наличие между ними тесной взаимосвязи. В целом, исходный объем информации является актуальным и не противоречит фундаментальным понятиям и особенностям разработки залежей карбонатных коллекторов как верхнетурнейского подъяруса Южно-Татарского свода, так и НГБ соответственно. Для получения актуальных результатов моделирования произведем разделение исходной выборки по наиболее устойчивому критерию, выделенному при помощи ретроспективного сравнения существующих моделей: отношения величины прироста дебита нефти после ОПЗ (q_i) и произведения объема закачанного состава (V) и проперфорированной толщины пласта (h).

Группирование результатов по комплексному показателю q_1/Vh , качественно отражающего величину эффективности мероприятий по закачке нефтекислотных эмульсий в пласт, реализуем с использованием дискриминантного анализа. В качестве исходных данных применяются те же параметры, по которым представлено распределение объектов в осях ГК. Исходя из территориальной карты на рис. 2 отметим, что наиболее тесно между собой связаны группы

объектов 3, 4, 5, 8 при среднем расстоянии между центроидами менее 0,14 доли ед. Группы 1 и 7 расположены друг от друга на расстоянии, превышающем суммарную среднюю величину между группами 3, 4, 5, 8 и 2, 6. Отметим, что для трех групп залежей (1, 2, 6) наблюдается незначительная миграция объектов в пределах тех или иных кластеров (менее 10 % от общего числа объектов). Несмотря на достаточно высокую плотность их распределения в осях канонических дискриминантных функций, снижение величины y_1 приводит к формированию зоны неопределенности (ЗН) — участка в осях КДФ, объекты которого не связаны между собой одним или несколькими центроидами. За счет этого снижается достоверность дискриминантного анализа и, следовательно, возникает высокий риск принятия нерелевантных управленческих решений. При определении границ применения качественного показателя оценки эффективности закачки нефтекислотных эмульсий руководствуемся теорией интегрального метода, суть которого заключается в расчете влияния каждого из представленных факторов на общую устойчивость модели.

Для проведения расчетов воспользуемся трехфакторной интегральной моделью следующего вида:

$$z = \frac{\alpha}{\beta} + \varepsilon = \begin{cases} z_{\alpha} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\beta + \Delta\varepsilon} \cdot \ln \frac{\beta_1 + c_1}{\beta_0 + c_0} \\ z_{\beta} = \frac{\Delta z - z_{\alpha}}{\Delta\beta + \Delta\varepsilon} \Delta\beta \\ z_{\varepsilon} = \frac{\Delta z - z_{\alpha}}{\Delta\beta + \Delta\varepsilon} \Delta\varepsilon \end{cases}, \quad (9)$$

где z_{α} — обобщенный параметр эффективности по фактической и прогнозной величине q_1/Vh ; z_{β} — обобщенный параметр эффективности по фактическим и прогнозным данным координат центроидов y_1 ; z_{ε} — обобщенный параметр эффективности по фактическим и прогнозным данным координат центроидов y_2 ; $\Delta\alpha$ — абсолютное изменение фактической и прогнозной величины q_1/Vh ; $\Delta\beta$ — абсолютное изменение фактических и прогнозных данных координат центроидов y_1 ; $\Delta\varepsilon$ — абсолютное изменение фактических и прогнозных данных координат центроидов y_2 ; Δz — абсолютное изменение совокупности трех параметров; β_0 — прогнозное и фактическое (β_1) значение координат центроидов y_1 ; c_0 — прогнозное и фактическое (c_1) значение координат центроидов y_2 .

Главным преимуществом данного подхода является возможность учета миграции объектов между центроидами групп, выделенных в ходе кластеризации скважин по различным критериям, которые отражают эффективность обработки призабойной зоны пласта нефтекислотными эмульсиями. На примере 1 группы объектов произведем расчеты z_{α} , z_{β} , z_{ε} с использованием отечественного программного обеспечения «StatSoft», включающего

в себя инструменты для анализа данных и решения различных задач, в том числе с использованием систем искусственного интеллекта. Фактическое значение координат центроидов y_1 и y_2 определяется исходя из данных дискриминантного анализа (ДА). Прогнозный вариант определяется по следующему алгоритму:

– при правильно идентифицированной принадлежности объекта к группе выполняется условие $\beta_0 = \beta_1, c_0 = c_1$;

– в случае регистрации отличия установленной принадлежности к группе используется значение центроида той группы, к которой были отнесены объекты при ДА.

В табл. 2 отражены результаты моделирования по оценке эффективности ОПЗ нефтекислотными эмульсиями с использованием качественного признака q_i/Vh .

Наличие трех выше представленных условий для определения принадлежности объектов к той или иной группе снижает вероятность возникновения ситуаций, при которых невозможно на надежном уровне произвести достоверную оценку исходной информации. Выделим, что для каждой из групп объектов прослеживаются закономерности изменения «доверительного» интервала, тесно связанные с динамикой варьирования параметра q_1/Vh во времени (рис. 3). Для удобства интерпретации результатов представим значения осей абсцисс и ординат в логарифмической стандартизированной шкале. Аппроксимация распределения точек произведена при помощи линейной модели исходя из упрощенного представления о тренде изменения прироста дебита нефти после воздействия.

Исходя из полученных результатов для группы объектов с первым рейтингом отметим, что четверть от среднего общего времени эксплуатации скважин изменение величины $\ln(q_1/Vh)$ соответствует линейной зависимости. Это указывает на достаточно высокую степень очистки гидродинамических каналов, расположенных непосредственно вблизи призабойной зоны пласта. Затем, после достижения времени $\ln t \geq 1,6$ наблюдается значительное отклонение от «эталонной модели» преимущественно вверх. Точки перегибов при $\ln t = 2$ и $\ln t = 2,397$ соответствуют двухступенчатому механизму очистки призабойной зоны пласта от остатков продуктов реакции. На это указывает также и дальнейшая стабилизация значений $\ln(q_1/Vh)$. Аналогичные расчеты были проведены и для оставшихся семи групп объектов, результаты которых представлены в табл. 3.

Максимальное количество ступеней выноса нейтрализованных компонентов из различных участков ПЗП зарегистрировано для группы под номером 5: четыре точки перегиба наблюдаются в период изменения $\ln t$ от 2 до 2,2178; отклонение параметра $\ln(q_1/Vh)$ при выходе скважин на режим от максимального значения, полученного в ходе интерпретации данных, составляет 37,4 %. Пред-

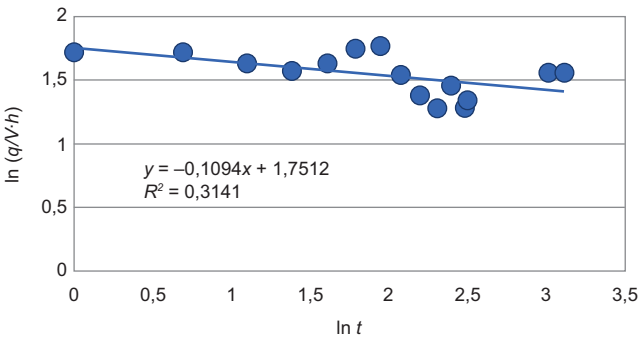


Рис. 3. Обобщенная динамика выхода скважины на режим после закачки нефтекислотных эмульсий по объектам 6 группы

Таблица 2

Интерпретация данных обработки геолого-промысловой информации (качественный признак)

Номер группы объектов	Условия для возможности присвоения рейтинга группы объектов	Рейтинг
6	$\begin{cases} 0,012 \leq z_{\alpha} \leq 0,019 \\ 0,154 \leq z_{\beta} \leq 0,214 \\ 0,277 \leq z_{\epsilon} \leq 0,516 \end{cases}$	1
2	$\begin{cases} 0,543 \leq z_{\alpha} \leq 0,563 \\ 0,017 \leq z_{\beta} \leq 0,1 \\ 0,35 \leq z_{\epsilon} \leq 0,6 \end{cases}$	2
7	$\begin{cases} 0,642 \leq z_{\alpha} \leq 0,651 \\ 0,126 \leq z_{\beta} \leq 0,129 \\ 0,443 \leq z_{\epsilon} \leq 0,501 \end{cases}$	3
1	$\begin{cases} 0,194 \leq z_{\alpha} \leq 0,211 \\ 0,017 \leq z_{\beta} \leq 0,204 \\ 0,178 \leq z_{\epsilon} \leq 0,255 \end{cases}$	4
3	$\begin{cases} 0,404 \leq z_{\alpha} \leq 0,411 \\ 0,206 \leq z_{\beta} \leq 0,297 \\ 0,144 \leq z_{\epsilon} \leq 0,156 \end{cases}$	5
4	$\begin{cases} 0,104 \leq z_{\alpha} \leq 0,236 \\ 0,505 \leq z_{\beta} \leq 0,604 \\ 0,099 \leq z_{\epsilon} \leq 0,12 \end{cases}$	6
5	$\begin{cases} 0,067 \leq z_{\alpha} \leq 0,07 \\ 0,111 \leq z_{\beta} \leq 0,213 \\ 0,447 \leq z_{\epsilon} \leq 0,532 \end{cases}$	7
8	$\begin{cases} 0,77 \leq z_{\alpha} \leq 0,893 \\ 0,321 \leq z_{\beta} \leq 0,345 \\ 0,124 \leq z_{\epsilon} \leq 0,221 \end{cases}$	8

Примечание: полужирным выделены ограничения, которые необходимо учитывать в первую очередь при проведении экспресс-оценки.

Таблица 3

Характеристика групп объектов с использованием эталонных линейных зависимостей (*N* — количество ступеней очистки призабойной зоны пласта)

Номер группы объектов	<i>N</i>	Модель для описания взаимосвязи и уровень ее устойчивости
6	2	$\ln(q/Vh) = -0,2094\ln(t) + 1,7512; R^2 = 0,3141$
2	2/3*	$\ln(q/Vh) = -0,094\ln(t) + 1,154; R^2 = 0,406$
7	2	$\ln(q/Vh) = -0,155\ln(t) + 1,407; R^2 = 0,378$
1	3	$\ln(q/Vh) = -0,155\ln(t) + 1,407; R^2 = 0,354$
3	3	$\ln(q/Vh) = -0,104 - \ln(t) + 0,956; R^2 = 0,301$
4	3	$\ln(q/Vh) = -0,117 - \ln(t) + 1,32; R^2 = 0,442$
5	4	$\ln(q/Vh) = -0,112 - \ln(t) + 1,09; R^2 = 0,463$
8	3	$\ln(q/Vh) = -0,125 - \ln(t) + 1,17; R^2 = 0,309$

Примечание: * — для достоверного определения количества ступеней очистки необходимо расширить объем выборки данных.

ставленные особенности могут быть обусловлены высокой степенью трещиноватости залежей ВП ЮТС и наличием техногенных высокопроницаемых участков, сформированных в результате неэффективного заводнения, о чем также свидетельствуют данные геофизических исследований. По группе 4 на протяжении полного цикла выхода скважин на режим установлены кратковременные периоды стабилизации качественного показателя $\ln(q_1/Vh)$ что указывает, вероятно, на оседание нейтрализованной нефтекислотной эмульсии в гидродинамических ка-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гарипова Л.И., Абусалимов Э.М., Соловьев В.А. и др. Анализ влияния геологических и технологических факторов на эффективность проведения селективных обработок карбонатных коллекторов // Нефтяное хозяйство. 2024. № 9. С. 122–126.

Гилязетдинов Р.А., Кулешова Л.С., Мухаметшин В.Ш. и др. Комплексный подход к прогнозированию результатов идентификации залежей в условиях различной тектонической приуроченности объектов // SOCAR Proceedings. 2023. № 4. С. 31–41.

Дерендяев Р.А. Результаты промышленного внедрения и перспективы применения технологии бесподходных кислотных обработок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 3. С. 184–195.

Дмитриева А.Ю., Батулин Н.И., Лутфуллин А.А. и др. Комплексный подход к прогнозированию отложений кольматантов в прискважинной зоне пласта // Нефтяное хозяйство. 2024. № 7. С. 26–31.

Козина Е.А., Морозов В.П., Королев Э.А., Пикалев С.Н. Основные типы карбонатных коллекторов нефти турнейского яруса Республики Татарстан // Нефтегазовое дело. 2005. № 3. С. 9–16.

Медведева Н.А., Уваров С.Г., Береговой А.Н. и др. Подбор оптимальной кислотной композиции для интенсификации притока в низкопроницаемых карбонатных коллекторах в НГДУ «Ленингорскнефть» // Нефтяное хозяйство. 2015. № 7. С. 39–43.

налах малой протяженности и ширины. В целом, по восьми группам объектов наблюдается достоверная обратная зависимость между результативностью закачки НКЭ и количеству ступеней очистки ПЗП, особенно для объектов 6 и 7.

Выводы. Таким образом, с учетом сведений о проведенной интегральной оценке эффективности обработок нефтекислотными эмульсиями сделаны следующие выводы:

- использование метода главных компонент в совокупности с дискриминантным анализом позволяет осуществлять предварительную оценку релевантности геолого-промысловой информации и, при необходимости, учитывать вклад каждого из параметров в процент общей дисперсии;
- внедрение интегральной трехфакторной модели в процедуру определения наиболее оптимальных критериев, отражающих эффективность закачки нефтекислотных эмульсий, положительно зарекомендовало себя в связи с возможностью оперативной оценки группы параметров на предмет скрытых закономерностей;
- результаты комплексного анализа динамики выхода скважин на режим по 8 группам позволили установить наличие обратной взаимосвязи между количеством этапов нейтрализации раствора в призабойной зоне пласта и результативностью проведенных операций по закачке нефтекислотных эмульсий в пласт;
- при значительной неоднородности геологического строения объектов закачка рассматриваемого состава позволяет увеличить глубину проникновения агента в пласт за счет образования высокодисперсной и маловязкой структуры.

Моргачев Д.Д., Арбатский Т.С., Быкова А.А. и др. Модификация фазовой проницаемости призабойной зоны скважин трещиноватого карбонатного коллектора // Нефтяное хозяйство. 2024. № 9. С. 112–116.

Мухаметшин В.В., Кулешова Л.С. Обоснование систем заводнения низкопродуктивных залежей нефти в условиях ограниченного объема информации // SOCAR Proceedings. 2019. № 2. С. 16–22.

Сентемов А.А., Дорфман М.Б. Перколяционный подход при гидродинамическом моделировании воздействия на призабойную зону скважины // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333, № 7. С. 157–165.

Силин М.А., Магадова Л.А., Давлетишина Л.Ф. и др. Особенности свойств сульфаминовой кислоты, повышающие эффективность кислотных обработок // Нефтяное хозяйство. 2021. № 1. С. 44–47.

Чижов А.П., Рабаев Р.У., Андреев В.Е. и др. Теоретические особенности повышения эффективности нефтеизвлечения из карбонатных коллекторов Волго-Уральской провинции // Научные труды НИПИ Нефтегаз ГНКАР. 2020. № 4. С. 9–14.

Adewunmi A.A., Solling T., Sultan A.S., et al. Emulsified acid systems for oil well stimulation: A review // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2022. № 208. P. 109569.

Ganeeva Y.M., Yusupova T.N., Barskaya E.E., et al. The composition of acid/oil interface in acid oil emulsions // *Petroleum Science*. 2020. № 17. P. 1345–1355.

Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V. An experimental approach to estimating the current oil recovery coefficient using a complex of stochastic and numerical computer modeling methods // *SOCAR Proceedings*. 2024. Special Issue № 1. P. 47–52.

Kuleshova L.S. On the need to apply a differentiated approach to the creation of a scientific and methodological base

for the use of artificial intelligence in solving development tasks // *SOCAR Proceedings*. 2024. № 3. P. 39–46.

Kuleshova L.S., Mukhametshin V.V., Gilyazetdinov R.A. The role and significance of the tectonic-stratigraphic factor in the formation of the structural features of hydrocarbon deposits of the Volga-Ural oil and gas province // *Socar Proceedings*. 2024. № 1. P. 10–17.

Mukhametshin V.V., Gilyazetdinov R.A., Kuleshova L.S., et al. On the depth of identification of objects in the study of the influence of the density of the grid of wells on the degree of production of oil reserves // *SOCAR Proceedings*. 2024. Special Issue № 1. P. 26–31.

Статья поступила в редакцию 03.03.2024,
одобрена после рецензирования 12.03.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.8

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-80-86

СТАДИЙНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ЗАЛЕЖИ БОТУОБИНСКОГО ГОРИЗОНТА СРЕДНЕБОТУОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Евгений Сергеевич Исаев¹, Роман Сергеевич Сауткин²,
Михаил Евгеньевич Воронин³, Артем Александрович Верещагин⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; e.isaev@oilmsu.ru, <https://istina.msu.ru/workers/354726101>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; r.sautkin@oilmsu.ru, <https://istina.msu.ru/workers/1070293>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.voronin@oilmsu.ru, <https://istina.msu.ru/workers/331411243>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; veresh087@gmail.com

Аннотация. Среднеботуобинское месторождение нефти уже давно ставит перед исследователями целый ряд вопросов, прежде всего о стадийности и условиях формирования залежей одного из ключевых горизонтов вендского периода Восточной Сибири — ботуобинского, так как он занимает обширную территорию в пределах Непско-Ботуобинской антеклизы и характеризуется высокой продуктивностью. Ботуобинский горизонт имеет стратегическое значение для нефтегазовой промышленности Российской Федерации, поскольку разработка месторождений, сосредоточенных в его пределах, позволяет обеспечить сырьем восточные области нашей страны и повысить ее экспортный потенциал в Азиатско-Тихоокеанском регионе. В статье рассматривается стадийность формирования залежей ботуобинского горизонта, а также методический подход, основанный на методе палеоструктурных построений и анализе динамики структурных изменений.

Ключевые слова: Сибирская платформа, Непско-Ботуобинская антеклиза, палеоструктурные построения, Среднеботуобинское месторождение, ботуобинский горизонт

Для цитирования: Исаев Е.С., Сауткин Р.С., Воронин М.Е., Верещагин А.А. Стадийность формирования залежи ботуобинского горизонта Среднеботуобинского месторождения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 80–86.

THE STAGE OF FORMATION OF THE DEPOSITS OF THE BOTUOBINSKY HORIZON OF THE SREDNEBOTUOBINSKY FIELD

Evgeniy S. Isaev¹, Roman S. Sautkin², Mikhail E. Voronin³, Artem A. Vereshchagin⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; e.isaev@oilmsu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; r.sautkin@oilmsu.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.voronin@oilmsu.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; veresh087@gmail.com

Abstract. The Srednebotuobinskoye oil field has long posed a number of questions to researchers, primarily questions about the stages and conditions of formation of deposits of one of the main horizons of the Vendian period in Eastern Siberia — Botuobinsky, since it occupies a vast territory within the Nepsko-Botuobinskaya antecline, is characterized by high productivity. Botuobinsky horizon is of strategic importance for the oil and gas industry of the Russian Federation, since the development of fields concentrated within its limits allows us to provide raw materials to the eastern regions of our country and increase its export potential in the Asia-Pacific region. The article considers the stages of formation of deposits of the Botuobinsky horizon, as well as a methodological approach based on the method of paleostructural constructions and analysis of the dynamics of structural changes.

Keywords: Siberian platform, Nepsko-Botuobinskaya antecline, paleostructural structures, Srednebotuobinskoye deposit, Botuobinsky horizon

For citation: Isaev E.S., Sautkin R.S., Voronin M.E., Vereshchagin A.A. The stage of formation of the deposits of the botuobinsky horizon of the srednebotuobinsky field. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 80–86. (In Russ.).

Введение. Среднеботуобинское месторождение — это природное скопление нефти, газа и газового конденсата, расположенное на территории Республики Саха (Якутия) в 112 км на юго-запад от города Мирный. Месторождение было открыто в 1970 г. при бурении параметрической скважины

Сбт-1 [Конторович, 2009], которая дала промышленные притоки газа из отложений венда (V) и кембрия (Є). В геологическом строении Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) принимают участие метаморфические образования архей-протерозойского возраста, осадочные породы

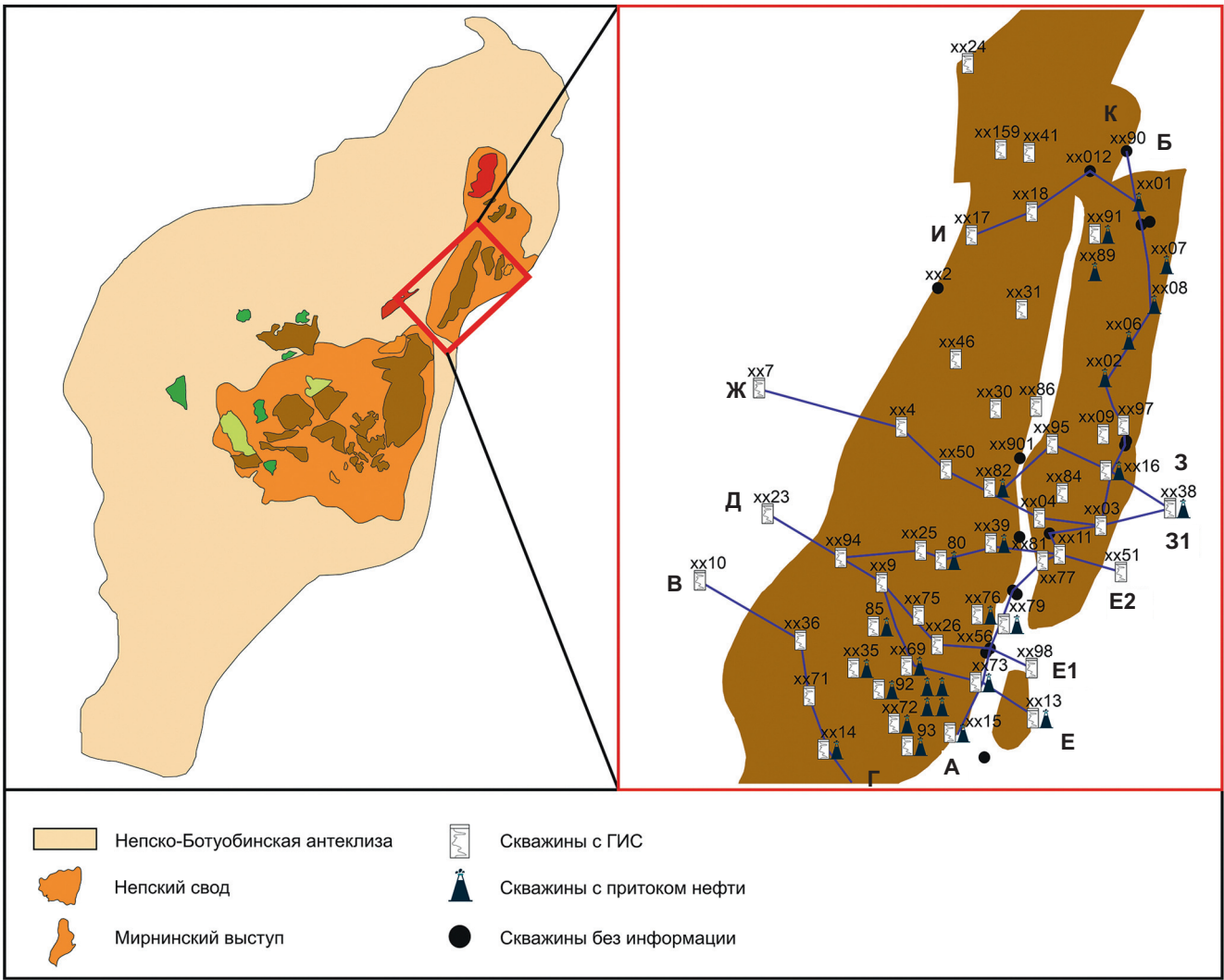


Рис. 1. Принципиальная схема Среднеботубовинского месторождения, положения скважин и линий профилей

протерозойского, палеозойского и мезозойского возрастов, а также интрузивные образования пермско-триасовой формации, представленные пластовыми и полого-секущими телами траппов [Мишин, Мурзов, 2010]. В тектоническом плане месторождение находится в центральной части Мирнинского выступа Непско-Ботубовинской антеклизы и приурочено к одноименной кулисообразной антиклинальной структуре III-го порядка. Важной чертой Среднеботубовинского НГКМ является наличие блоковой тектоники. Выявленные разрывные нарушения обладают северо-восточным простиранием и делят месторождение на крупные тектонические блоки, которые, в свою очередь осложнены более мелкими разломами [Исаев и др., 2024]. При разработке месторождения наблюдается недонасыщенность коллекторов в южной части восточного крыла. При опробовании наблюдается приток пластовой воды с пленкой углеводородов. Данные неоднородности вызывают необходимость изучения стадийности формирования месторождения и реконструкции его палеоструктурного положения на время прихода углеводородов (рис. 1).

Методика исследования. Палеоструктурные реконструкции — это метод восстановления структурно-тектонической истории региона, который заключается в построении 3D палеоструктурных карт и/или 2D палеопрофилей для выбранных интервалов геологического времени с целью восстановления изменения структурного плана во времени, подготовки территории для начала геолого-разведывательных работ и прогноза нефтегазоносности исследуемого района [Быстрова, Смирнова, 2019].

Палеоструктурные построения позволяют моделировать структурное положение пластов во время прихода углеводородов, тем самым возможен прогноз зон нефтегазоаккумуляции в пределах объекта исследования: зоны наилучших притоков по скважинным данным соответствуют зоне наложения современных и древних антиклиналей, не подвергшихся существенному изменению структурного плана.

Методика включает два этапа: 1) построение палеоструктурного плана залежи (2D палеорекострукции) на основные, уверенно прослеживающиеся по сейсмическим данным реперные горизонты

	Well	X	Y	J1 uk	Cm2 br	Cm2 mt		Cm1 nb		Cm1 bl1		V bk1	V krs
1	C6т 23	Координаты		0	14	73	Другие гор-ты	1077	Другие гор-ты	1515	Другие гор-ты	1903	1912
2	C6т 94			0	20	123		1112		1555		1932	1946
3	C6т 9			0	17	103		1083		1513		1909	1934
4	C6т 69			0	16	107		1157		1498		1890	1919
5	C6т 73			0	41	128		1143		1488		1894	1913
6	C6т 13			0	43	184		1175		1517		1926	1941
45	C6т 77			0	24	201		1175		1508		1904	1935

Рис. 2. Стратиграфические разбивки для загрузки в ПО, по [Конторович и др., 2007]

(в нашем случае — отложения среднекембрийского возраста) и 2) сопоставление современного и палеоструктурного планов для дальнейшего поиска скоплений УВ.

Преимуществом метода построения палеопрофилей является наглядность и простота в отображении палеотектонической истории изучаемых структур. Крайне важно правильно выбрать направление профиля, максимально отражающее геологическое строение объекта исследования.

Все палеореконструкции были построены в автоматизированном режиме с помощью модуля «Построение палеопрофилей и схемы вертикальных движений», разработанного в МГУ имени М.В. Ломоносова и встроенного в ПК «РН — ГЕОСИМ». Общий алгоритм работы следующий:

1. Сбор и систематизация всех доступных и необходимых данных для построения палеопрофилей (координаты местонахождения скважины и ее номер, стратиграфические отбивки горизонтов и данные о литологии). На данном этапе была собрана необходимая информация (координаты и стратиграфические отбивки горизонтов) более чем по 45-ти скважинам и загружена в программу Excel (рис. 2).

2. Построение палеопрофилей. На этом этапе был задан временной интервал для построения палеопрофилей (какие именно горизонты интересуют пользователя), далее программа построила серию палеопрофилей, отражающих эволюцию разреза во времени, которые при необходимости корректируются пользователем (рис. 3).

Результаты исследования. В процессе работы построено 8 2D палеопрофилей: 1 субмеридианальный (линия А-Б) и 7 субширотных (В-Г, Д-Е, Д-Е1, Д-Е2, Ж-З, Ж-31).

Субмеридианальный профиль А-Б (рис. 4), пересекающий Среднеботуобинское месторождение с юга на северо-восток, проходит через скважины № XX15, XX73, XX53, XX79, XX78, XX81, XX11, XX83, XX03, XX16, XX97, XX2, XX06, XX08, XX01, XX90. В современном структурном плане профиль характеризуется преимущественно пологой моноклиалью, за исключением участка между скважинами XX78 и XX11, где наблюдается депрессионная зона. Палеоструктурный план среднего кембрия демонстрирует более сложное строение с чередованием синклиналей и антиклиналей.

Субширотные профили позволили детализировать строение месторождения. Первый профиль,

В-Г (рис. 5, а) проходит через скважины № XX10, XX36, XX71, XX14, XX29. В отличие от современной моноклиальной структуры, в среднем кембрии наблюдалась положительная структура в районе скважины № XX14.

Профили Д-Е и Д-Е1 (рис. 5, б, в) прослеживают изменения структурного плана в юго-восточном направлении. В современном рельефе они практически идентичны; в среднекембрийское время фиксируются различия в развитии положительной структуры, берущей начало в районе скважины № XX9, однако по профилю Д-Е1 после скважины № XX53 положительная структура начинает идти на спад, в то время как по профилю Д-Е в районе скважин № XX73 и № XX13 антиклинальная складка продолжает набирать свою амплитуду.

Среднекембрийские отложения четвертого профиля субширотной ориентировки Д-Е2 (рис. 5, г) имеют моноклиальное залегание с пологим поднятием на восток, в то время как современный структурный план характеризуется более складчатым строением — чередованием синклинальных и антиклинальных структур.

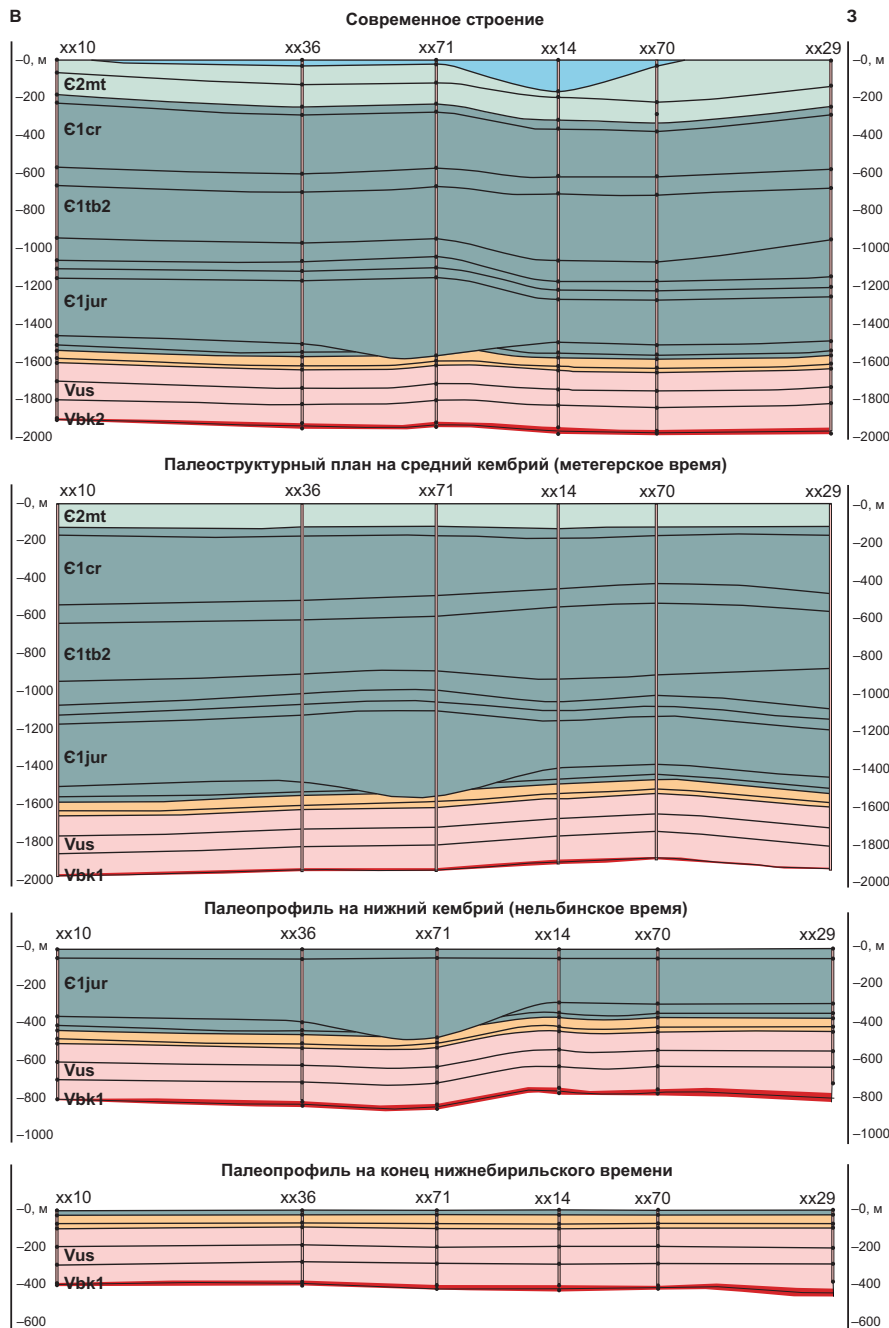
Пятый и шестой субширотные профили Ж-3 и Ж-31 (рис. 5, д, е) проходят с запада на юго-восток через скважины № XX7, XX4, XX50, XX82, XX95, XX16, XX50, XX04, XX03, XX38.

Современный и палеоструктурный планы профиля Ж-3 практически идентичны друг другу (за исключением района скв. № 4) и представляет собой закономерное чередование погружений и поднятий разной мощности. Современный структурный план профиля Ж-31 представляет собой маломощное длинное пологое поднятие, в то время как в среднем кембрии прослеживается положительная ступенеобразная структура.

Седьмой профиль И-К, проходит через скважины № XX17, XX18, XX012, XX001 с юго-запада на северо-восток (рис. 6). Среднекембрийский палеоплан данного профиля представляет собой полого поднимающуюся структуру. На современном плане проглядывается та же самая палеоструктура, претерпевшая инверсию во всех направлениях.

Построение палеопрофилей позволило реконструировать геологическую историю района и выявить зоны, благоприятные для формирования углеводородных залежей, а также зоны, перспективные для дальнейшего эксплуатационного бурения в исследуемом районе. На основе анализа

Рис. 3. Результаты построения палеопрофилей в модуле «Построение палеопрофилей и схемы вертикальных движений»



палеоструктурных планов была составлена принципиальная схема расположения предполагаемых палеозалежей (рис. 7).

Схема наглядно демонстрирует наличие ряда локальных поднятий, которые уже к началу среднекембрийского времени могли служить ловушками для углеводородов. Эти поднятия представляли собой зоны потенциального скопления углеводородов, мигрировавших из более глубоких горизонтов или из совершенно иных тектонических структур. Результаты проведенного 1D моделирования (рис. 8) в Предпатомском прогибе позволили сделать предположения, что рифейские нефтегазоматеринские толщи вошли в главную зону нефтеобразования (ГЗН) в позднем рифее. Пик нефтеобразования и наиболее благоприятные условия для генерации углеводородов приходится на раннеевендское

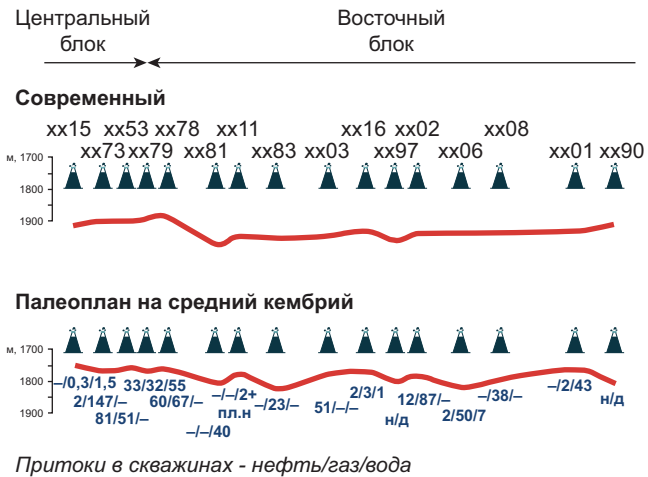


Рис. 4. Современный и палеоструктурный планы по линии А-Б (см. рис. 1)

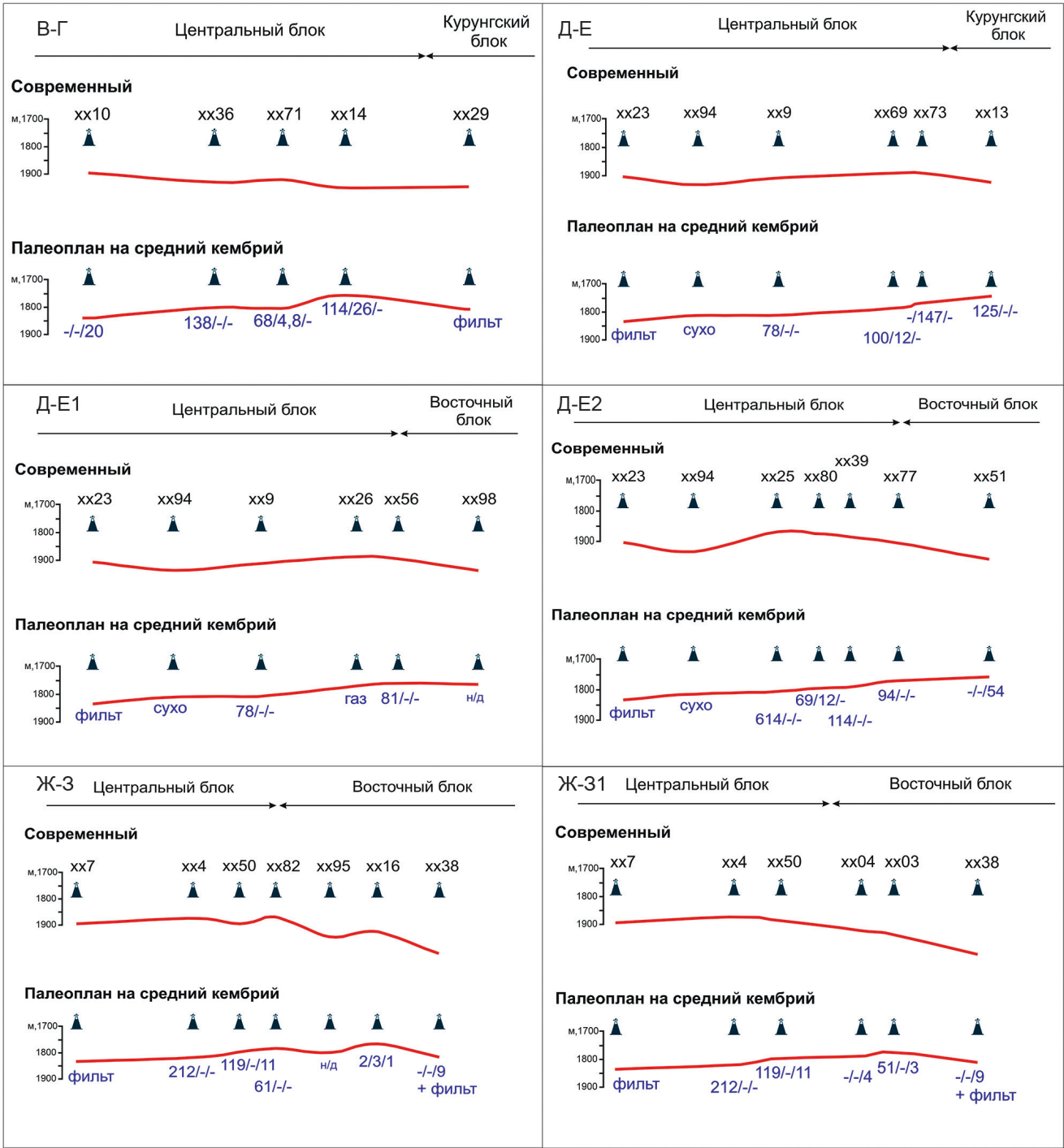


Рис. 5. Современные и палеоструктурные профили по линиям В-Г, Д-Е, Д-Е1, Д-Е2, Ж-3, Ж-31 (см. рис. 1). Под скважинами указана информация о притоках: нефть/газ/вода

время, а к поздневендскому времени благодаря значительному погружению и прогреву рифейских толщ, полностью выработали свой генерационный потенциал. Вендские НГМТ вступили в ГЗН в позднем кембрии — ордовике и продолжали погружаться вплоть до девонского периода, где в условиях максимального погружения достигли главной зоны конденсатообразования (ГЗК) и начальной стадии главной зоны газообразования (ГЗГ) (МК₄₋₅), затем вновь поднялись из-за активации тектонических движений и перестали генерировать УВ. Окончательное погружение и вхождение в ГЗГ (МК₅–АК₁)

произошло в мезозойское время и прекратилось в кайнозойское время при альпийском этапе тектоногенеза.

В пределах Непско-Ботубинской антеклизы (Мирнинский выступ) вендские НГМТ вошли в ГЗН в мезозойское время, но не оказали существенного влияния на формирование месторождений.

Идентификация подобных палеозалежей имеет важное значение для прогнозирования нефтегазоносности, поскольку позволяет оценить потенциал формирования и сохранности древних углеводородных скоплений, которые непосредственно



Рис. 6. Современный и палеоструктурный профили по линии И-К (см. рис. 1)

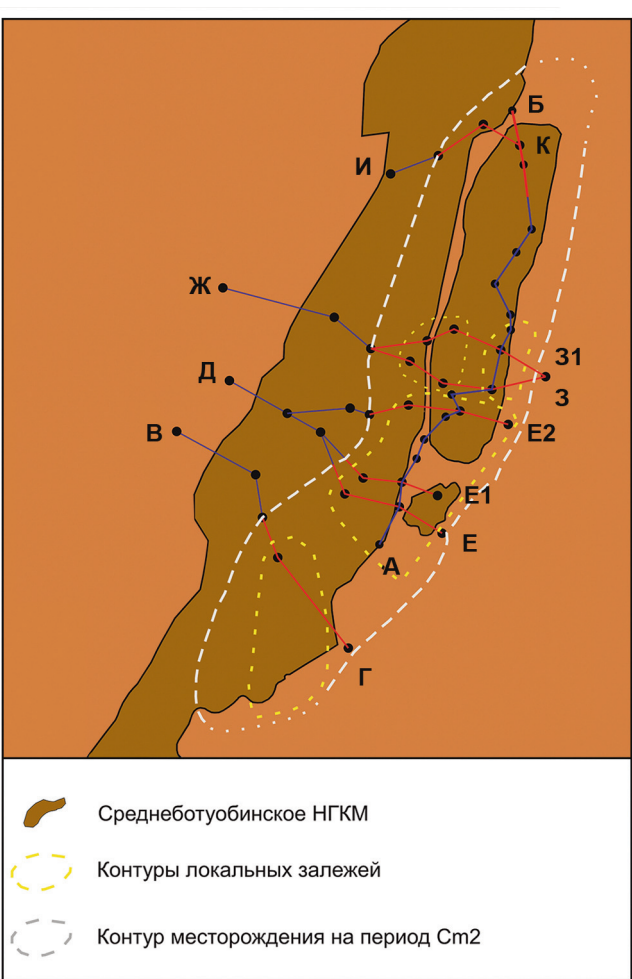


Рис. 7. Принципиальная схема расположения палеозалежей на территории Среднеботуобинского НГКМ

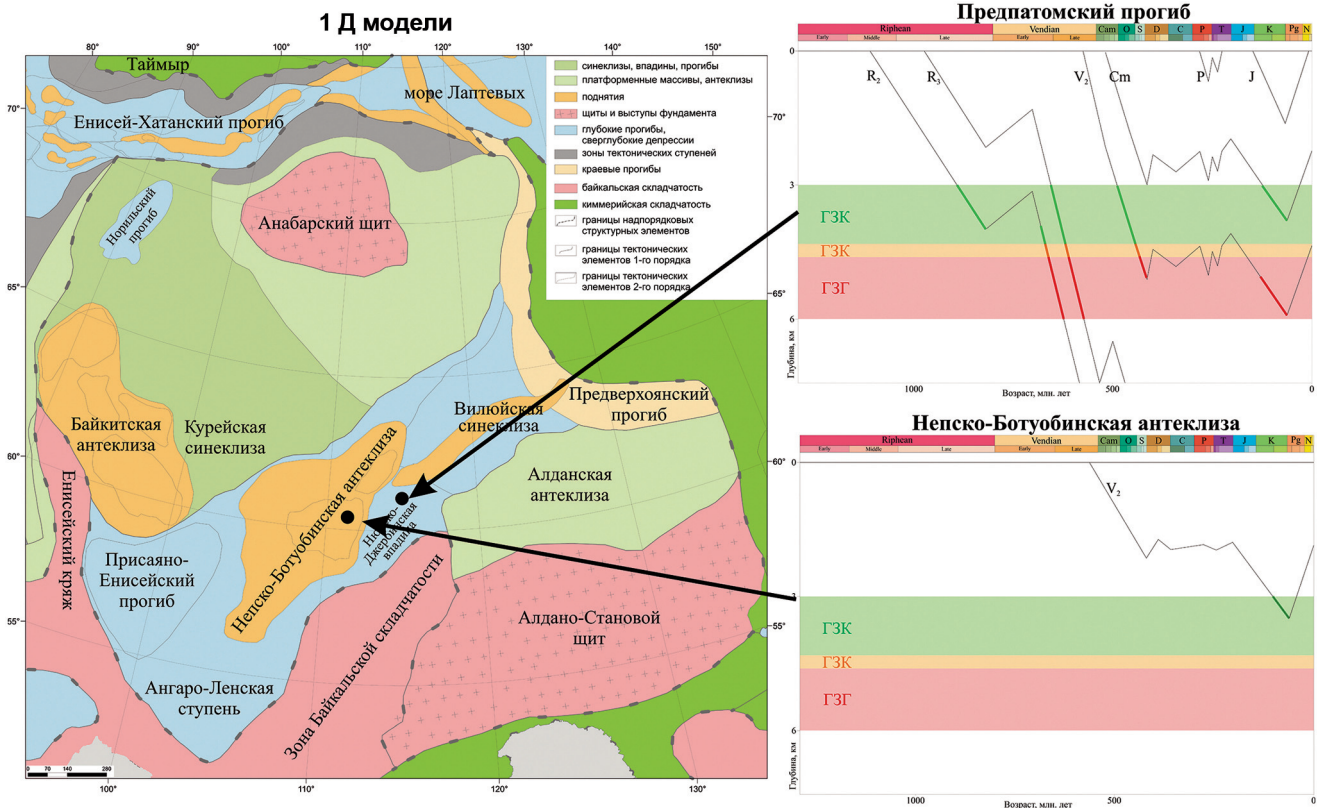


Рис. 8. Результат 1Д бассейнового моделирования в основных тектонических элементах юга Сибирской платформы [Сауткин и др., 2024]

могут указывать на наличие погребенных и/или неструктурных ловушек. Также на приведенных выше рисунках и схемах отчетливо видно несовпадение древних и современных структурных планов. Это так называемый «феномен» смещения залежей, который можно объяснить фактором многофазности тектонических движений — Непско-Ботуобинская антеклиза испытывала несколько фаз поднятий и опусканий, что приводило к формированию разломов разных направлений и переформированию уже существующих залежей, что отвечает типам структурных ловушек и признакам их наличия [Ступакова и др., 2023].

Выводы. Анализ палеопрофилей, построенных по месторождению, демонстрирует существенные изменения структурного плана от среднекембрийского до настоящего времени:

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Быстрова И.В., Смирнова Т.С. Роль палеоструктурных реконструкций в нефтегазовой отрасли // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского // География. Геология. Т. 5 (71), № 2. 2019. С. 255–271.

Исаев Е.С., Сауткин Р.С., Воронин М.Е. и др. Модель формирования вендской залежи Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения (Восточная Сибирь) // Ломоносовские чтения. Геология. М., 2024. С. 24–28.

Сауткин Р.С., Ступакова А.В., Сулова А.А. и др. Процессы переформирования месторождений углеводородов, влияющие на прогноз нефтегазоносности сибирской платформы // Ломоносовские чтения. Геология. М., 2024. С. 52–56.

Ступакова А.В., Поляков А.А., Малышев Н.А. и др. Критерии нефтегазоносности осадочного бассейна // Георесурсы. 2023. Т. 25, № 2. С. 5–21.

1. Месторождение претерпело значительные тектонические преобразования относительно среднекембрийского времени, о чем свидетельствует разница в строении современных и палеоструктурных планов;

2. Наиболее перспективные участки соответствуют зонам антиклинальных поднятий палео- и современного структурных планов.

Полученные данные указывают на необходимость комплексного анализа тектонической и геологической истории месторождения для прогнозирования ловушек углеводородов и оценки перспектив развития нефтегазоносности. Особое внимание следует уделить зонам с наиболее интенсивными тектоническими деформациями, где могли сформироваться благоприятные условия для скопления углеводородов и остаться «запечатанные» залежи.

ФОНДОВАЯ

Конторович А.А. Подсчет запасов нефти, газа и конденсата Среднеботуобинского нефтегазоконденсатного месторождения в пределах центрального блока и Курунгского лицензионного участка. Красноярск, 2009.

Конторович А.Э., Конторович А.А., Хабаров Е.М. Отчет по договору № 405-20 на тему: «Создание трехмерных геологической и геодинамической моделей Среднеботуобинского месторождения и анализ достигаемых КИН». Красноярск, 2007.

Мишин О.Ф., Мурзов А.И. Отчет на тему: «Геологическое строение верхней части разреза центрального блока Среднеботуобинского месторождения, прогноз поведения и свойств трапповых тел и надтрапповых отложений. Выявление объектов, перспективных для обнаружения подземных вод для целей ППД, технологических процессов подготовки нефти, утилизации сточных вод и буровых растворов». Красноярск, 2010.

Статья поступила в редакцию 18.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 624.131.43

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-87-93

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И СВОЙСТВ АНДЕЗИБАЗАЛЬТОВ В УСЛОВИЯХ МОДЕЛИРУЕМОГО СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Илья Евгеньевич Большаков¹, Мария Александровна Никулина²,
Андрей Юрьевич Бычков³, Андрей Борисович Ермолинский⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; bolshakov.ilya.210@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mariya.nikulina.2002@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; andrewbychkov@rambler.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; andrermolinskiy@mail.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное сернокислотное выщелачивание образцов четвертичных андезибазальтов в условиях закрытой системы под воздействием раствора серной кислоты. Произведена качественная и количественная оценка влияния сернокислотного выщелачивания на состав и свойства андезибазальтов на первых этапах опализации. Выявлен механизм образования трещин в андезибазальте за счет неравномерного расширения вкрапленников и основной массы в процессе выщелачивания.

Ключевые слова: опализация, сернокислотное выщелачивание, андезибазальты, моделирование, термальные поля, гидротермальные изменения

Для цитирования: Большаков И.Е., Никулина М.А., Бычков А.Ю., Ермолинский А.Б. Изменение состава, строения и свойств андезибазальтов в условиях моделируемого сернокислотного выщелачивания // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 87–93.

CHANGES IN THE COMPOSITION, STRUCTURE AND PROPERTIES OF ANDESITE-BASALT UNDER CONDITIONS OF SIMULATED SULFURIC ACID LEACHING

Ilya E. Bolshakov¹, Mariya A. Nikulina², Andrey Yu. Bychkov³, Andrey B. Ermolinsky⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; bolshakov.ilya.210@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mariya.nikulina.2002@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; andrewbychkov@rambler.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; andrermolinskiy@mail.ru

Abstract. Experimental sulfuric acid leaching of quaternary andesibasalt samples under closed system conditions under the influence of a concentrated sulfuric acid solution was carried out. A qualitative and quantitative assessment of the effect of sulfuric acid leaching on the composition and properties of andesibasalts at the first stages of opalization was carried out. The mechanism of crack formation in andesibasalts has been revealed due to the uneven expansion of the inclusions and the bulk during the leaching process. A comparison of the natural process of sulfuric acid leaching with laboratory leaching has been made.

Keywords: opalization, sulfuric acid leaching, andesibasalts, modeling, thermal fields, hydrothermal changes

For citation: Bolshakov I.E., Nikulina M.A., Bychkov A.Yu., Ermolinsky A.B. Changes in the composition, structure and properties of andesite-basalt under conditions of simulated sulfuric acid leaching. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 87–93. (In Russ.).

Введение. В районах активного вулканизма, в специфических местах, где на поверхность выходят агрессивные термальные подземные воды, протекают активные метасоматические процессы преобразования исходных вулканогенных пород. Ход этих преобразований во многом контролируется составом подземных вод, но чаще всего в приповерхностных горизонтах развиваются процессы аргиллизации и опализации [Фролова и др., 2011]. Одно из самых емких определений аргиллизации было дано еще Ф.Ю. Левинсон-Лессингом в его петрографическом словаре: «Аргиллизация — превращение

лав и других пород в глины» [Левинсон-Лессинг, 1963]. Аргиллизация в основном происходит под воздействием от среднекислых до слабощелочных термальных вод ($4 < \text{pH} < 8,5$) [Большаков и др., 2023].

В то же время под воздействием сильнокислых и ультракислых ($1,4 < \text{pH} < 4$) термальных вод на термальных полях протекает процесс опализации, в результате которого исходные вулканогенные породы выщелачиваются и превращаются в породу, практически полностью сложенную опалом. Ультракислые термальные воды образуются в результате окисления H_2S до H_2SO_4 в приповерхностных условиях на



Рис. 1. Южно-Камбальное Центральное термальное поле со схематически нанесенной границей активной части

термальных полях, из-за чего толщи опалитов редко имеют мощность, превышающую первые десятки метров. Таким образом основой опализации с химической точки зрения является процесс сернокислотного выщелачивания. В то же время, кислотное выщелачивание может протекать и за пределами термальных полей, например в поверхностных водах ручьев, берущих начало на термальных полях [Ладыгин и др., 2014]. Процесс опализации неплохо изучен с точки зрения минеральных преобразований [Набоко, 1963; Структура..., 1993; Zimbelman et. al., 2005], однако его влияние на свойства пород изучено слабо, хотя ряд исследователей и отмечает необходимость изучения опализированных зон вулканических построек как наиболее ослабленных участков, по которым происходит активация склоновых процессов.

Особая сложность изучения процесса опализации также обоснована тем фактом, что это весьма быстро протекающий процесс. Из-за этого на термальных полях широко распространены полностью преобразованные в опал породы, но крайне затруднителен отбор образцов начальных стадий преобразования [Большаков, 2021] и без изучения подобных образцов невозможно полноценное понимание самого механизма опализации.

В связи с этим, в рамках данной работы для более детального понимания последовательности протекания этого процесса в природе было проведено лабораторное моделирование сернокислотного выщелачивания на образцах неизменных андезибазальтов с порфировой структурой с Южно-Камбального Центрального термального поля (рис. 1), где это и происходит в природных условиях [Белоусов, 1976; Фролова, 2020].

Методика исследования. В 2022 г. в ходе полевых работ на Южно-Камбальном Центральном термальном поле (Южная Камчатка) были отобраны образцы неизменных андезибазальтов. Отбор производился западнее активного участка на небольшом удалении от активной части поля из трех

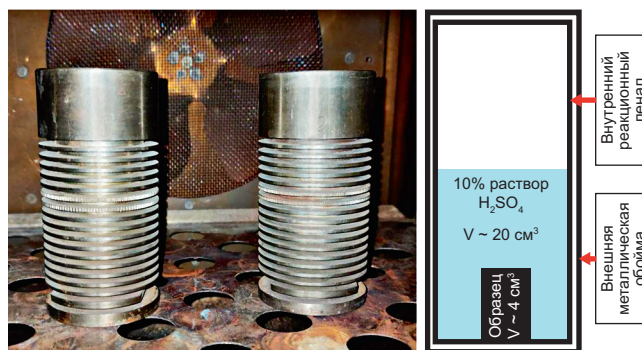


Рис. 2. Гидротермальные реакторы в шкафу-термостате и принципиальная схема экспериментальной установки

неглубоких выработок глубиной до 80 см. Участок отбора находился приблизительно в 50 м от прогретой части поля.

Для проведения эксперимента было подготовлено 20 цилиндров неизменных андезибазальтов диаметром 1,5 см, на 16 из которых было произведено воздействие серной кислоты. В процессе эксперимента образец загружался в специальный герметичный гидротермальный пенал (рис. 2), в который заливался 10 % раствор серной кислоты в объеме, пятикратно превышающем объем цилиндра. Затем эти реакторы помещались в шкаф-термостат при температурах 20, 50, 100 и 170 °C на сроки в 1, 3, 7 и 14 суток. Таким образом были получены 16 цилиндров различной степени опализованности (рис. 3) и 4 цилиндра неизменных андезибазальтов. Для всех подготовленных проб до начала эксперимента и по его завершении были произведены измерения всех стандартных показателей свойств, а также произведено томографическое исследование каждого образца до и после «кипячения».

Для того, чтобы нивелировать недостатки экспериментов в закрытой системе, при помощи прибора «Эксперт-001» и электрода «ЭСК-10601/7» были измерены водородные показатели исходного раствора серной кислоты и всех образованных в результате протекания реакции растворов. Эти измерения с учетом известных объемов образца и раствора в реакции позволили определить количество прореагировавшей серной кислоты.

Для всех проб были определены следующие показатели физических и физико-механических свойств грунтов: плотность воздушно-сухого грунта (ρ), скорость распространения продольных (V_p) волн в воздушно-сухом состоянии, магнитная восприимчивость (χ_{cp}), рассчитаны прочность на одноосное сжатие в воздушно-сухом состоянии (R_c) и открытая пористость (n_o , %). Все определения проводились по стандартным методикам [Фролова, 2015]. Параллельно с определением свойств были изучены особенности пустотного пространства с использованием микротомографа Yamato TDM-1000, все образцы описаны в шлифах с помощью оптического микроскопа «Olympus BX-41», определен минераль-

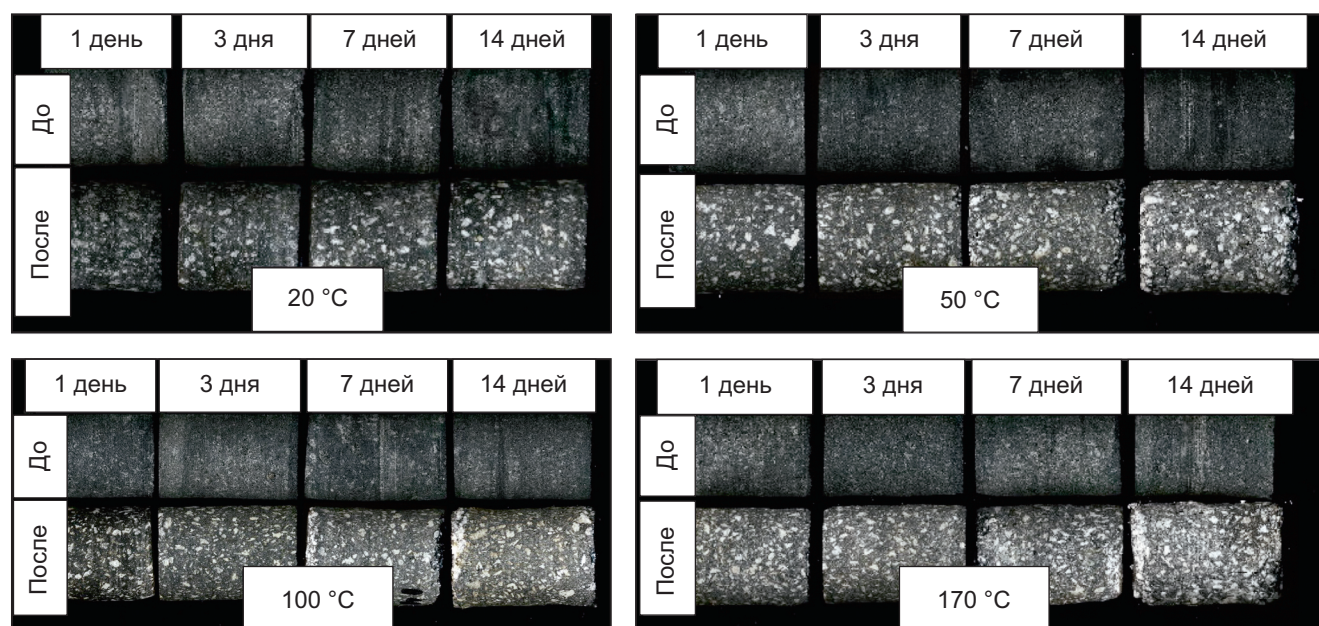


Рис. 3. Общий вид андезибазальтов Южно-Камбального Центрального термального поля до и после взаимодействия с раствором серной кислоты

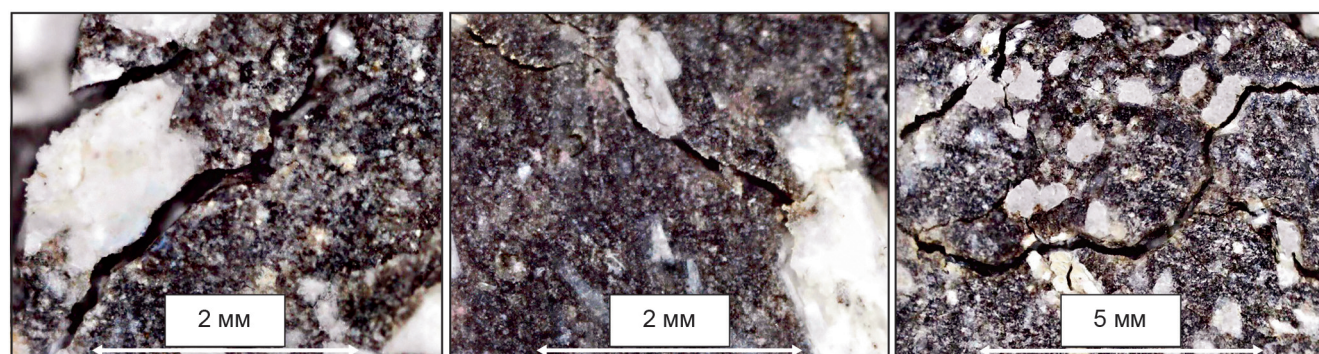


Рис. 4. Трещины, развивающиеся по границам вкрапленников и основной массы, в образце экспериментально опализированного андезибазальта (обработка при 170 °С в течении 14 суток)

ный состав посредством рентгенодифракционного анализа (прибор Ultima-IV). Микрофотографии образцов, подвергшихся сернокислотному выщелачиванию, были получены при помощи цифрового микроскопа Levenhuk DTX 90.

Петрографическая характеристика. Образцы неизмененных андезибазальтов имеют темно-серый цвет, порфировую структуру и массивную текстуру. Вкрапленники представлены плагиоклазами, пироксенами и калиевыми полевыми шпатами. Размеры вкрапленников плагиоклаза варьируются в пределах от 0,5 мм до 2 мм, а их содержание приближается к 30 % от общего объема породы. У крупных вкрапленников плагиоклазов достаточно отчетливо заметна неоднородность состава в центральной и периферийных частях. Так, центральные части представлены более основным битовнитом, а периферийные — лабрадором. В меньшем количестве представлены пироксены, имеющие размер от 0,5 мм до 1 мм, содержание которых приблизительно равно 5–6 %. Содержание калиевого полевого шпата не превышает 1–2 %.

Из рис. 3. отчетливо видно, что по мере увеличения температуры и длительности обработки облик пород заметно меняется. Более контрастными становятся минералы-вкрапленники, которые по мере увеличения интенсивности выщелачивания окрашиваются белым за счет минеральных преобразований внутри кристаллов. Вслед за вкрапленниками, хотя и заметно менее интенсивно, светлеет и основная масса породы.

Одним из наиболее значимых макроскопически заметных эффектов, наблюдаемых в образцах, подвергшихся сернокислотному выщелачиванию, является неравномерное изменение и сопутствующее ему увеличение объемов основной массы породы и минералов-вкрапленников, что приводит к весьма интенсивному растрескиванию породы, зачастую происходящему по границе вкрапленника и основной массы (рис. 4). При этом увеличение объемов самых крупных вкрапленников было заметно даже невооруженным взглядом по появлению положительного рельефа у этих вкрапленников после взаимодействия с раствором серной кислоты на

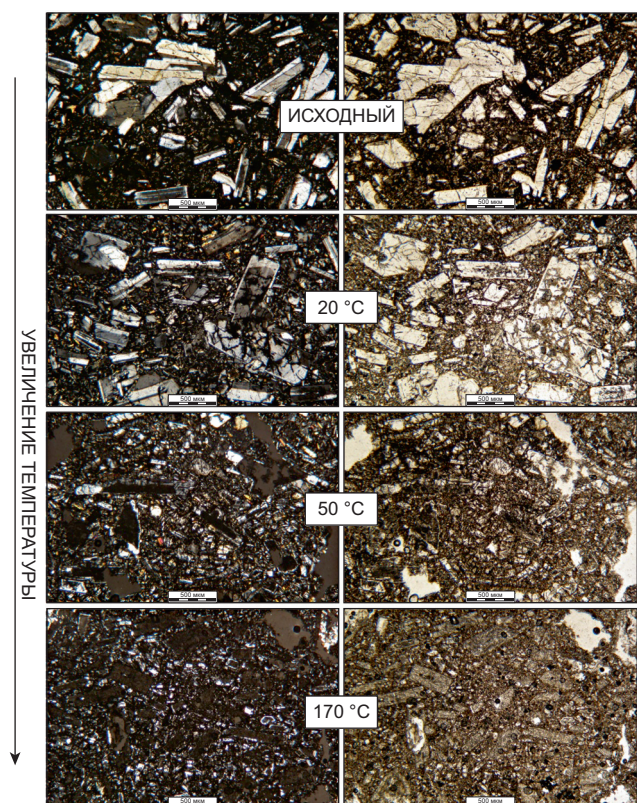


Рис. 5. Образцы андезибазальтов, в различной степени подверженных сернокислотному выщелачиванию, под микроскопом в одном (справа) и двух (слева) николях

абсолютно полированных гладких торцах и весьма ровных боковых поверхностях цилиндров.

Для более детального понимания последовательности и результатов минералогических преобразований в процессе экспериментальной опализации была подготовлена серия шлифов (рис. 5) из образца неизмененного андезибазальта, а также образцов, подвергшихся обработке при 20, 50 и 170 °C. При этом шлифы были изготовлены из образцов в форме пластин, которые были подвергнуты абсолютно идентичной цилиндрам обработке при соответствующих температурах в течение 9 дней.

Исходя из информации, полученной при помощи изучения шлифов в проходящем свете, можно утверждать, что механизм сернокислотного выщелачивания, протекающий в описываемых образцах, практически полностью идентичен механизму опализации, наблюдаемому на реальных термальных полях, характеризующихся разгрузкой ультракислых термальных вод (при температуре 90–120 °C и pH ~1,4–4,0). Так, на начальных стадиях сернокислотному выщелачиванию оказываются подвержены центральные части крупных вкрапленников и вулканическое стекло основной массы, а далее опализация развивается по периферийным частям крупных вкрапленников и микролитам, которые имеют более кислый состав.

Дополнительно необходимо отметить, что в связи с ограниченностью времени воздействия и объема взаимодействующего раствора (ввиду протекания

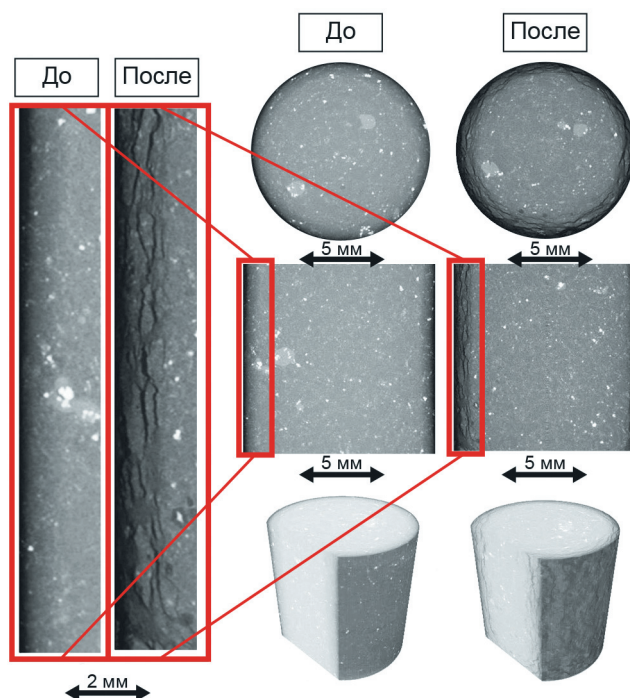


Рис. 6. Томограммы образца андезибазальта, подвергнутого кислотному выщелачиванию при температуре 50 °C в течение 14 суток

эксперимента в закрытой системе) опализация развивается не равномерно по всему объему образца, а согласно основным принципам диффузионного взаимодействия твердых веществ и жидкостей, в периферийной части изменения гораздо значительнее, чем внутри образцов. Так, шлифы, приведенные на рис. 5, были подготовлены именно из периферийных частей опализированных пластин. Для оценки темпов продвижения диффузионного слоя к центральным частям образцов, а также для определения влияния эксперимента на строение образцов был применен метод компьютерной томографии. Все образцы были сняты до и после воздействия раствора серной кислоты, что позволило оценить, в каком объеме образцы подвержены опализации. Так, на рис. 6 представлены результаты съемки образца, взаимодействовавшего с раствором серной кислоты в течение 14 суток при температуре 50°.

Из приведенных на рис. 6 данных отчетливо видно, что в результате проведенного эксперимента строение образца существенно изменилось. Наибольшие изменения ожидаемо коснулись поверхностной части образцов, формирующей в процессе реакции диффузионный слой. В максимально измененных образцах отчетливо дифференцируемая толщина этого слоя достигает 2–2,5 мм, то есть объем значительно измененного диффузионного слоя может достигать приблизительно 40 % от объема образца. Однако, как будет видно далее, изменения, вероятно, затрагивают и центральную часть породы, но в менее значительных масштабах, что приводит к радикальному снижению прочностных и деформационных свойств андезибазальтов. Вероятно, весьма значительный вклад в протекание реакции

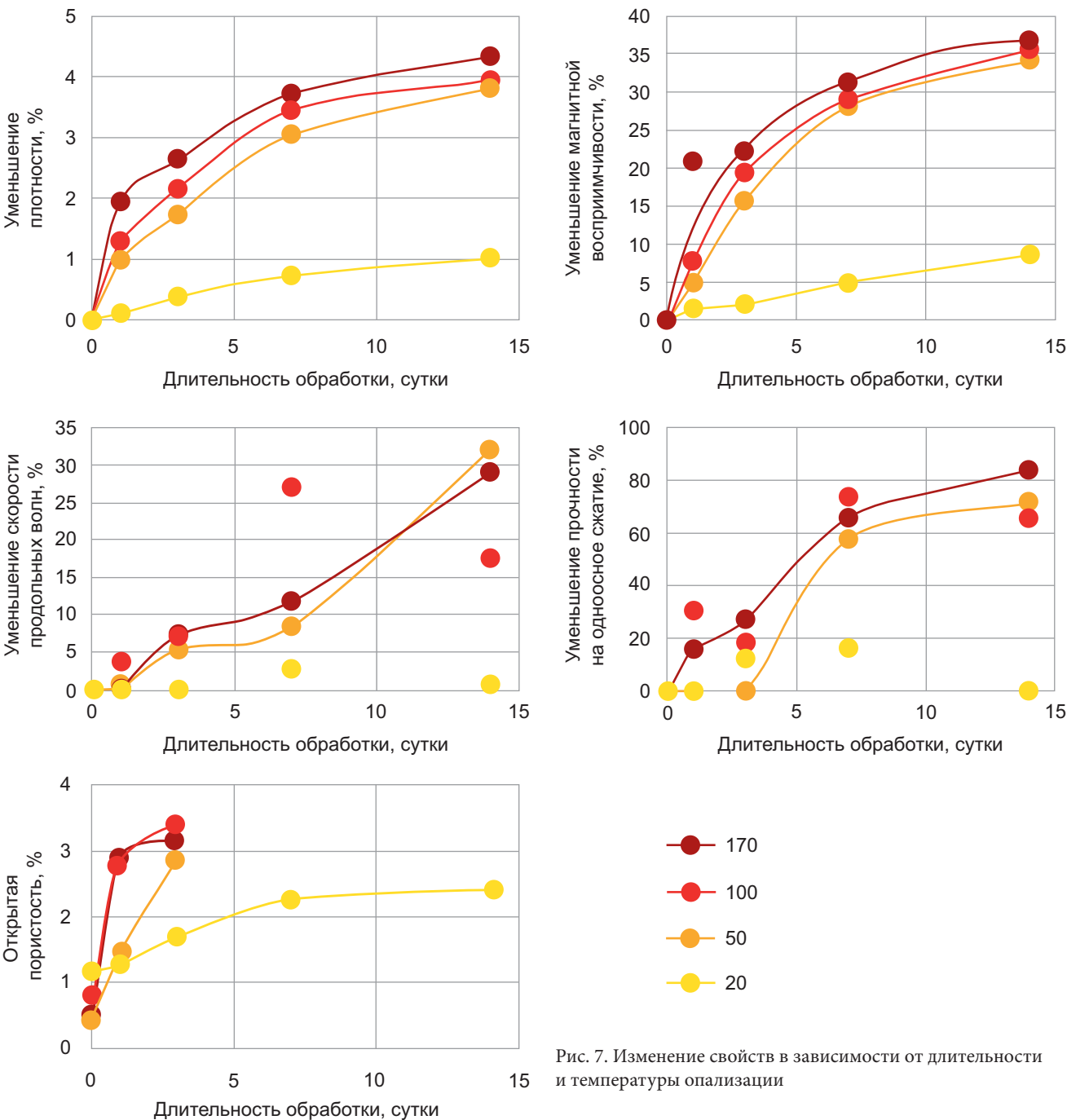


Рис. 7. Изменение свойств в зависимости от длительности и температуры опализации

вносит растрескивание образцов из-за их неоднородного состава и различных механизмов реакций отдельных частей породы, что было описано ранее. За счет этого растрескивания значительно упрощается миграция растворов, опализирующих породу, что в свою очередь вызывает дальнейшее развитие трещиноватости, из-за чего диффузию в таких образцах невозможно описать классическими термодинамическими уравнениями.

Изменения физических и физико-механических свойств. Помимо данных об изменении строения, был получен и ряд показателей, демонстрирующих процесс изменения свойств образцов по мере протекания процесса опализации (рис. 7). Так, для всех образцов до и после воздействия раствора кислоты определялся набор показателей свойств,

уже описанных ранее. Закономерным образом единственным показателем, который для всех цилиндров определялся только один раз, была прочность на одноосное сжатие. Однако 4 контрольные образца, которые не подвергались экспериментальной опализации, были разрушены в неизменном виде и показали достаточно близкие значения. Таким образом, для всех остальных образцов это значение было принято за исходную величину прочности на одноосное сжатие.

Из приведенных на рис. 7 графиков отчетливо видно, что изменения свойств пород хорошо коррелируют с длительностью обработки. Наиболее отчетливые зависимости были получены для показателей снижения плотности и снижения магнитной восприимчивости, измеряющихся в процентах и определя-

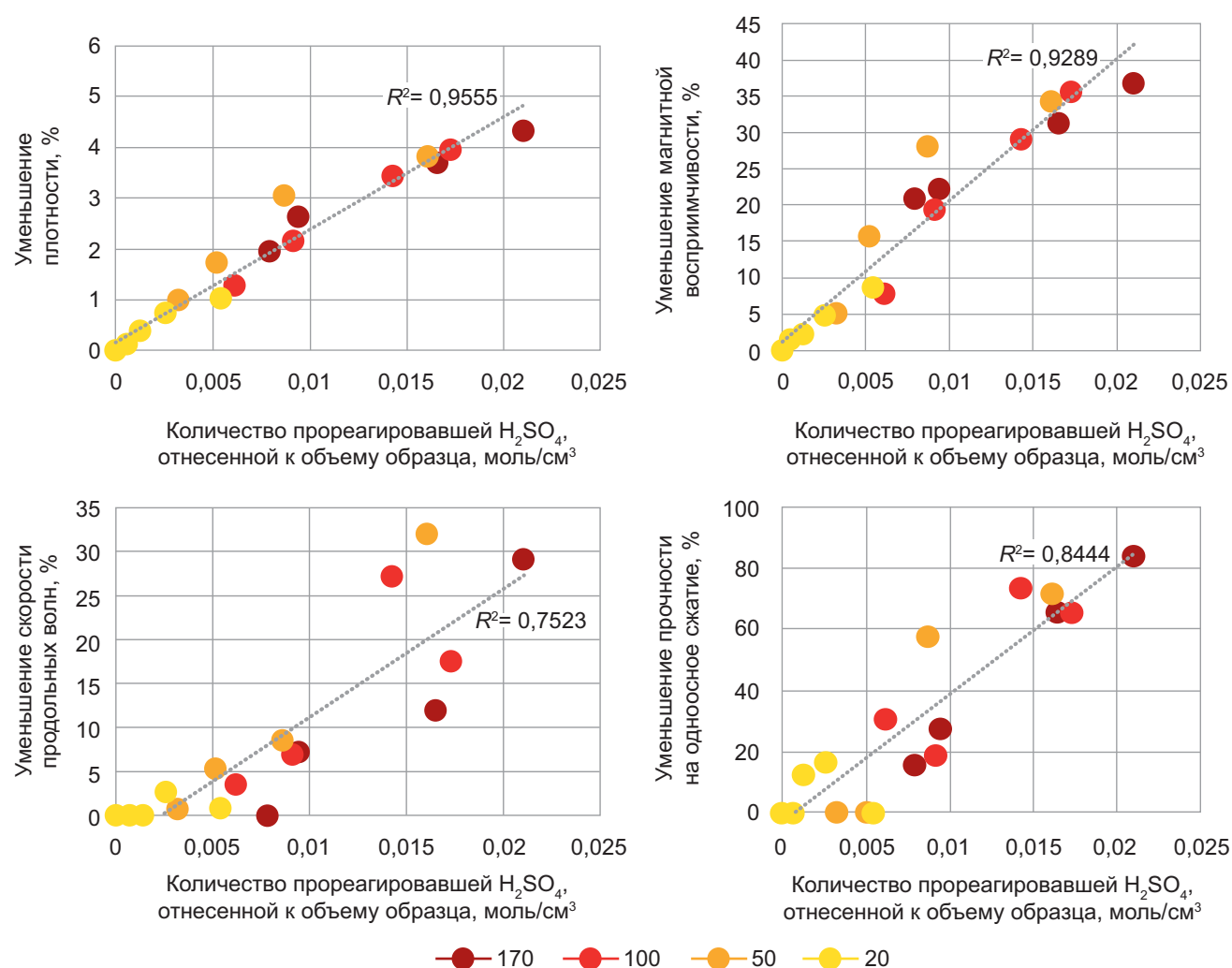


Рис. 8. Изменение свойств андезибазальтов в зависимости от количества прореагировавшей H_2SO_4 отнесенной к объему образца

емых как отношение разницы показателя до и после реакции к изначальной величине (например, относительное уменьшение плотности = $((\rho_{\text{неизм}} - \rho_{\text{изм}}) / \rho_{\text{неизм}}) \cdot 100\%$).

Из этих графиков видно, что скорость изменения свойств снижается со временем, что связано в основном с ростом диффузного слоя, замедляющего протекание реакции. С другой стороны, отчетливо видно, что скорость изменения свойств зависит от температуры. Например, за одинаковый промежуток времени при температуре 20 °С величина снижения плотности меньше приблизительно в 3,5 раза, чем при температуре 50 °С. В то же время разница для температурных ветвей 50 °С, 100 °С и 170 °С не столь велика, что можно объяснить нелинейной зависимостью скорости химической реакции от температуры, описанной в уравнении Аррениуса. Уменьшение скорости продольных волн и уменьшение прочности на одноосное сжатие, которые были рассчитаны аналогичным образом, носят несколько более хаотичный характер, особенно в области наибольших изменений. Вероятнее всего, это связано с тем, что, в отличие от двух предыдущих показателей, эти свойства в значительно меньшей степени контролируются

закономерными химическими преобразованиями, а гораздо больше зависят от изменений в строении образцов. Как было показано ранее, на наиболее высоких стадиях преобразования в образцах начинают появляться системы трещин, вызванные неоднородным строением породы и особенностями процесса опализации крупных вкрапленников. В связи с этим изменение показателей скорости упругих волн и прочности на одноосное сжатие в зависимости от времени обработки не образует достаточно правильной закономерности, однако в общих чертах угадывается схожий с первыми двумя графиками тренд. Вероятно, аналогичным образом изменяется и величина открытой пористости, определенная через плотность в водонасыщенном состоянии. Такой вывод можно сделать исходя из тренда изменения двадцатиградусной кривой и первых трех точек для остальных кривых. К сожалению, из-за частичного разрушения образцов, не нанесенных на график, по углам торцов не удалось достоверно определить величину их открытой пористости.

С учетом данных о количестве прореагировавшей серной кислоты был составлен ряд графиков, отражающих зависимость изменения свойств образцов

от количества прореагировавшей кислоты (рис. 8). Из них отчетливо видно, что на наблюдаемом участке изменения присутствует прямая корреляция изменения физических, физико-механических и магнитных свойств с количеством прореагировавшей кислоты.

Снижение плотности и магнитной восприимчивости демонстрирует весьма закономерную взаимосвязь, как и в зависимости от длительности обработки, так и от количества прореагировавшей серной кислоты, отнесенной к объему образца, что, вероятно, объясняется в основном прямой химической природой изменения этих показателей при изменении минерального состава. Коэффициенты детерминации на наблюдаемом участке для выявленной линейной зависимости составляют 0,96 и 0,93 для снижения плотности и снижения магнитной восприимчивости, соответственно. В то же время графики снижения прочности на одноосное сжатие и скорости продольных волн имеют несколько больший разброс (коэффициент детерминации равен 0,75 и 0,84 для снижения скоростей продольных волн и прочности на одноосное сжатие, соответственно), что объясняется лишь косвенной зависимостью физико-механических свойств от изменений в химическом и минеральном составе. Гораздо большее влияние на физико-механические свойства оказывает индуцирующаяся в результате минеральных преобразований трещиноватость, которая поначалу развивается в диффузном слое, однако впоследствии затрагивает центральные части испытываемых цилиндров.

Заключение. В результате данного исследования была успешно опробована методика моделирования природного процесса опализации в лабораторных условиях. Общие тенденции изменения свойств

в результате воздействия процесса сернокислотного выщелачивания в лаборатории совпадают с аналогичными для образцов, измененных в природе. Данный эксперимент позволил более детально оценить изменения, происходящие в андезибазальтах на начальных стадиях воздействия сернокислотного выщелачивания. С увеличением степени изменения происходит образование новых минералов, уменьшение количества рудных компонентов, развитие пустотности, появление значительных количеств аморфного вещества на конечных стадиях. Изменение свойств в условиях лабораторного эксперимента коррелирует со временем обработки и с количеством прореагировавшей кислоты. На начальных стадиях сернокислотного выщелачивания зависимость уменьшения соответствующих характеристик от длительности эксперимента носит логарифмический характер, от количества прореагировавшей кислоты — практически линейный. Под действием растворов серной кислоты в условиях лабораторного эксперимента андезибазальты с порфировой структурой претерпевают интенсивное растрескивание, вызванное неоднородным увеличением объема отдельных компонентов породы. Моделирование процесса сернокислотного выщелачивания в лабораторных условиях позволяет получить ряд показателей, описывающих скорость изменения свойств пород в процессе опализации в природных условиях.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН «Геохимия продуктов современной вулканической и поствулканической деятельности» (FWME-2024-0013 под руководством А.А. Нуждаева), утвержденного Минобрнауки России (тема № 124080600037-9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Белоусов В.И. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы / В.И. Белоусов, В.М. Сугробов, Н.Г. Сугрובה // Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки. Владивосток: ДВНЦ, 1976. С. 23–58.

Большаков И.Е. Закономерности изменения состава и физико-механических свойств андезитов Восточно-Паужетского термального поля под действием аргиллизации (Южная Камчатка) / И.Е. Большаков, Ю.В. Фролова, С.Н. Рычагов, М.С. Чернов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 5. С. 46–57.

Большаков И.Е. Изменение состава и свойств вулканических пород на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий (Большой Семячик, п-ов Камчатка) // Инженерная геология. 2021. № 3. С. 40–51.

Ладыгин В.М. Преобразование эффузивных пород под действием кислотного выщелачивания поверхностными термальными водами (геотермальная система Баранского, о-в Итуруп) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 20–37.

Левинсон-Лессинг Ф.Ю. Петрографический словарь / Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, Э.А. Струве. М.: ГНТИ лит. геологии и по охране недр, 1963. 448 с.

Набоко С.И. Гидротермальный метаморфизм пород в вулканических областях. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 172 с.

Структура гидротермальной системы / С.Н. Рычагов, Н.С. Жатнуев, А.Д. Коробов и др. М.: Наука, 1993. 298 с.

Фролова Ю.В. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 1. С. 36–51.

Фролова Ю.В. Инженерно-геологические особенности гидротермально-метасоматических пород Камчатки и Курильских островов // Инженерная геология. 2011. № 1. С. 48–64.

Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения: учебное пособие. М.: Книжный дом Университет, 2015. 220 с.

Zimbelman D.R., Rye R.O., Breit G.N. Origin of secondary sulfate minerals on active andesitic stratovolcanoes // Chemical Geology. 2005. 215(1). P. 37–60.

Статья поступила в редакцию 18.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 549.621.5

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-94-105

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МИНЕРАЛАХ ГРУППЫ ГЕЛЬВИНА: ИЗОМОРФНЫЕ ЗАМЕЩЕНИЯ, ФОРМА НАХОЖДЕНИЯ СЕРЫ, КР-СПЕКТРОСКОПИЯ

Мария Олеговна Булах¹, Игорь Викторович Пеков²,
Василий Дмитриевич Щербаков³, Марина Федоровна Вигасина⁴,
Андрей Олегович Карпов⁵, Никита Владимирович Чуканов⁶

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; bulahmo@my.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; igorpekov@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vsh@geol.msu.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vigasina55@mail.ru

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, Москва, Россия; karpovao@my.msu.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва; ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Черноголовка, Россия; chukanov@icp.ac.ru

Аннотация. Изучено 102 образца гельвина, даналита и гентгельвина из 35 объектов разных генетических типов, а также два кристалла синтетических аналогов гельвина и даналита. Показано, что данные бериллосиликаты (в отличие от структурно близких алюмосиликатов группы содалита) содержат серу главным образом в форме простого аниона S^{2-} и в незначительном количестве — в форме анион-радикала $S_2^{\bullet-}$. Рассмотрена природа примесных Са и Al для этих минералов. Предполагается, что изоморфизм с участием Al реализуется по схеме: $2Si^{4+} + S^{2-} \rightarrow 2Al^{3+} + \square^0$. Примесь Са связана преимущественно с вростками кальцита, флюорита и кальциевых гранатов.

Ключевые слова: гельвин, даналит, гентгельвин, бериллосиликаты, КР-спектр, полисульфидные группы, изоморфизм

Для цитирования: Булах М.О., Пеков И.В., Щербаков В.Д., Вигасина М.Ф., Карпов А.О., Чуканов Н.В. Новые данные о минералах группы гельвина: изоморфные замещения, форма нахождения серы, КР-спектроскопия // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 94–105.

NEW DATA ON HELVINE-GROUP MINERALS: ISOMORPHOUS SUBSTITUTIONS, THE FORM OF SULFUR, RAMAN SPECTROSCOPY

Maria O. Bulakh¹, Igor V. Pekov², Vasily D. Shcherbakov³, Marina F. Vigasina⁴,
Andrey O. Karpov⁵, Nikita V. Chukanov⁶

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bulahmo@my.msu.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; igorpekov@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vsh@geol.msu.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vigasina55@mail.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Fersman Mineralogical Museum of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; karpovao@my.msu.ru

⁶ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Federal Research Center of Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry RAS, Chernogolovka, Russia; chukanov@icp.ac.ru

Abstract. 102 samples of helvine, danalite and genthelvite from 35 objects of different genetic types, as well as two crystals of synthetic analogues of helvine and danalite, were studied. It is shown that these beryllosilicates (unlike structurally similar aluminosilicates of the sodalite-group) contain sulfur mainly in the form of S^{2-} and in a subordinate amount in the form of the $S_2^{\bullet-}$ radical anion. The nature of the Ca and Al impurities for these minerals is considered. It is assumed that the isomorphism involving Al is realized according to the scheme: $2Si^{4+} + S^{2-} \rightarrow 2Al^{3+} + \square^0$. The Ca impurity is mainly associated with calcite, fluorite and calcium garnet growths.

Keywords: helvine, danalite, genthelvite, beryllosilicates, Raman spectrum, polysulfide groups, isomorphism

For citation: Bulakh M.O., Pekov I.V., Shcherbakov V.D., Vigasina M.F., Karpov A.O., Chukanov N.V. New data on helvine-group minerals: Isomorphous substitutions, the form of sulfur, Raman spectroscopy. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 94–105. (In Russ.).

Введение. Группа гельвина включает три структурных кубических (пр. гр. $P-43n$) бериллосиликата с общей формулой $M_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$ ($Z=1$), где видообразующие $M=Mn^{2+}$ (гельвин), Fe^{2+} (даналит) или Zn (гентгельвин) [Hassan, Grundy, 1985]. Они образуют между собой протяженную изоморфную систему [Минералы, 2003]. Эти минералы имеют содалитоподобную структуру, основу которой составляет каркас из связанных вершинами и регулярно чередующихся тетраэдров $[SiO_4]$ и $[BeO_4]$, образующих четырехчленные кольца в проекции каждой грани элементарной ячейки и шестичленные кольца (в форме «сферического треугольника») — в плоскостях, перпендикулярных диагоналям элементарной ячейки. Катионы M , расположенные в полостях этого каркаса, центрируют тригональные пирамиды, основания которых с атомами O по углам вписаны в «сферические треугольники», а в четвертой вершине размещается дополнительный сульфидный анион, связывающий вместе четыре пирамиды [Hassan, Grundy, 1985].

Минералы группы гельвина достаточно широко распространены в природе. Их находки известны в щелочных гранитах и нефелиновых сиенитах [Зубков и др., 1976; Finch, 1990], наиболее же типичны они для дифференциатов кислых и средних магматических пород разной щелочности [Минералы, 2003]. В редкометальных гранитных пегматитах члены группы гельвина образуются преимущественно за счет берилла в ходе пневматолито-гидротермальной переработки более ранних пегматитовых ассоциаций [Зубков и др., 1976]. Весьма типичны эти минералы для метасоматитов грейзеновой формации, в том числе для специфических грейзеновых ассоциаций, развитых по породам с низкими концентрациями SiO_2 и Al_2O_3 — известнякам, доломитам, скарнам, серпентинитам. К особому типу таковых относят и своеобразные гельвинсодержащие берtrandит-фенакит-флюоритовые метасоматиты, развивающиеся в условиях повышенной щелочности, представленные, например, в Ермаковском месторождении (Забайкалье) [Куприянова и др., 2009; Куприянова, Шпанов, 2011; Дамдинова и др., 2018]. Появление минералов группы гельвина в скарнах также связывают с пневматолито-гидротермальными процессами преобразования первичных скарновых ассоциаций [Косалс, 1961]. Промышленно-значимые скопления цинкового члена группы — гентгельвина — приурочены к щелочным микроклин-альбитовым апогранитным метасоматитам, с которыми связано, например, Пержанское месторождение бериллия в Житомирской области (Украина) [Галецкий, 1971]. Гельвин нередко отмечается в гидротермальных жилах полиметаллических и $Au-Ag$ месторождений в ассоциациях с другими минералами Mn [Зубков и др., 1976].

За длительный период исследований минералов данной группы было опубликовано немало работ, посвященных кристаллохимии, генезису и типо-

морфизму этих бериллосиликатов [Glass et al., 1944; Галецкий и др., 1970; Галецкий, 1971; Зубков и др., 1976; Dunn, 1976; Larsen, 1988; Фурсенко, 1989; Finch, 1990; Perez et al., 1990; Ragu, 1994; Zito, Hanson, 2017; Паутов и др., 2020; Raade, 2020; Liu et al., 2022]. Предполагается, что между Mn , Fe и Zn в системе гельвин-даналит-гентгельвин реализуется полный изоморфизм [Минералы, 2003], хотя до сих пор в природе не выявлены близкий по составу к конечному члену даналит и маложелезистые (с содержанием менее 2,5 мас. % FeO) члены ряда гельвин-гентгельвин в диапазоне составов $Hel_{90}Gen_{10}$ – $Hel_{10}Gen_{90}$ (Hel — компонент $Mn_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$, Gen — $Zn_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$).

Как показано в работах [Беус, 1960; Зубков и др., 1976; Фурсенко, 1989], соотношения M -катионов в минералах группы гельвина служат индикаторами условий кристаллизации этих бериллосиликатов — кислотности/основности среды, фугитивности кислорода и сульфидной серы.

Интерес к продолжению кристаллохимических исследований этих минералов сегодня вызван пересмотром представлений о формах нахождения серы в природных содалитоподобных алюмосиликатах, к которым представители группы гельвина структурно очень близки. До 1980-х годов считалось, что в минералах группы содалита, в частности, в лазурите, тугтупите и S -содержащем содалите (гакманите), сульфидная сера находится в форме простого аниона S^{2-} [Hassib et al., 1977; Hassan et al., 1985; Pizani et al., 1985], однако последующие исследования показали, что в этих минералах возможно присутствие и других S -содержащих групп, включая анион-радикалы $S_2^{\cdot-}$ и $S_3^{\cdot-}$, которые являются центрами люминесценции и центрами синей окраски соответственно. Недавнее детальное исследование этих минералов (а также близких к ним по структуре членов группы канкринита) с привлечением комплекса спектроскопических методов [Chukanov et al., 2020, 2022a, 2022b, 2022в; Sapozhnikov et al., 2021, 2023; Farsang et al., 2023; Пеков и др., 2024] показало, что для них характерно широкое разнообразие S -содержащих анионов, анион-радикалов и нейтральных молекул, в том числе HS^- , S_5^{2-} , $S_2^{\cdot-}$, $S_3^{\cdot-}$, $S_4^{\cdot-}$, S_4^0 , S_6^0 , SO_4^{2-} , SO_3^{2-} и COS . В то же время, анион S^{2-} в этих фельдшпатоидах, как оказалось, отсутствует или играет незначительную роль. В свете этих данных особую актуальность получил вопрос о формах серы в минералах группы гельвина.

Еще один малоразработанный аспект минералогии системы гельвин-даналит-гентгельвин — природа примесных Al и Ca . Данные компоненты нередко фиксируются в анализах этих бериллосиликатов в значимых количествах [Зубков и др., 1976; Finch, 1990; Ragu, 1994; Минералы, 2003], однако неясно, являются ли они структурными примесями или относятся к включениям других минералов.

Краткая характеристика изученного материала. В настоящей работе приведены результаты изучения 104 образцов минералов группы гельвина из собра-

Таблица 1

Генетические типы проявлений минералов группы гельвина, представляющие их местонахождения, и характерные для них минеральные ассоциации

Генетический тип	Месторождение / проявление	Минеральная ассоциация
Гранитные пегматиты	Ильменские горы (Южный Урал); Ров-гора и хребет Серповидный (Кейвы, Кольский п-ов); Новый Дурулгуй и Луковское м-ние, Завитинский рудный узел (Забайкалье); Тастыг (Тыва); Кент (Казахстан); Ушань (Фуцзянь, Китай); Ранчо Оазис (Калифорния, США); Сьерро-Бланко (Кордова, Аргентина)	Кварц, микроклин (в т.ч. амазонит), альбит, мусковит, аннит, Li слюды, берилл, фенакит, топаз, спессартин, шерл, эльбаит, сподумен, касситерит, колумбит, монацит
Щелочные апогранитные метасоматиты	Пержанское м-ние (Житомирская область, Украина)	Альбит, микроклин, мусковит, циркон, флюорит, криолит, галенит
Альбититы	Ильгир (Прибайкалье)	Альбит, кварц, аннит, касситерит, флюорит
Грейзены	Восточный Коунрад и Кара-Оба (Казахстан); Куу (Казахстан); Ван-фын-Шань (Гуандун, Китай); Яогансянь (Хунань, Китай)	Кварц, мусковит, циннвальдит, топаз, берилл, берtrandит, фенакит, флюорит, криолит, касситерит, шеелит, ферберит, гюбнерит, гематит, молибденит, халькопирит, арсенопирит, пирит, сфалерит, галенит
Скарны и апоскарновые грейзены	Питкяранта (Южная Карелия); Шерегеш (Горная Шория); Белорецкое (Горный Алтай); верховья реки Учур (Хабаровский край); м-ние Трудовое и сай Музейный (хребет Иныльчек, Кыргызстан); Хортеколлен (Норвегия); Шварценберг и Брайтенбрунн (Саксония, Германия); Лос-Гуиндос (Кордова, Аргентина); Хуанган (Внутренняя Монголия, Китай)	Гранаты ряда андрадит-гроссуляр, диопсид, везувиян, эпидот, флогопит, аннит, клинохлор, фенакит, флюорит, кальцит, магнетит, гематит, касситерит, шеелит, сфалерит, галенит, арсенопирит
Берtrandит-фенакит-флюоритовые метасоматиты	Ермаковское м-ние (Забайкалье); Каражал (Казахстан)	Флюорит, кальцит, кварц, полевые шпаты, флогопит, пирит, берtrandит, фенакит, бавенит, лейкофан
Гидротермальные сульфидные месторождения	Дукат (Магаданская область); Алмалык (Узбекистан); Кавник (Румыния); Хвалетице (Богемия, Чехия)	Кварц, родохрозит, родонит, неотокит, пирит, сфалерит, галенит, халькопирит

ния Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН и из коллекций авторов И.В. Пекова и А.О. Карпова. Исследованный материал охватывает 35 бериллиевых месторождений и проявлений, представляющих главные генетические типы гельвиновой минерализации (табл. 1). Кроме того, изучены два синтетических образца — аналоги даналита и гельвина, полученные в лаборатории Д.А. Фурсенко [Фурсенко, 1989].

В природных образцах все три минерала представлены кристаллами типичного для них тетраэдрического габитуса или зернами неправильной формы величиной от 0,1 мм до 7 см; встречаются массивные агрегаты и секущие породу прожилки. Гельвин, как правило, желтый разных оттенков, иногда желто-зеленый или рыжевато-коричневый, даналит темно-красный или красно-коричневый. Цвет гентгельвина варьирует от кремово-коричневого и розового до густо-красного; образец из Сьерро-Бланко (Аргентина) отличается ярко-голубой окраской. Оба синтетических кристалла имеют ромбододекаэдрический габитус и окрашены в темно-коричнево-красный цвет; размеры этих кристаллов — 1,5 см и 4 см.

Методы исследования. Данные по химическому составу минералов группы гельвина получены ме-

тодом электронно-зондового микроанализа в Лаборатории локальных методов исследования вещества Геологического факультета МГУ с помощью сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM-IT500, оснащенного энергодисперсионным спектрометром X-MAX^N (Oxford Instruments) с площадью кристалла 50 мм²; на нем же выполнено электронно-микроскопическое исследование образцов. Анализы проводились при ускоряющем напряжении 20 кВ и силе тока зонда 0,7 нА; диаметр зонда около 3 мкм. Использовались следующие стандарты: Si, Ca, Mg — диопсид, Mn, Fe, Zn — чистые металлы, Al — Al₂O₃, S — FeS₂. Содержания прочих элементов с атомными номерами > 6 оказалось ниже порога обнаружения электронно-зондовым методом. Количество Be не определялось, а было рассчитано исходя из предположения о равенстве атомных количеств Si и Be.

Выбор способа расчета формул для минералов группы гельвина представляет некоторую сложность в связи с тем, что: 1) расчетное содержание Be может отличаться от фактического; 2) не вполне понятно, входят ли примесные компоненты в структуру, а если входят — то в какую позицию; 3) нельзя исключить нахождение части Zn или Mn в тетраэдрической позиции. В данной работе приводятся эмпирические формулы, рассчитанные двумя

альтернативными способами: 1) на сумму катионов M (без учета Al), равную 8, и 2) на сумму зарядов, равную 52 (т.е. $Z=1$).

КР-спектры (рамановские спектры) получены на произвольно ориентированных кристаллах с помощью спектрометра EnSpectr R532 (Россия) с зеленым лазером (длина волны 532 нм), установленным на кафедре минералогии Геологического факультета МГУ. Регистрация спектров осуществлялась в диапазоне $150\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ при спектральном разрешении 6 см^{-1} в режиме накопления сигнала в течение 2 с при усреднении по 150–200 экспозициям. Мощность луча лазера на выходе составляла 15 мВт, диаметр лазерного пятна на поверхности образца — около 10 мкм.

Результаты исследования. Химический состав.

Представительные выборки химических анализов гельвина, даналита и гентгельвина, отражающие вариации состава этих минералов, приведены в табл. 2, 3 и 4 соответственно, а соотношения Mn , Fe и Zn в образцах из объектов разных генетических типов показаны на рис. 1.

Образцы из гранитных пегматитов, скарнов и апоскарновых грейзенов представлены всеми тремя членами системы с широкими вариациями соотношений главных M -катионов. В щелочных апогранитных метасоматитах Пержанского месторождения (Житомирская обл., Украина) отмечены железистый гентгельвин и промежуточный член ряда даналит-гентгельвин, а в альбититах проявления Ильгир (Прибайкалье) развит богатый Mn и Zn даналит. Образцы из природных объектов прочих типов — грейзенов по алюмосиликатным породам, фенакит-берtrandит-флюоритовых метасоматитов и гидротермальных жил — относятся исключительно к гельвину. Эти данные хорошо согласуются с литературными сведениями о распространенности разных членов группы гельвина в тех или иных обстановках (см. выше).

Примесный Al в значимом количестве зафиксирован в ряде образцов всех трех членов системы, происходящих из гранитных пегматитов, скарнов, грейзенов и гидротермалитов, а также в синтетическом аналоге даналита. Из природных представителей системы наиболее богат глиноземом оказался гельвин из грейзенов месторождения Кара-Оба (Казахстан) — максимальная концентрация Al в нем составляет 0,22 атома на формулу (далее — а.ф.) = 1 мас. % Al_2O_3 (табл. 2, ан. 4). В синтетическом даналите содержание Al достигает 0,33 а.ф. = 1,5 мас. % Al_2O_3 (табл. 3, ан. 4). Стоит отметить, что в образцах с примесью Al использованными методами не выявлены сколь-нибудь существенные фазовые неоднородности, которые могли бы повлиять на корректность анализов. Иначе обстоит дело с примесным Ca . В образцах из нескольких скарновых объектов электронно-зондовым анализом зафиксировано до 2,3 мас. % CaO , но распределение этого компонента имеет очень неравномерный характер: Ca концентрируется в многочисленных

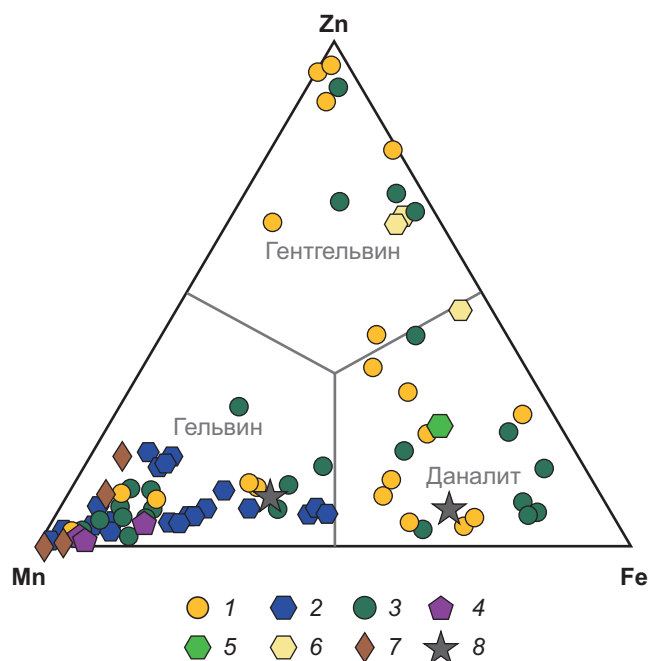


Рис. 1. Соотношения Mn , Fe и Zn в минералах системы гельвин-даналит-гентгельвин из разных объектов: 1 — гранитные пегматиты, 2 — грейзены, 3 — скарны и апоскарновые грейзены, 4 — берtrandит-фенакит-флюоритовые метасоматиты, 5 — альбититы, 6 — щелочные апогранитные метасоматиты, 7 — гидротермалиты, 8 — синтетические образцы

неравномерно распределенных включениях, часто размером первые микроны, представленных в разных образцах, по-видимому, кальцитом, флюоритом и гранатами ряда андрадит-гроссуляр.

Из прочих примесей в изученных образцах зафиксирован только Mg в количестве до 0,08 а.ф. = 0,3 мас. % MgO ; он присутствует как в природных представителях группы гельвина из грейзенизированных скарнов и гранитных пегматитов, так и в синтетическом аналоге даналита.

Рамановская (КР) спектроскопия. Прежде чем перейти к результатам КР-спектроскопических исследований, отметим, что вопросы рамановской спектроскопии минералов группы гельвина, как и вообще бериллосиликатов, в литературе практически не освещены. Опубликованные КР-спектры даналита, гельвина и гентгельвина удалось найти лишь в двух статьях [Czaja et al., 2021; Liu et al., 2022] и в базе данных RRUFF (RRUFF project. Database of Raman spectroscopy, X-ray diffraction and chemistry of minerals; <https://rruff.info/>). Интерпретацию полученных рамановских спектров (табл. 5) мы приводим на основании общепринятого отнесения полос в КР-спектрах содалитоподобных алюмосиликатов [Hettmann et al., 2012; Пеков и др., 2024] с учетом интерпретации спектров инфракрасного поглощения бериллосиликатов [Плюснина, 1963].

КР-спектры, полученные для выборки образцов гельвина, даналита и гентгельвина разного состава (табл. 5, рис. 2), близки между собой и хорошо соотносятся с КР-спектрами из базы данных RRUFF

Таблица 2

Химический состав гальвина

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
№ обр.	49756	50707	Tac22-02	75607	84381	58432	97224	63630	61405	61406	24261	72560	62170	95130
	мас. %													
FeO	0,41	0,95	2,05	5,70	5,76	7,58	11,36	4,68	6,93	13,56	17,90	18,91	23,48	20,65
MnO	50,19	49,43	47,78	44,50	43,85	38,32	36,85	36,88	36,35	32,31	28,76	28,39	23,71	21,82
ZnO	0,56	1,76	1,72	1,33	1,44	5,75	3,39	10,74	8,74	6,06	5,55	4,27	3,72	9,00
MgO	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,12	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,22	н.п.о.	н.п.о.
CaO	0,07	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	0,10	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Al ₂ O ₃	0,49	0,45	0,28	1,02	0,70	0,15	0,13	0,38	н.п.о.	н.п.о.	0,11	н.п.о.	0,25	н.п.о.
SiO ₂	32,63	32,35	32,48	31,90	32,33	32,33	32,09	32,13	31,88	32,24	32,18	32,39	31,90	32,50
BeO*	13,57	13,47	13,52	13,28	13,46	13,46	13,36	13,38	13,27	13,42	13,39	13,48	13,28	13,53
S	5,64	5,68	5,81	5,33	5,52	5,74	5,72	5,49	5,60	5,71	5,77	5,76	5,66	5,72
–O=S	2,82	2,83	2,90	2,66	2,75	2,86	2,85	2,74	2,79	2,85	2,88	2,87	2,82	2,86
Сумма	100,74	101,26	100,74	100,40	100,31	100,47	100,05	101,16	99,98	100,45	100,78	100,55	99,18	100,36
	Формула в расчете на Fe+Mn+Zn+Mg=8													
Fe	0,06	0,14	0,32	0,88	0,90	1,18	1,76	0,72	1,08	2,10	2,76	2,92	3,70	3,26
Mn	7,86	7,62	7,45	6,94	6,91	6,03	5,78	5,78	5,72	5,07	4,49	4,44	3,78	3,49
Zn	0,08	0,24	0,23	0,18	0,20	0,79	0,46	1,47	1,20	0,83	0,75	0,58	0,52	1,25
Mg								0,03				0,06		
Al	0,13	0,10	0,06	0,22	0,15	0,03	0,03	0,08			0,02		0,06	
Si	6,03	5,89	5,98	5,87	6,01	6,01	5,94	5,94	5,93	5,97	5,93	5,98	6,01	6,13
Be*	6,03	5,89	5,98	5,87	6,01	6,01	5,94	5,94	5,93	5,97	5,93	5,98	6,01	6,13
S	1,95	1,94	2,00	1,84	1,92	2,00	1,98	1,90	1,95	1,98	1,99	1,99	2,00	2,02
O**	24,30	23,87	24,03	24,12	24,34	24,08	23,84	24,05	23,83	23,94	23,83	23,94	24,11	24,38
Σ(Si,Al,Be)	12,19	11,88	12,02	11,96	12,17	12,05	11,91	11,96	11,86	11,94	11,88	11,96	12,08	12,26
	Формула в расчете на сумму зарядов, равную 52													
Fe	0,06	0,15	0,32	0,88	0,89	1,17	1,77	0,73	1,09	2,11	2,78	2,93	3,68	3,21
Mn	7,78	7,68	7,44	6,95	6,84	6,01	5,81	5,79	5,77	5,09	4,52	4,45	3,77	3,43
Zn	0,08	0,24	0,23	0,18	0,20	0,79	0,47	1,47	1,21	0,83	0,76	0,58	0,52	1,23
Mg								0,03				0,06		
Σ(Fe,Mn, Zn,Mg)	7,92	8,06	7,99	8,01	7,92	7,98	8,05	8,01	8,07	8,03	8,08	8,02	7,97	7,87
Al	0,13	0,10	0,06	0,22	0,15	0,03	0,03	0,08			0,02		0,06	
Si	5,96	5,93	5,97	5,88	5,95	5,99	5,97	5,95	5,98	5,99	5,97	5,99	5,98	6,04
Be*	5,96	5,93	5,97	5,88	5,95	5,99	5,97	5,95	5,98	5,99	5,97	5,99	5,98	6,04
Σ(Si,Al,Be)	12,05	11,96	12,00	11,98	12,05	12,02	11,97	11,99	11,96	11,98	11,96	11,98	12,02	12,08
Σкат.	19,97	20,02	19,99	19,99	19,97	20,00	20,02	20,00	20,03	20,01	20,04	20,00	19,99	19,95
S	1,96	1,95	2,00	1,84	1,90	1,99	1,99	1,91	1,97	1,99	2,01	2,00	1,99	1,99

Примечания. 1 — Кавник, Румыния, 2 — Восточный Коунрад, Казахстан, 3 — Тастыг, Сангилен, Тыва, 4, 5, 7– Кара-Оба, Карагандинская область, Казахстан, 6 — Каражал, Казахстан, 8–10 — Куу, Бетпак-Дала, Казахстан, 11 — Ильмены, Южный Урал, 12 — Люпикко, Питкяранта, Южная Карелия, 13 — Ван-фын-Шань, Гуандун, Китай, 14 — Хуангань, Чифэн, Внутренняя Монголия, Китай; н.п.о. здесь и далее — содержание компонента ниже предела обнаружения.

Таблица 3

Химический состав даналита

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
№ обр.	ST3211	56802	68440	10656	55990	59176	64207	69027
	мас. %							
FeO	40,92	36,29	34,75	33,32	32,54	31,24	27,67	21,82
MnO	5,88	12,42	2,71	12,72	16,90	17,55	18,49	7,45
ZnO	3,75	2,29	14,58	4,10	1,84	2,69	5,56	23,80
MgO	н.п.о.	0,22	0,17	0,15	0,15	0,30	0,17	н.п.о.
Al ₂ O ₃	н.п.о.	н.п.о.	0,19	1,47	н.п.о.	н.п.о.	0,11	н.п.о.
SiO ₂	31,98	32,13	32,07	31,86	32,80	32,45	32,05	31,41
BeO*	13,31	13,36	13,35	13,26	13,65	13,51	13,34	13,07
S	5,71	5,77	5,77	5,05	5,88	5,82	5,79	5,62
–O=S	2,85	2,88	2,88	2,52	2,93	2,90	2,89	2,80
Сумма	98,70	99,60	100,71	99,41	100,83	100,66	100,29	100,37
	Формула в расчете на Fe+Mn+Zn+Mg=8							
Fe	6,52	5,66	5,49	5,32	5,05	4,81	4,29	3,47
Mn	0,95	1,96	0,43	2,06	2,66	2,74	2,90	1,20
Zn	0,53	0,32	2,03	0,58	0,25	0,37	0,76	3,34
Mg		0,06	0,05	0,04	0,04	0,08	0,05	
Al			0,04	0,33			0,02	
Si	6,09	5,99	6,05	6,08	6,09	5,98	5,94	5,96
Be*	6,09	5,99	6,05	6,08	6,09	5,98	5,94	5,96
S	2,04	2,02	2,04	1,81	2,04	2,01	2,01	2,00
O**	24,25	23,96	24,19	24,45	24,21	23,93	23,80	23,89
Σ(Si,Al,Be)	12,18	11,98	12,14	12,49	12,18	11,96	11,90	11,92
	Формула в расчете на сумму зарядов, равную 52							
Fe	6,45	5,67	5,44	5,17	5,00	4,83	4,31	3,48
Mn	0,94	1,96	0,43	2,00	2,63	2,75	2,92	1,20
Zn	0,52	0,32	2,01	0,56	0,25	0,37	0,77	3,35
Mg		0,06	0,05	0,04	0,04	0,08	0,05	
Σ(Fe,Mn, Zn,Mg)	7,91	8,01	7,93	7,77	7,92	8,03	8,05	8,03
Al			0,04	0,33			0,02	
Si	6,03	6,00	6,00	5,91	6,03	5,99	5,97	5,99
Be*	6,03	6,00	6,00	5,91	6,03	5,99	5,97	5,99
Σ(Si,Al,Be)	12,06	12,00	12,04	12,15	12,06	11,98	11,96	11,98
Σкат.	19,97	20,01	19,97	19,92	19,98	20,01	20,01	20,01
S	2,02	2,02	2,02	1,76	2,02	2,01	2,02	2,01

Примечания. 1 — Трудовое, Центральный Тянь-Шань, Кыргызстан, 2, 5, 6, 7 — Новый Дурулгуй, Забайкалье, 3 — Люпикко, Пит-кяранта, Южная Карелия, 4 — синтетический образец, 8 — верховья реки Учур, Джугджур, Хабаровский край.

Таблица 4

Химический состав гентгельвина

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
№ обр.	81587	95228	81587	6614	ST3213	69991	69695	6602
	мас. %							
FeO	1,20	2,77	2,44	10,35	8,26	14,49	3,64	18,38
MnO	1,19	1,70	3,56	0,56	7,59	2,47	14,10	10,83
ZnO	52,51	50,24	47,78	43,45	37,81	36,35	36,31	23,89
MgO	0,13	0,13	0,18	н.п.о.	0,13	н.п.о.	н.п.о.	н.п.о.
Al ₂ O ₃	н.п.о.	0,15	0,25	н.п.о.	0,11	н.п.о.	0,19	н.п.о.
SiO ₂	30,82	30,68	30,94	31,43	30,79	31,17	31,38	31,92
BeO*	12,83	12,77	12,88	13,08	12,82	12,98	13,06	13,28
S	5,51	5,50	5,39	5,61	5,53	5,56	5,52	5,79
–O=S	2,75	2,74	2,69	2,80	2,76	2,77	2,75	2,89
Сумма	101,44	101,20	100,73	101,68	100,28	100,25	101,45	101,20
	Формула в расчете на Fe+Mn+Zn+Mg=8							
Fe	0,20	0,45	0,40	1,67	1,33	2,36	0,58	2,92
Mn	0,20	0,28	0,59	0,09	1,24	0,41	2,29	1,74
Zn	7,57	7,23	6,95	6,24	5,39	5,23	5,13	3,34
Mg	0,04	0,04	0,05		0,03			
Al		0,03	0,06		0,04		0,04	
Si	6,02	5,98	6,10	6,11	5,94	6,08	6,01	6,05
Be*	6,02	5,98	6,10	6,11	5,94	6,08	6,01	6,05
S	2,02	2,01	1,99	2,04	2,00	2,03	1,98	2,06
O**	24,04	23,98	24,39	24,30	23,87	24,20	24,10	24,11
Σ(Si,Al,Be)	12,04	11,99	12,26	12,22	11,92	12,16	12,06	12,10
	Формула в расчете на сумму зарядов, равную 52							
Fe	0,20	0,45	0,40	1,65	1,34	2,34	0,58	2,90
Mn	0,20	0,28	0,59	0,09	1,25	0,40	2,28	1,73
Zn	7,55	7,23	6,85	6,16	5,42	5,18	5,11	3,32
Mg	0,04	0,04	0,05		0,04			
Σ(Fe,Mn, Zn,Mg)	7,99	8,00	7,89	7,90	8,05	7,92	7,97	7,95
Al		0,03	0,06		0,04		0,04	
Si	6,00	5,98	6,01	6,04	5,97	6,02	5,99	6,02
Be*	6,00	5,98	6,01	6,04	5,97	6,02	5,99	6,02
Σ(Si,Al,Be)	12,00	11,99	12,08	12,08	11,98	12,04	12,02	12,04
Σкат.	19,99	19,99	19,97	19,98	20,03	19,96	19,99	19,99
S	2,01	2,01	1,96	2,02	2,01	2,01	1,97	2,04

Примечания. 1, 3 — Сьерро-Бланко, Кордова, Аргентина, 2 — Хуангань, Чифэн, Внутренняя Монголия, Китай, 4 — Ров-гора, Кейвы, Кольский п-ов, 5 — Люпикко, Питкяранта, Южная Карелия; 6 — Пержанское м-ние, Житомирская область, Украина; 7 — Донгол, Кент, Казахстан, 8 — хребет Серповидный, Кейвы, Кольский п-ов.

Таблица 5

Частоты полос в КР-спектрах минералов группы гельвина с разными соотношениями гельвинового $Mn_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$ (Hel), даналитового $Fe_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$ (Dan) и гентгельвинового $Zn_8[Be_6Si_6O_{24}]S_2$ (Gen) компонентов

	Hel ₉₈ Dan ₁ Gen ₁	Hel ₉₅ Dan ₁₄ Gen ₁	Hel ₈₃ Dan ₁₂ Gen ₅	Hel ₇₆ Dan ₁₃ Gen ₁₁	Hel ₅₃ Gen ₂₇ Dan ₂₀	Hel ₅₀ Dan ₄₃ Gen ₇	Dan ₇₉ Gen ₁₅ Hel ₆	Dan ₆₇ Hel ₂₆ Gen ₇	Dan ₈₁ Hel ₁₂ Gen ₇	Dan ₄₉ Gen ₄₆ Hel ₅	Gen ₈₈ Hel ₇ Dan ₅	Gen ₉₁ Hel ₃ Dan ₆	Gen ₆₅ Dan ₃₀ Hel ₅
№ обр.	49756	71510	26522	59198	45920	74624	45919	10656	ST3212	ST3216	81587	95228	69991
Цвет	Лимонно-желтый		Ярко-желтый	Желто-коричневый		Красно-коричневый	Темно-красный			Розово-красный	Ярко-голубой	Кремово-розовый	Розово-красный
Решеточные моды и колебания кластеров [SM ₄]	238	240	239	241	240	240	240	244	242	243	246	246	244
	287 308	293 305	295	297	293sh 305	296	298	294	298	297	300 308 324sh	305 320sh	302 320sh
Деформационные колебания берилло-силикатного каркаса δ [O-Si(Be)-O]	364	367	364	364		371	360	360	360	369w	370w	370w	371w
	446	445	444	441	444	445	443	443	443	444	420	419 448	419 445
	535	533	535	538	534	537	538	542	540	533	533	534w	535w
	566	570	570	569	568	565 579	572	568	572	574	579	578	576
S ₂ [*]					615w	615w					610w	614	
Смешанные колебания берилло-силикатного каркаса	680	681	680	681	686w	682	684	678	683	692w			690w
	764w	765w	765w	771 w	767w			762w	774w	771w	773	773	762
Валентные колебания берилло-силикатного каркаса ν	897s	897s	895s	892s	889s	890s	891s	890s	891s	886s	885s	885s	887s
										909sh	911	908	908sh
	944	946	943	944	943	940	944	941	944	948	949	948	946
	1019	973w 1020	974w 1021	973w 1020	1022	974 1021	970 1024w	972w 1020w	970w 1024w	969w 1025w	1030	1029	1027

Примечания. s — интенсивная полоса, w — слабая полоса, sh — плечо.

(Helvine R060059, R060621, Genthelvit R080134, Danalite R060057) и из [Czaja et al., 2021; Liu et al., 2022]. Предварительно отметим, что в ИК-спектрах гельвина, даналита и гентгельвина отчетливо различаются полосы валентных колебаний каркаса, при которых основная часть энергии приходится на существенно ковалентную связь одного типа — Be–O или Si–O (группы полос в диапазонах 700–800 и 900–1000 см^{–1} соответственно). В КР-спектрах этих минералов наиболее интенсивная полоса наблюдается в интервале 885–900 см^{–1}; это свидетельствует о том, что соответствующая КР-активная мода вовлекает оба типа связей каркаса (Be–O и Si–O) с преобладающим вкладом связей Si–O. Главные закономерности изменения облика рамановского спектра в зависимости от соотношений Mn, Fe и Zn можно охарактеризовать следующим образом. Наиболее значимо меняется положение самой интенсивной полосы в области валентных колебаний каркаса: если у гельвина, близкого к крайнему члену серии, она находится при 897 см^{–1} (рис. 2, а; 3, а), то с ростом концентрации более тяжелых, чем Mn, катионов — Fe и особенно Zn — происходит смещение этой полосы в низкочастотную сторону в пределах 12 см^{–1}.

В КР-спектрах гентгельвина (рис. 2, ж, з; 3, б) заметно увеличивается разрыв между этой модой и полосой около 940–950 см^{–1}, а также появляется еще один пик близ 910 см^{–1}; расщепление здесь, по-видимому, связано с искажением тетраэдров каркаса. В области деформационных и смешанных колебаний [Si–O–Be и O–Si(Be)–O] с ростом доли гентгельвиновой составляющей уменьшается интенсивность полос при 360–372 см^{–1} и 680–692 см^{–1}, а их максимумы смещаются в сторону высоких частот. В целом, по КР-спектрам можно надежно различить гельвин и гентгельвин с большими долями соответствующих компонентов (рис. 3), а для промежуточных членов системы и для даналита надежно выделить специфические черты КР-спектров весьма сложно. Следующая задача, для решения которой была использована рамановская спектроскопия — это определение форм нахождения серы. Как известно, простой анион S^{2–} не дает в КР-спектрах собственных полос, тогда как двухатомные и более сложные S-содержащие группы данный метод позволяет вполне надежно идентифицировать. Все зарегистрированные нами КР-спектры характеризуются отсутствием полос в области

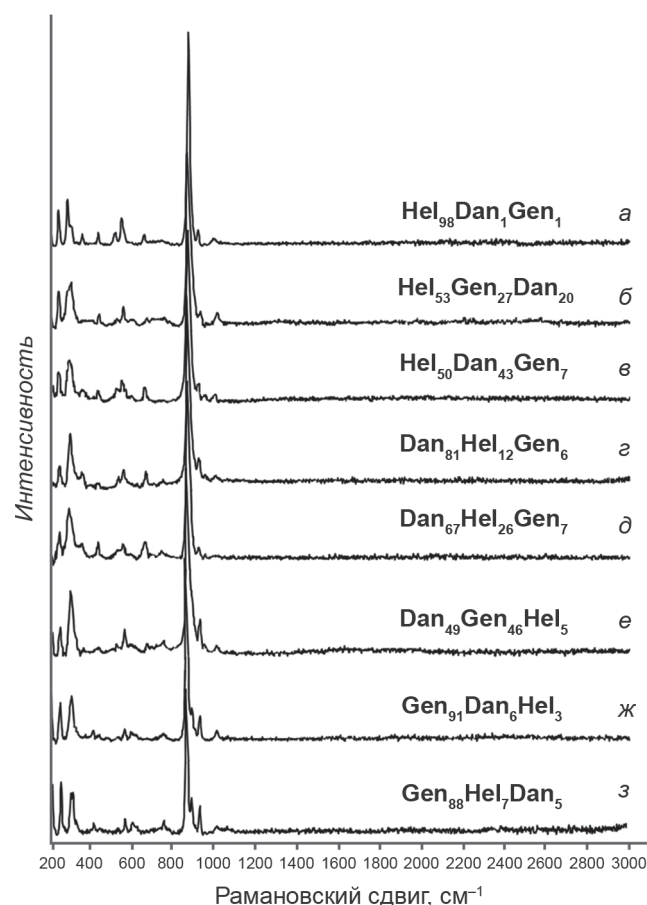


Рис. 2. КР-спектры: *а* — практически чистого гельвина, содержащего 0,5 мас. % Al_2O_3 (Кавник, Румыния, обр. № 49756), *б* — гельвина, обогащенного Fe и Zn (Питкярanta, Южная Карелия, обр. № 45920), *в* — гельвина, близкого к среднему члену серии гельвин-даналит (Ван-фынь-Шань, Китай, обр. № 74624), *г* — даналита с небольшим содержанием Mn и Zn (Трудовое, Киргизстан, обр. № ST3212), *д* — обогащенного Mn синтетического аналога даналита, содержащего 1,5 мас. % Al_2O_3 (обр. № 10656), *е* — даналита, близкого к среднему члену серии даналит-гентгельвин (Пержанское, Украина, обр. № ST3216), *ж* — гентгельвина с малым содержанием Mn и Fe (Хуанган, Китай, обр. № 95228), *з* — голубого гентгельвина с малым содержанием Mn и Fe (Сьерро-Бланко, Аргентина, обр. № 81587). Hel — гельвиновый компонент, Dan — даналитовый компонент, Gen — гентгельвиновый компонент

волновых чисел выше 1030 см^{-1} , из чего можно заключить, что в изученных образцах нет аниона HS^- и анион-радикала $\text{S}_3^{\bullet-}$ в значимых количествах: для первого типична полоса валентных колебаний около $2550\text{--}2580\text{ см}^{-1}$, а для второго — серия интенсивных обертонов в диапазоне $1080\text{--}3800\text{ см}^{-1}$ [Chukanov et al., 2020; Farsang et al., 2023]. Волновые числа основной моды симметричных валентных колебаний $\text{S}_3^{\bullet-}$, по данным тех же публикаций, лежат в интервале $540\text{--}570\text{ см}^{-1}$, где во всех наших КР-спектрах есть полосы; однако этот анион-радикал является синим хромофором [Chukanov et al., 2020; Sapozhnikov et al., 2021], а в окраске обсуждаемых минералов явственная синяя компонента очень редка. В КР-спектре единственного из нашей выборки ярко-голубого образца (рис. 2, *з*) — гентгельвина из

Сьерро-Бланко (Аргентина) — полосы в указанном интервале даже менее интенсивны, чем в спектрах желтых минералов.

Желтым хромофором в минералах группы содалита выступает анион-радикал $\text{S}_2^{\bullet-}$. Его валентным симметричным колебаниям ν_1 связей S–S соответствуют частоты в области $580\text{--}610\text{ см}^{-1}$ [Chukanov et al., 2022a; Farsang et al., 2023; Пеков и др., 2024]. В полученных рамановских спектрах минералов группы гельвина иногда проявляется слабая полоса $610\text{--}615\text{ см}^{-1}$, которую формально можно отнести к колебаниям $\text{S}_2^{\bullet-}$, если предположить, что увеличение частоты обусловлено нахождением данной группы в достаточно стесненных условиях внутри полостей бериллосиликатного каркаса. Заметим, однако, что никакой корреляции между интенсивностью этой полосы и окраской минерала в нашем случае не отмечается (еще один важный момент — с количеством примесного Al прямой связи здесь тоже нет). Возможно, это связано с тем, что анион-радикал $\text{S}_2^{\bullet-}$ — довольно слабый желтый хромофор, и на фоне темного цвета этих минералов его вклад незаметен. Известно также, что присутствие этого анион-радикала в фельдшпатоидах обычно вызывает люминесценцию, проявляющуюся в КР-спектрах в виде суперпозиции широких полос в области $1600\text{--}3700\text{ см}^{-1}$ [Chukanov et al., 2022b; Пеков и др., 2024]. При регистрации рамановских спектров гельвина и гентгельвина люминесценция действительно наблюдалась у ряда образцов с разными долями желтой составляющей в окраске (в т.ч. в тех КР-спектрах, где полоса 610 см^{-1} почти незаметна), но выражена она единственной полосой с максимумом около 1550 см^{-1} и плечом близ 1200 см^{-1} (см. нескорректированный по базовой линии КР-спектр гельвина на рис. 4). Вполне возможно, что ее появление связано не с $\text{S}_2^{\bullet-}$, а с каким-то другим центром. Впрочем, люминесценция может гаситься ионами Fe^{2+} .

Полосы, характерные для более сложных многоатомных бескислородных S-содержащих групп и молекул [см. Chukanov et al., 2020, 2022a, 2022b], в полученных КР-спектрах не зафиксированы. Что касается групп SO_3^{2-} и SO_4^{2-} , то в область характерных для них наиболее интенсивных полос валентных симметричных колебаний ν_1 близ 1000 см^{-1} [Nakamoto, 2009] попадают полосы валентных колебаний бериллосиликатного каркаса. Тем не менее, полосы ν_1 S–O в спектрах минералов, как правило, узкие и четкие, а в наших КР-спектрах они в этой области отсутствуют. В диапазоне $1100\text{--}1200\text{ см}^{-1}$, где лежат частоты валентных антисимметричных колебаний сульфатных и сульфитных групп [Nakamoto, 2009], ясно выраженных полос нет. Таким образом, можно считать, что SO_3^{2-} и SO_4^{2-} не входят в минералы группы гельвина в сколь-нибудь значимых количествах. По-видимому, это обусловлено стерическими причинами, как и для $\text{S}_3^{\bullet-}$.

Обсуждение результатов. Формы нахождения серы в минералах группы гельвина. Результаты

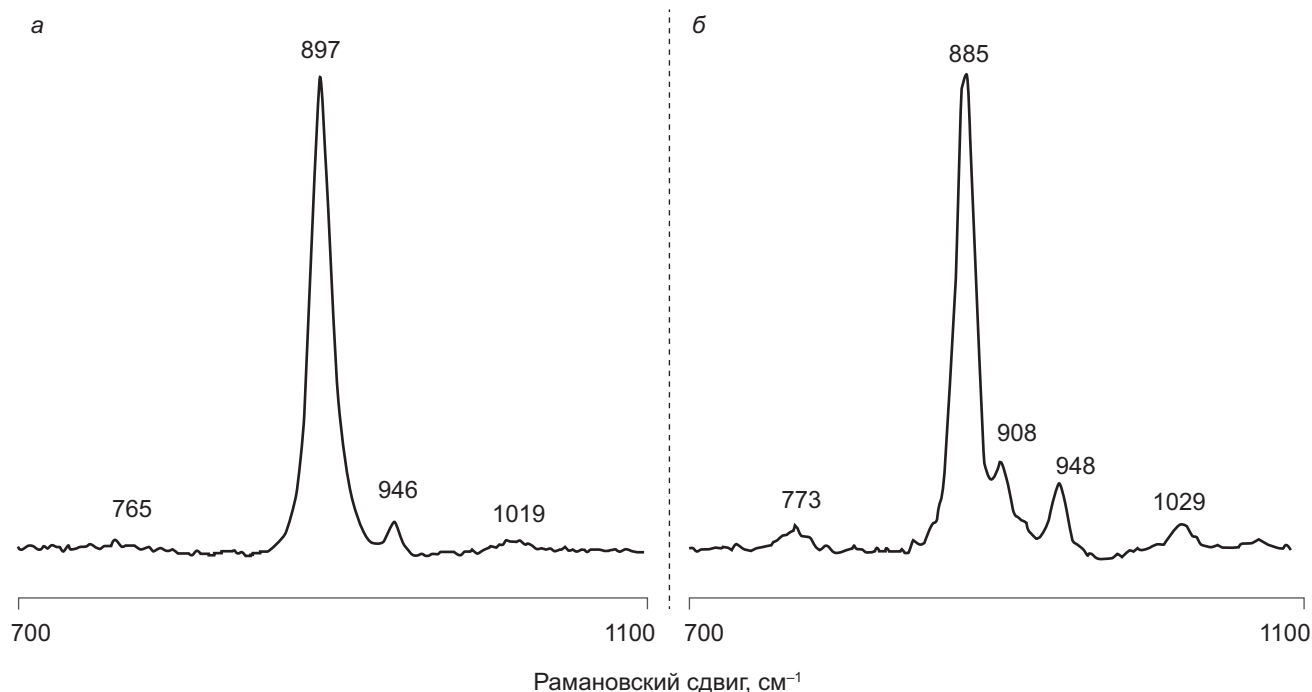


Рис. 3. Увеличенные фрагменты КР-спектров: *а* — гельвина He_{98} из месторождения Кавник, Румыния (обр. № 49756), *б* — гентгельвина Ge_{91} из месторождения Хуанган, Китай (обр. № 95228)

проведенных КР-спектроскопических исследований четко показывают, что для минералов системы гельвин-даналит-гентгельвин многоатомные S-содержащие группы не характерны. Можно допустить присутствие только анион-радикала $\text{S}_2^{\bullet-}$ в небольшом количестве, что, впрочем, на основании полученных данных не удастся достоверно ни подтвердить, ни опровергнуть. Таким образом, в отличие от алюмосиликатных фельдшпатоидов группы содалита, для которых установлено широкое разнообразие S-содержащих групп [Chukanov et al., 2020, 2022a, б, в; Sapozhnikov et al., 2021, 2023], гельвин, даналит и гентгельвин содержат серу только (или преимущественно) в форме $\text{S}_2^{\bullet-}$. Такие различия между структурно близкими минералами связаны, по-видимому, с разницей в размерах полостей тетраэдрического каркаса, где находятся дополнительные анионы. Структура кубических бериллосиликатов группы гельвина более компактна: величина параметра a для них варьирует в пределах 8,1–8,3 Å [Зубков и др., 1976; Минералы, 2003], тогда как, например, у минералов ряда содалит $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}]\text{Cl}_2$ –сапожниковит $\text{Na}_8[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{HS})_2$ она составляет 8,88–8,93 Å [Пеков и др., 2024], а у гаюина $\text{Na}_6\text{Ca}_2[\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}](\text{SO}_4)_2$ — уже 9,1 Å [Hassan, Grundy, 1991]. Длина связей S–S в $\text{S}_2^{\bullet-}$, по данным [Chivers, Oakley, 2023] — 1,996 Å; если эта группа в гельвиновой полости еще может каким-то образом разместиться, то вхождение $\text{S}_3^{\bullet-}$, имеющей две такие связи с углом 115,7°, представляется уже очень маловероятным: появление этого анион-радикала даже в модифицированном сапожниковите приводит к увеличению параметра a элементарной ячейки до 9,07 Å [Пеков и др., 2024]. Тем более, едва ли можно

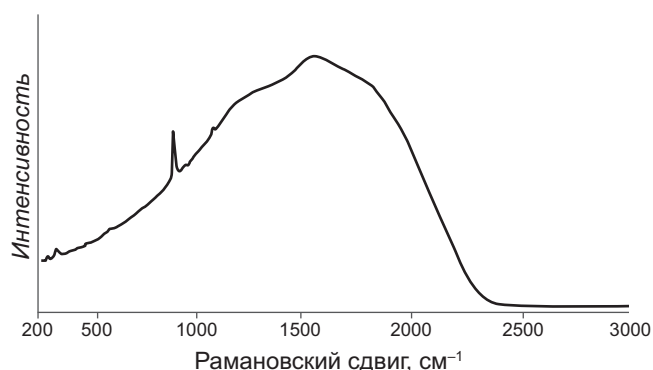


Рис. 4. Нескорректированный по базовой линии КР-спектр гельвина из месторождения Кавник, Румыния (обр. № 49756)

ожидать нахождения в минералах группы гельвина еще более крупных групп $\text{S}_4^{\bullet-}$, $\text{S}_5^{\bullet-}$ и нейтральных молекул S_4^0 или S_6^0 .

Особенности катионного изоморфизма. Самая высокая концентрация Al_2O_3 в наших образцах составила всего 1,5 мас. % = 0,33 а.ф. Al. Анализы с наибольшим зафиксированным содержанием глинозема в минералах системы гельвин-даналит-гентгельвин — до 12,3 мас. % — приводятся в монографии [Зубков и др., 1976], хотя в данном случае, как отмечают сами ее авторы, столь большие значения могут быть обусловлены присутствием вростков полевых шпатов, гранатов или других минералов Al, поскольку эти анализы — валовые, а не локальные. Электронно-зондовыми исследованиями значительная концентрация Al_2O_3 — до 9,7 мас. % = 2,26 а.ф. Al — выявлена в гентгельвине из щелочного массива Мотцфельдт на юге Гренландии [Finch, 1990]. В этой

работе высказано предположение о том, что Al входит в структуру гентгельвина путем замещения Zn с образованием вакансий в позиции внекаркасных катионов по схеме: $3\text{Zn}^{2+} \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + \square$; однако, как отмечено в [Raade, 2020], предполагаемого недостатка M-катионов при расчете формул анионным методом в действительности не отмечается. Значительные проявления изоморфизма по такой схеме сомнительны: ионный радиус Al^{3+} в кислородном тетраэдре — всего 0,39 Å, тогда как у Zn^{2+} в той же координации он составляет 0,60 Å, у Fe^{2+} — 0,63 Å, а у Mn^{2+} — 0,66 Å [Shannon, 1976]. Кроме того, Al характеризуется существенно меньшим сродством к сульфидной сере, чем Zn, Fe и даже Mn [Christy, 2018].

Заметим, что в изученных нами образцах с большим содержанием глинозема количество серы оказалось заметно ниже 2,00 а.ф. Та же закономерность прослеживается в анализах, приведенных в [Finch, 1990]. Этот факт позволяет предположить, что изоморфизм с участием Al реализуется преимущественно путем замещения Si с образованием вакансий в позициях S, что требуется для сохранения баланса зарядов: $2\text{Si}^{4+} + \text{S}^{2-} \rightarrow 2\text{Al}^{3+} + \square^0$. Из этой схемы получается, однако, что вакансий должно быть в два раза меньше, чем Al, а в реальных анализах такого строгого соответствия не прослеживается. Возможно, это связано с погрешностью при электронно-зондовых измерениях, или же в замещениях действительно участвует одновалентный анион-радикал $\text{S}_2^{\cdot-}$. Кроме того, надо отметить, что в богатом глиноземом синтетическом аналоге даналита (табл. 2, ан. 4) фиксируется существенный недостаток внекаркасных M-катионов, так что здесь вероятно изоморфная

схема с одновременным вхождением Al в позиции M и Si: $\text{M}^{2+} + \text{Si}^{4+} \rightarrow 2\text{Al}^{3+}$ (хотя некоторый дефицит серы проявлен и в этом случае).

В ИК-спектре гельвина из Люпикко (Питкьяранта, Карелия) [Chukanov et al., 2014] есть слабая широкая полоса валентных колебаний O–H около 3540 см^{-1} . Возможно, дефицит серы в некоторых образцах связан также и с изоморфизмом $\text{Si}^{4+} + \text{S}^{2-} \rightarrow \text{Al}^{3+} + \text{OH}^-$.

Еще один отмеченный в наших образцах примесный элемент Mg, несомненно, входит в минералы группы гельвина, замещая M-катионы: радиус Mg^{2+} в кислородном тетраэдре составляет 0,57 Å, что близко к радиусу Zn^{2+} [Shannon, 1976]. Тем не менее, изоморфизм в данном случае тоже проявлен весьма ограниченно, возможно, в силу разной степени сродства к сульфидной сере: в изученных образцах количество Mg не превышает 0,08 а.ф., хотя в тесной ассоциации с членами группы гельвина во многих случаях находятся магнезиальные силикаты. Анализы гельвина с существенно большей концентрацией этого компонента — до 2,3 мас. % MgO — удалось найти только в старых работах [Glass et al., 1944; Зубков и др., 1976].

В литературе есть сведения о нахождении в минералах группы гельвина и других химических примесей: Sc_2O_3 (до 1,5 мас. %) [Raade, 2020], SnO_2 (до 0,5 мас. %) [Зубков и др., 1976; Raade, 2020], WO_3 (до 0,5 мас. %) [Ragu, 1994], P_2O_5 (до 1,1 мас. %) и Li_2O (до 0,1 мас. %) [Паутов и др., 2020]; в наших образцах они не выявлены.

Финансирование. Исследования выполнены при поддержке РНФ, грант № 22-17-00006, <https://rscf.ru/project/22-17-00006/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беус А.А. Геохимия бериллия и генетические типы его месторождений. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 330 с.

Галецкий Л.С. Гентгельвиновое оруденение — новый высококачественный тип бериллиевого сырья // Геология рудных месторождений. 1971. Т. 3. С. 21–30.

Галецкий Л.С., Мельник Ю.М., Разумеева Н.Н. Условия образования гентгельвина // Мин. сборник. Львовского ун-та. 1970. Вып. 2. С. 176–184.

Дамдинова Л.Б., Дамдинов Б.Б., Брянский Н.В. Процессы формирования флюорит-лейкофан-мелинофан-эвидимитовых руд Ермаковского F-Ве месторождения (Западное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 8. С. 1271–1291.

Зубков Л.Б., Галецкий Л.С., Металиди С.В. Минералы гельвиновой группы и их месторождения. Киев: Наукова думка, 1976. 215 с.

Косалс Я.А. О гельвиноносном типе скарновых месторождений // Геология и геофизика. 1961. № 2. С. 3–15.

Куприянова И.И., Шпанов Е.П. Бериллиевые месторождения России. М.: ГЕОС, 2011. 352 с.

Куприянова И.И., Шпанов Е.П., Гальченко В.И. Ермаковское флюорит-бериллиевое месторождение (Западное Забайкалье, Россия). М.: ВИМС, 2009. 309 с.

Минералы: Справочник / Под ред. Г.Б. Бокия, Б.Е. Боруцкого. Т. V, вып. 2. Каркасные силикаты. Фельдшпатыды. М.: Наука, 2003. 379 с.

Паутов Л.А., Мираков М.А., Шодибеков М.А. и др. Фосфорсодержащий гельвин Шахдаринской пегматитовой жилы (Юго-Западный Памир, Таджикистан) // Новые данные о минералах. 2020. Т. 54, вып. 2. С. 61–68.

Пеков И.В., Чуканов Н.В., Щербаков В.Д. и др. Порообразующие фельдшпатоиды ряда содалит-сапожниковит из Ловозерского щелочного массива (Кольский полуостров): изоморфизм, термические и радиационные преобразования, генетическая минералогия // Записки РМО. 2024. № 1. С. 13–48.

Плюснина И.И. Инфракрасные спектры поглощения бериллиевых минералов // Геохимия. 1963. С. 158–173.

Рундквист Д.В., Денисенко В.К., Павлова И.Г. Грейзеновые месторождения (онтогенез и филогенез). М.: Недра, 1971. 328 с.

Фурсенко Д.А. Условия синтеза минералов группы гельвина. Новосибирск: Наука, 1989. 78 с.

Chivers T., Oakley R.T. Structures and spectroscopic properties of polysulfide radical anions: A theoretical perspective // Molecules. 2023. Vol. 28. Article 5654.

Christy A.G. Quantifying lithophilicity, chalcophilicity and siderophilicity // Eur. J. Miner. 2018. Vol. 30. P. 193–204.

Chukanov N.V. Infrared spectra of mineral species: Extended library. Springer-Verlag, Dordrecht, 2014. 1716 p.

Chukanov N.V., Shchipalkina N.V., Shendrik R.Yu., et al. Isomorphism and mutual transformations of S-bearing

components in feldspathoids with microporous structure // Minerals. 2022a. Vol. 12. Article 1456.

Chukanov N.V., Shendrik R.Yu., Vidasina M.F., et al. Crystal chemistry, isomorphism and thermal conversions of extra-framework components in sodalite-group minerals // Minerals. 2022b. Vol. 12. Article 887.

Chukanov N.V., Vidasina M.F., Zubkova N.V., et al. Extra-framework content in sodalite-group minerals: complexity and new aspects of its study using Infrared and Raman spectroscopy // Minerals. 2020. Vol. 12. Article 363.

Chukanov N.V., Zubkova N.V., Pekov I.V., et al. Sapozhnikovite, $\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{HS})_2$, a new sodalite-group mineral from the Lovozero alkaline massif, Kola Peninsula // Miner. Mag. 2022b. Vol. 86(1). P. 49–59.

Czaja M., Lisiecki R., Juroszek R., Krzykowski T. Luminescence properties of tetrahedral coordinated Mn^{2+} : genthelvite and willemite examples // Minerals. 2021. Vol. 11. Article 1215.

Dunn P.J. Genthelvite and the helvine group // Miner. Mag. 1976. Vol. 40. P. 627–236.

Farsang S., Caracas R., Adachi T.B.M., et al. S_2^- and S_3^- radicals and the S_4^{2-} polysulfide ion in lazurite, haiyue, and synthetic ultramarine blue revealed by resonance Raman spectroscopy // Amer. Miner. 2023. Vol. 108. P. 2234–2243.

Finch A.A. Genthelvite and willemite, zinc minerals associated with alkaline magmatism from the Motzfeldt Centre, South Greenland // Miner. Mag. 1990. Vol. 54. P. 407–412.

Glass J.J., Jahns R.H., Stevens R.E. Helvite and danalite from New Mexico and the helvite group // American Mineralogist. 1944. Vol. 29. P. 163–191.

Hassan I., Grundy H.D. The crystal structure of Hauyine at 293 and 153 K // Can. Miner. 1991. Vol. 29. P. 123–130.

Hassan I., Grundy H.D. The crystal structures of helvite group minerals $(\text{Mn}, \text{Fe}, \text{Zn})_8(\text{Be}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{S}_2$ // Amer. Miner. 1985. Vol. 70. P. 186–192.

Hassan I., Peterson R.C., Grundy H.D. The structure of lazurite, ideally $\text{Na}_6\text{Ca}_2(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{S}_2$, a member of the sodalite-group // Acta Cryst. C41. 1985. P. 827–832.

Hassib A., Beckman O., Annersten H. Photochromic properties of natural sodalite // J. Phys. D: Appl. Phys. 1977. Vol. 334. P. 771–777.

Hettmann K., Wenzel T., Marks M., Markl G. Sulfur speciation in S-bearing minerals: New constraints by a combination

of electron probe analysis and DFT calculations with special reference to sodalite-group minerals // Amer. Miner. 2012. Vol. 97. P. 1653–1661.

Larsen A.O. Helvite group minerals from syenite pegmatites in the Oslo Region, Norway // Contrib. Miner. Norway. 1988. No. 68. P. 119–124.

Liu S., Lio Y., Ye L., et al. Helvine-danalite mineralogy of the Dulong Sn-Zn polymetallic deposit in southeast Yunnan, China // Amer. Miner. 2022. Vol. 107. P. 1598–1610.

Nakamoto K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. Part A, 6th edition. New Jersey: Wiley & Sons, Inc., 2009. 419 p.

Perez J.-B., Dusauroy Y., Babkine J., Pagel M. Mn zonation and fluid inclusions in genthelvite from the Taghouaji complex (Air Mountains, Niger) // Amer. Miner. 1990. Vol. 75. P. 909–914.

Pizani P.S., Terrile M.C., Farach H.A., Poole C.P. Color centers in sodalite // Amer. Mineral. 1985. Vol. 70. P. 1186–1192.

Raade G. Helvine-group minerals from Norwegian granitic pegmatites and some other granitic rocks: Cases of significant Sc and Sn contents // Can. Miner. 2020. Vol. 58. P. 367–379.

Ragu A. Helvite from the French Pyrénées as evidence for granite-related hydrothermal activity // Can. Miner. 1994. Vol. 32. P. 111–120.

Sapozhnikov A.N., Bolotina N.B., Chukanov N.V., et al. Slyudyankaite, $\text{Na}_{28}\text{Ca}_4(\text{Si}_{24}\text{Al}_{24}\text{O}_{96})(\text{SO}_4)_6(\text{S}_6)_{1/3}(\text{CO}_2)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$, a new sodalite-group mineral from the Malo-Bystrinskoe lazurite deposit, Baikal Lake area // Amer. Mineral. 2023. Vol. 108. No. 9. P. 1805–1817.

Sapozhnikov A.N., Tauson V.L., Lipko S.V., et al. On the crystal chemistry of sulfur-rich lazurite, ideally $\text{Na}_7\text{Ca}(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})(\text{SO}_4)(\text{S}_3)\cdot n\text{H}_2\text{O}$ // Amer. Mineral. 2021. Vol. 106. No. 2. P. 226–234.

Shannon R.D. Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides // Acta Cryst. 1976. A32. P. 751–767.

Zito G., Hanson S.L. Genthelvite overgrowth on danalite cores from a pegmatite miarolitic cavity in Cheyenne Canyon, El Paso County, Colorado // Can. Miner. 2017. Vol. 55. No. 2. P. 195–206.

Статья поступила в редакцию 02.12.2024,
одобрена после рецензирования 12.03.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.834

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-106-112

СОПОСТАВЛЕНИЕ МЕТОДОВ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АТТРИБУТНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПРОГНОЗА ТОЛЩИН КОЛЛЕКТОРОВ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Юрий Петрович Ампилов¹, Карина Рауфовна Сафуанова², Ян Игоревич Штейн³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия; yury@ampilov.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3579-351X>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; safuanova1999@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/552892300/>

³ ООО «Арктический научно-проектный центр шельфовых разработок», Москва, Россия; yanshteyn@gmail.com, <https://istina.msu.ru/workers/5332121/>

Аннотация. Анализируются три основных метода прогноза эффективных толщин с помощью сейсмических атрибутов: линейная регрессия по данным полноволнового сейсмического моделирования, кокригинг величин «атрибут-скважина» и нейросетевой прогноз на основании группы атрибутов, «обученных» на скважинах. В качестве методического примера выбрана кора выветривания в доюрском комплексе Западной Сибири, поскольку при сравнительно небольшой ее мощности (от 0 до 50 м) отражения от кровли и подошвы не разделяются. Амплитудно-частотная характеристика данного интерференционного отражения зависит от толщины, и потому некоторые сейсмические атрибуты могут на это реагировать.

Дается анализ независимых результатов прогноза всеми тремя методами, их достоинств и недостатков. Все основные расчеты впервые выполнены с использованием отечественного программного обеспечения.

Ключевые слова: полноволновое моделирование, сейсморазведка, сейсмические атрибуты, геостатистика, нейросети, Западная Сибирь, доюрский комплекс

Для цитирования: Ампилов Ю.П., Сафуанова К.Р., Штейн Я.И. Сопоставление методов количественного атрибутного анализа для прогноза толщин коллекторов по сейсмическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 106–112.

COMPARISON OF QUANTITATIVE ATTRIBUTE ANALYSIS METHODS FOR FORECASTING RESERVOIR THICKNESSES BASED ON SEISMIC DATA

Yury P. Ampilov¹, Karina R. Safuanova², Yan I. Shtein³

¹ Lomonosov Moscow State University; Institute of Oil and Gas Problems RAS, Moscow, Russia; yury@ampilov.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0002-3579-351X>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; safuanova1999@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/552892300/>

³ Arctic Research and Design Center for Offshore Developments LLC, Moscow, Russia; yanshteyn@gmail.com, <https://istina.msu.ru/workers/5332121/>

Abstract. Three main methods for predicting effective thicknesses using seismic attributes are analyzed: linear regression based on full-wave seismic modeling data, cokriging of “attribute-well” values, neural network forecast based on a group of attributes “trained” on wells. The weathering crust in the Pre-Jurassic complex of Western Siberia was chosen as a methodological example, since with its relatively small capacity (from 0 to 50 meters) reflections from the roof and the sole are not separated. The amplitude-frequency response of this interference reflection depends on the thickness, and therefore some seismic attributes may react to this.

The analysis of independent forecast results by all three methods, their advantages and disadvantages is given. For the first time, all the basic calculations were performed using domestic software.

Keywords: full-wave modeling, seismic exploration, seismic attributes, geostatistics, neural networks, Western Siberia, pre-Jurassic complex

For citation: Ampilov Yu.P., Safuanova K.R., Shtein Ya.I. Comparison of quantitative attribute analysis methods for forecasting reservoir thicknesses based on seismic data. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 106–112. (In Russ.).

Введение. Основным нефтегазодобывающим регионом России с 1970-х годов является Западная Сибирь, на территории которой добывается свыше 80 % всего газа России и более половины объема добываемой нефти в стране. Однако все крупные месторождения здесь открыты и разрабатываются, и в последнее десятилетие наметился тренд на сниже-

ние добычи западносибирской нефти. Пополнение ресурсной базы здесь возможно, в основном, за счет трудноизвлекаемых запасов (ТРИЗ), как правило, из небольших месторождений. Их разведка сопряжена с большими методическими и технологическими трудностями в сравнении с обычными месторождениями углеводородов (УВ). Сейсморазведка, безус-

ловно, является основным геофизическим методом при их поисках и разведке, однако ее возможности для исследования глубокозалегающих ТРИЗ значительно ограничены в сравнении с традиционными продуктивными интервалами в меловой части разреза.

В данной статье предпринята попытка оценить интерпретационные возможности сейсморазведки для глубоких горизонтов Западной Сибири на основе последних достижений полноволнового моделирования [Ampilov, et al., 2024] совместно с последующим использованием современных интерпретационных технологий, включая элементы нейросетевого прогноза и искусственного интеллекта [Приезжев и др., 2022].

Для моделирования впервые используется расчет полной сейсмической волновой картины на основе метода спектральных элементов. Учитываются все типы волн, возникающих в трехмерной среде: продольные, поперечные, поверхностные, обменные, дифрагированные, в отличие от упрощенных сверточных и лучевых схем, применяемых в настоящее время и зачастую дающих результаты, приводящие к ошибочным выводам.

Методы количественной интерпретации динамики волн в сейсморазведке. Многие десятилетия от сейсморазведки требовался лишь структурный план основных горизонтов с приемлемой точностью, поскольку основой поисково-разведочного процесса было выявление антиклинальных поднятий с последующей заверкой их бурением. Однако в дальнейшем требуется искать более сложные литологически и тектонически экранированные ловушки небольшой мощности, что для классической сейсморазведки оказалось существенно более трудным делом. Появление в XX в. цифровой сейсмической записи с большим динамическим диапазоном открыло возможность изучать не только времена прихода волн и эффективные скорости в среде, но и измерять амплитуду сигнала и сопутствующие динамические характеристики. Понятно, что они были связаны со свойствами среды, но как определить эти свойства, т. е. решить обратную задачу? Появились различные теоретические работы на эту тему, но они не давали определенного ответа на вопрос, потому что накладываемые ограничивающие условия снижали адекватность получаемого решения по отношению к реальной геологической среде.

Качественные методы интерпретации динамики волн типа метода «яркого пятна», произведшие поначалу сенсацию в 1970-х годах и объявленные тогда некоторыми зарубежными компаниями поисковым признаком, быстро потеряли свою универсальность из-за неоднозначности толкования геологических причин, их вызвавших [Воскресенский, 2001].

Количественные методы в большинстве случаев сводились к вычислению динамических характеристик отраженного сейсмического сигнала во временных окнах различной длины (сейсмических

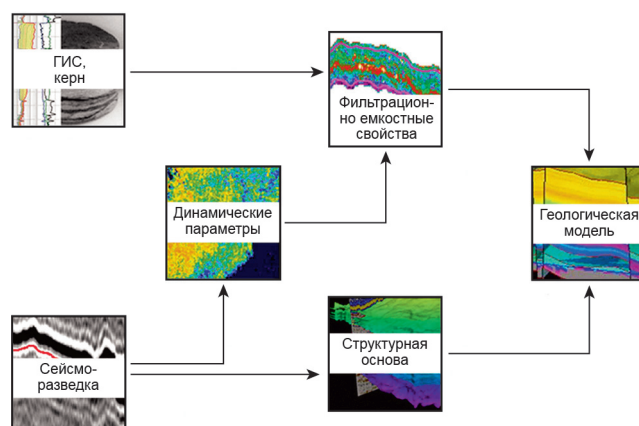


Рис. 1. Схема использования динамических характеристик сейсмических волн для прогноза ФЕС при построении цифровой геологической модели.

атрибутов в современной терминологии) и поиску эмпирических зависимостей между ними и фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) пород, измеренными в скважинах по данным керна и ГИС (пористость, эффективная толщина, насыщенность) [Ampilov, 2010]. В последующем полученные зависимости распространяются в межскважинное пространство, где известны только сейсмические данные (атрибуты). В благоприятных сейсмогеологических условиях это стало составным элементом построения цифровых геологических моделей (рис. 1).

Кроме этого, в более широком плане использовались рассчитываемые по динамике сейсмозаписи различные параметры поглощающих свойств среды [Ampilov, Oblogina, 1982; Ампилов, 1992].

К настоящему времени сложился определенный стереотип использования динамики сейсмических волн в количественной интерпретации через так называемые сейсмические инверсии. Они сводятся к нахождению различными методами акустических импедансов — произведения скорости распространения волн в породе на ее плотность [Ампилов и др., 2009], либо дополнительно скоростей продольных и поперечных волн в совокупности с плотностью при использовании методов синхронной инверсии [Яковлев и др., 2011].

Для получения математических решений в таких инверсиях делаются существенные допущения о среде, формах импульсов и т. п., в результате чего получают некоторые виртуальные величины указанных параметров. Однако и эти величины не связаны никакими уравнениями с ФЕС, а потому далее строят «кросс-плоты» между найденными импедансами и искомыми свойствами с нахождением регрессионных зависимостей, что является «эмпирическим» знанием, но никак не обосновано физическими законами. Таким образом, утрачивается прямая целесообразность проведения сложных инверсий, за которой так или иначе стоят те же самые атрибуты, рассчитанные по той же сейсмозаписи. Вместо того, чтобы достичь результата в два этапа: «Сейсмозапись (атрибуты) → инверсия → ФЕС» имеет смысл

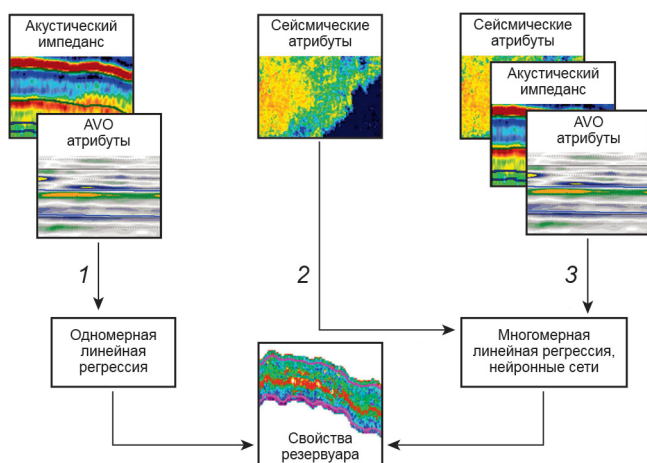


Рис. 2. Различные схемы атрибутного анализа для прогноза свойств резервуара в межскважинном пространстве

попытаться сделать это в один этап «Атрибуты → ФЕС», а также использовать комбинированный способ, когда наравне с формальными атрибутами сейсмозаписи дополнительно используются найденные через инверсии значения импедансов (рис. 2). Поэтому в дальнейшем мы пойдем по среднему пути, не прибегая к методам инверсии, которыми много пользовались ранее в других проектах и регионах [Ампилов и др., 2011].

В качестве геологической задачи возьмем прогноз мощности коры выветривания (КВ) в межскважинном пространстве по данным 3D сейсморазведки для доюрского комплекса (ДЮК) Западной Сибири.

В пределах исследуемого района вертикальная разрешающая способность сейсморазведки применительно к КВ оценивается в 50–60 м. То есть, при значениях мощности коры выветривания меньше 60 м, от кровли и подошвы формируется единое отражение, называемое в зарубежной литературе тюнинг-эффектом.

Попробуем построить прогнозную карту мощности коры выветривания в пределах съемки 3D тремя способами:

- 1 — использование полученной в результате полномасштабного моделирования зависимости мощности КВ от значения сейсмических атрибутов;
- 2 — расчет мощности КВ с использованием геостатистических методов;
- 3 — прогноз мощности КВ в межскважинном пространстве при помощи нейронных сетей.

Оценка толщины коры выветривания на основе отдельных сейсмических атрибутов с учетом полномасштабного моделирования. Данному исследованию посвящена отдельная статья [Ампилов и др., 2025], поэтому здесь ограничимся его краткими результатами, исключительно в целях сравнения с другими методами решения поставленной геологической задачи.

Для изучения зависимости значений атрибутов от мощности КВ было выполнено полномасштабное моделирование сейсмограмм [Ампилов и др., 2024]

с длиной расстановки до 6000 м для нескольких значений мощности в интервале от 5 до 50 м. Затем была проведена обработка полученных синтетических сейсмограмм по стандартному графу, результатом которой стали суммотрассы временного разреза. По ним рассчитывались всевозможные сейсмические атрибуты, наиболее информативным из которых по отношению к толщине коры выветривания оказался атрибут Envelope (оглабающая). На графике (рис. 3) можно наблюдать близкую к линейной зависимость значения этого атрибута от мощности КВ.

Наиболее близкой аппроксимирующей линейной зависимостью в данном случае оказалась следующая: $h(x) = -2338,6x + 956,96$, где h — значение мощности коры выветривания, x — значение атрибута. Квадрат коэффициента корреляции практически равен единице $R^2 = 0,9911$, что действительно говорит о возможности такой аппроксимации.

Далее была рассчитана карта первого атрибута в указанном интервале вдоль отражающего горизонта, связанного с КВ. По найденной выше эмпирической зависимости она была пересчитана в карту мощностей коры выветривания на исследуемом участке. Предварительно потребовалось произвести нормировку атрибута, чтобы он по средним значениям совпадал с таковым на синтетических суммотрассах. Без этой процедуры значения данного атрибута могут оказаться произвольными и зависеть от уровня усиления записи на суммарной сейсмограмме, определяющейся процедурами обработки.

Расчет мощности коры выветривания с использованием геостатистических методов. Традиционные методы регрессии используют только один набор данных и не используют существующие пространственные корреляции между контрольными точками вторичного набора данных и оцениваемого первичного атрибута. В контексте данного исследования мы имеем несколько наборов данных. С одной стороны, это данные по скважинам, известные по довольно редкой сети, а с другой — сейсмические данные 3D, которые покрывают всю изучаемую площадь. И если в первом наборе есть измерения искомым величины (мощности КВ), то во втором их нет, но в них как-то отражается искомое свойство, и мы точно не знаем как именно. Наиболее подходящей процедурой для этого в геостатистике, по нашему мнению, является кокригинг. Методы кокригинга используются для того, чтобы воспользоваться преимуществами ковариации между двумя или более наборами данных, которые связаны между собой [Дюбрул, 2002].

Кокригинг является расширением метода обычного кригинга, который широко используется в геостатистике для пространственной интерполяции и прогнозирования значений переменных на основе данных, собранных в соседних точках. Кокригинг, в отличие от кригинга, при моделировании использует не только точки, в которых измерена моделирующая характеристика, но еще и точки, в которых

измерена другая характеристика, коррелирующая с моделируемой. Использование кокригинга оправдано в тех случаях, когда непосредственное измерение моделируемой характеристики с необходимой плотностью является невозможным или слишком дорогостоящим при возможности дешевого измерения другой характеристики, коррелирующей с моделируемой. Также этот метод подходит, когда основной интересующий атрибут (данные по скважинам) является недостаточным, но связанная вторичная информация (данные сейсморазведки, рассчитанные карты атрибутов и т. д.) имеется в большом количестве. Это особенно полезно, когда данные о первичной переменной не являются точными или когда есть необходимость учесть влияние других факторов на прогнозируемое значение.

В рамках данного исследования этот метод может оказаться весьма полезным, поскольку, помимо скважинных данных, содержащих в себе информацию о мощности КВ, имеются еще карты информативных атрибутов. При задании настроек кокригинга в качестве первичной переменной были использованы мощности КВ в точках скважин, вторичной переменной — карта атрибута Envelope, уже использованного ранее и показавшего наилучшие результаты при моделировании.

В процессе данных построений тестировались т.н. коэффициенты «предпочтения», регулирующие степень влияния на итоговый результат первичной (данные по скважинам) и вторичной (сейсмический атрибут) переменной. На рис. 4 приведены карты прогнозных толщин КВ при нескольких значениях данного коэффициента. Видно, что, начиная с коэффициента $-0,5$ картина слева направо практически не меняется.

Далее из расчетов было удалено примерно 20 % скважин, которые не участвовали в процедуре кокригинга, а выполняли функцию контрольных для сопоставления прогнозных и фактических значений КВ.

После серии численных экспериментов с различными вариограммами и коэффициентами было решено остановиться на коэффициенте $-0,5$ при вариограмме 1000 м. С этими параметрами получалось наилучшее совпадение прогнозных и фактических значений мощности КВ в контрольных скважинах со среднеквадратическим отклонением около 8 м.

Сравнивая итоговую карту, построенную методом кокригинга (рис. 5, б), с картой по первому методу полноволнового моделирования (рис. 5, а), можно утверждать, что она более контрастная по значениям толщины КВ. Это может быть связано с особенностями алгоритма кокригинга, который не предполагает изначально ограничений в линейной аппроксимации регрессионной зависимости. Но, тем не менее, зоны с повышенными значениями мощности КВ прослеживаются на обеих картах, и на качественном уровне картина похожа.

Прогноз мощности коры выветривания в межскважинном пространстве при помощи нейрон-

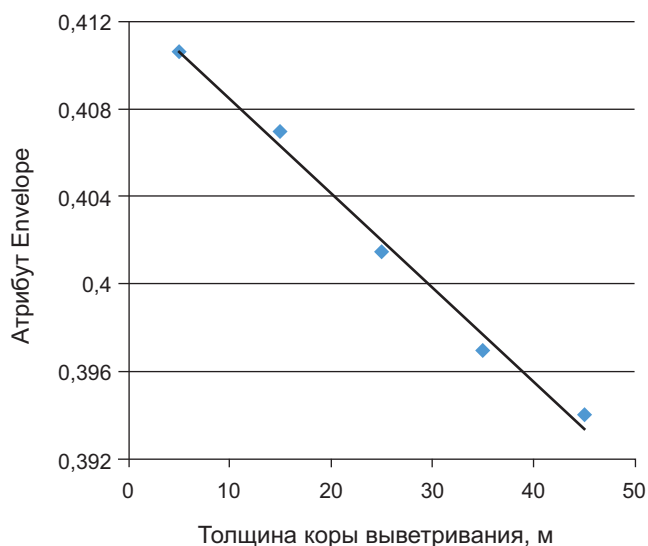


Рис. 3. Зависимость атрибута Envelope, рассчитанного по синтетическим суммотрассам (после суммирования по ОСТ) от толщины коры выветривания в кровле ДЮК

ных сетей. Нейросети находят широкое применение в сейсморазведке, решая задачи классификации и распознавания образов, аппроксимации функций, прогнозирования и оптимизации. Они помогают в редакции сейсмических трасс, корреляции первых вступлений, восстановлении промыслово-геофизических кривых, классификации сейсмических данных и преобразовании сейсмических атрибутов в петрофизические параметры. Эти технологии позволяют повысить точность и эффективность интерпретации сейсмических данных, что особенно важно при определении свойств резервуаров.

В России технологии использования нейронных сетей в геофизике эпизодически применяются, причем с недавнего времени и на основе отечественных программных решений [Приезжев и др., 2022].

Одной из задач, решаемых нейронными сетями, является задача регрессии, заключающаяся в предсказании числового значения на основе входных данных. В регрессии нейронные сети обучаются на наборе данных, содержащем пары входных и выходных значений, и пытаются найти функцию, которая наилучшим образом аппроксимирует эту зависимость.

Цель обучения нейронной сети в задаче регрессии — минимизировать ошибку между предсказанными и истинными значениями.

В контексте данного исследования нейросети использовались для прогноза мощности КВ на изучаемом участке с применением новейшего отечественного программного комплекса IPlab.

При использовании сейсмических атрибутов данный алгоритм будет работать следующим образом.

1. Выделяются значения этих атрибутов в точках скважин.

2. Значения прогнозного параметра, в данном случае мощности КВ, привязываются к значениям сейсмических атрибутов в точках пересечения дан-

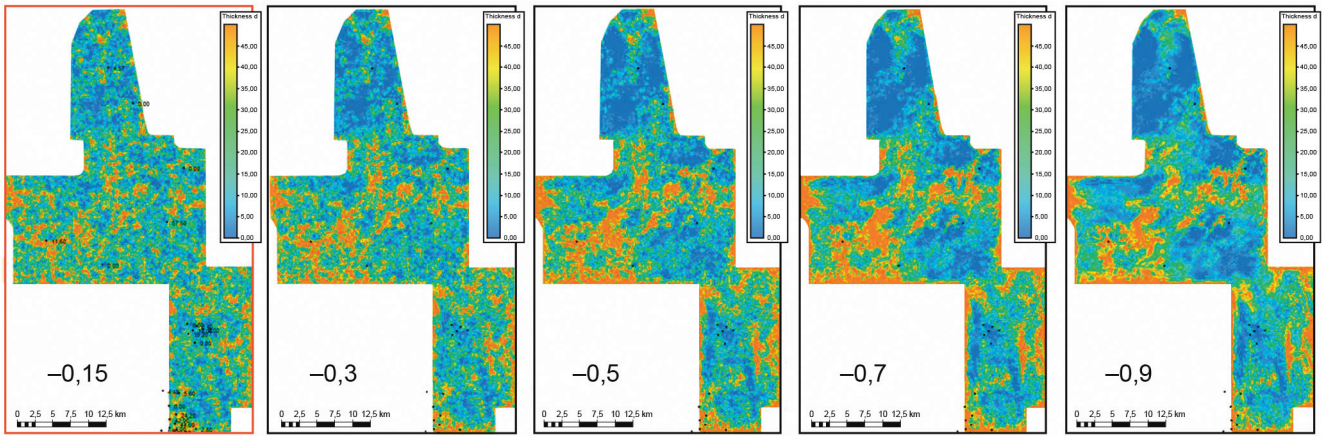


Рис. 4. Прогнозные карты толщин коры выветривания при различных регулирующих коэффициентах

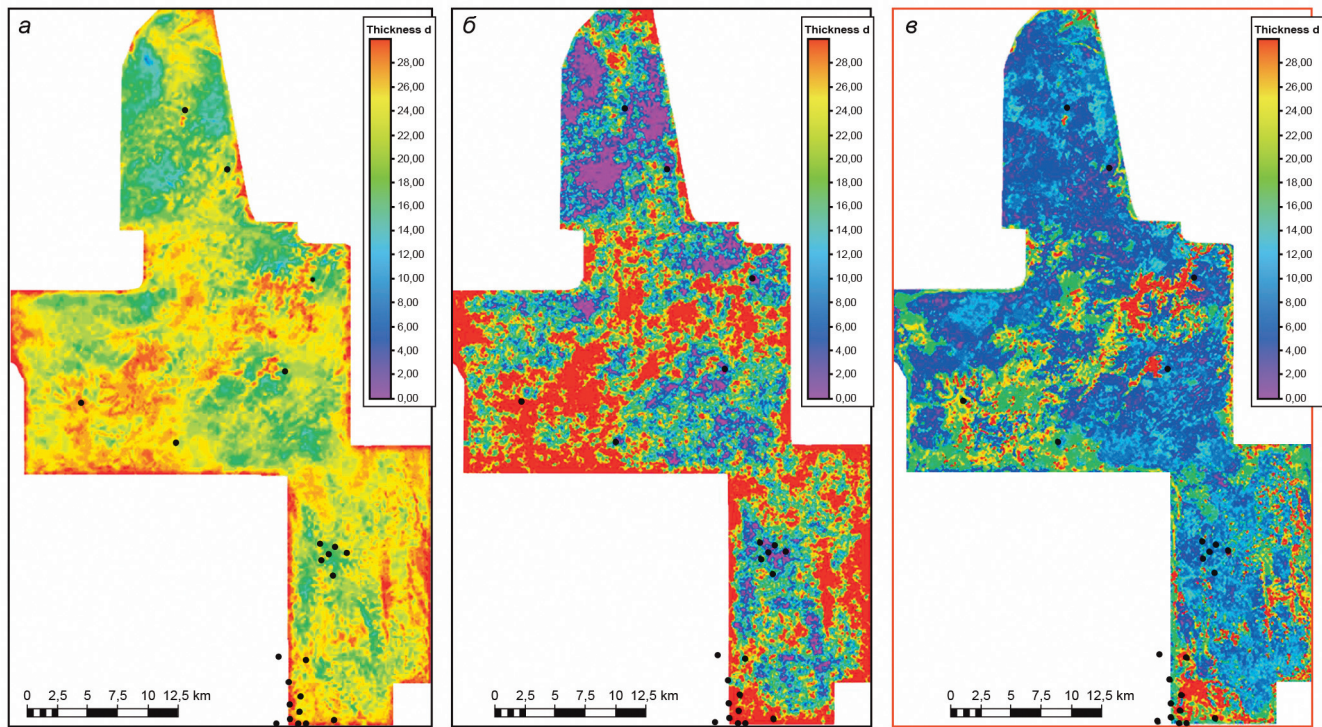


Рис. 5. Сопоставление прогнозных карт мощности коры выветривания по трем методам: а — по линейной зависимости «атрибут-мощность», полученной из полноволнового моделирования; б — с использованием кокригинга; в — по нейросетевому прогнозу

ных, так как отобранный атрибут предположительно имеет связь с мощностью коры выветривания.

3. Далее, перебирая значения мощности КВ на определенном участке, используется сеть Кохонена, которая устанавливает какая мощность КВ может быть в данной точке с учетом привязанных прогнозных данных, имеющих схожие значения атрибутов. Данное сравнение осуществляется по следующей формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_{e_i}^2}{n}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_i^2}{n}},$$

где A_e — значения атрибутов в точках скважин, A_i — значения атрибутов в заданной точке, n — количество используемых атрибутов.

4. В зависимости от заданного параметра количества скважин (Nearest neighbor number), на выходе с использованием метода ближайшего соседа будут определяться веса влияния прогнозных данных на эту конкретную область.
5. И учитывая полученные веса и меру близости скважин от прогнозируемых данных, будет рассчитываться прогнозируемая эффективная мощность:

$$H_{\text{eff}_p} = \sum_{i=1}^k \frac{H_{\text{eff}_w_k}}{P},$$

где H_{eff_w} — эффективная мощность коры выветривания, определенная в скважине, P — мера близости.

Важным моментом в задаче регрессии является оценка достоверности прогноза искомой величины.

В данном случае это степень близости полученной модели распределения мощности коры выветривания измеренным данным в точках скважин. Здесь для этих целей применялась перекрестная проверка (кросс-валидация) — наиболее распространенный метод при машинном обучении с использованием нейросетей. При этом данные разбиваются на несколько групп, называемых фолдами или выборками валидации. Затем модель обучается на одной группе и тестируется на остальных. Этот процесс повторяется k раз, пока каждый фолд не используется в качестве тестового набора. Это позволяет оценить производительность модели на разных данных и уменьшить влияние случайной вариации.

Преимущества кросс-валидации:

- Оценка обобщающей способности. Кросс-валидация позволяет получить более точные оценки производительности модели, чем использование одного разделения на обучающий и тестовый наборы данных. Это особенно важно, когда требуется оценить производительность модели на новых данных [Вапник, Червоненкис, 1974].

- Устойчивость к выбору данных. Кросс-валидация уменьшает вероятность того, что оценка производительности модели будет зависеть от конкретного разделения данных на тестовую и тренировочную выборки [Воронцов, 2004].

- Использование всех данных для обучения и тестирования. Каждый образец данных используется как для обучения, так и для тестирования, что позволяет использовать данные максимально эффективно.

Метод кросс-валидации является важным инструментом для оценки производительности модели и выбора ее оптимальных параметров. Он эффективно использует имеющиеся данные, обеспечивая более точные и статистически значимые оценки производительности моделей по сравнению с простым разделением на обучающий и тестовый наборы.

С помощью упомянутых выше алгоритмов нейросетей был также выполнен третий вид прогноза мощности КВ на участке исследований 3D. В качестве входных данных были использованы значения толщин КВ в точках скважин и цифровые массивы восьми атрибутов: D_2 (вторая производная), RMS Amplitude, Sweetness, Envelope, Attenuation, Instantaneous Frequency, Dominant Frequency, Bandwidth.

По результатам корреляционного анализа было выяснено, что наибольшим коэффициентом корреляции с мощностью КВ имеет также атрибут Envelope ($k = -0,52$), использованный нами и в других методах прогноза. В ходе расчета была проведена кросс-валидация, в ходе которой из обучающей выборки поочередно отбрасывалось 30 % значений на каждой итерации обучения. Всего выполнено 50 итераций. Полученная прогнозная карта изображена на рис. 5, в.

Сравнивая карты, полученные тремя способами, можно утверждать, что на качественном уровне кар-

Т а б л и ц а

Сопоставление прогнозных значений КВ по данным 3D сейсмоки с фактическими в контрольных скважинах по разным методам

Номер скважины	Мощность КВ в скважине, м	Прогноз «модель»	Прогноз «кокригинг»	Прогноз «нейросети»
19	8,8	22,0	3,7	9,0
13	0	20,0	10,7	7,4
7	11,6	28,3	22,0	21,3
11	9,6	24,0	19,0	18,2
22	24,2	27,0	21,5	33,0
Коэффициент корреляции		0,76	0,57	0,93
Среднеквадратическое отклонение, м		14,6	8,3	7,8

тина совпадает, и это может свидетельствовать об относительной достоверности прогноза. Обращает на себя внимание тот момент, что контрастность прогнозных карт слева направо возрастает, т. е. увеличивается диапазон значений мощностей КВ. Понятно, что простая линейная аппроксимация в первом методе не в состоянии детализировать прогноз при существенном разбросе значений, в то время как при нейросетевом прогнозе линейных ограничений нет.

В таблице сведены фактические и прогнозные значения толщин КВ в пяти скважинах, которые были контрольными в методе ко-кригинга и не участвовали в обучении, равно как и в линейной аппроксимации в первом методе. В то же время в методе перекрестной проверки нейросетевого прогноза они использовались, входя поочередно то в обучающую, то в контрольную выборку.

Из таблицы следует, что наименьшие отклонения имеют значения на последней «нейросетевой» карте, в то время как наибольшие — на первой, при этом коэффициент корреляции между прогнозными и фактическими значениями в первом методе заметно больше, чем в кокригинге, что в свете изложенного вполне закономерно.

Выводы. В ходе данного исследования были опробованы современные альтернативные методы прогноза фильтрационно-емкостных свойств по данным 3D сейсморазведки на примере мощности коры выветривания в доюрском комплексе Западной Сибири, среди которых:

- 1) линейная регрессия на данных полноволнового сейсмического моделирования,
- 2) кокригинг величин «атрибут-скважина»,
- 3) нейросетевой прогноз на основании группы атрибутов, «обученных» на скважинах.

Каждый из методов имеет свои преимущества и недостатки в различных сейсмогеологических условиях. При решении конкретной геологической задачи в данном исследовании, когда толщина КВ сильно изменчива по латерали в очень широком

диапазоне от 0 до 60 м, наилучшие результаты показал нейросетевой прогноз. При более умеренных изменениях свойств среды другие методы также могут давать приемлемые результаты.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ученым кафедры вычислительной механики мехмата МГУ имени М.В. Ломоносова В.А. Левину,

А.В. Вершинину и К.А. Петровскому за помощь в организации полномасштабного моделирования на разработанном ими отечественном ПО «Фидесис». Кроме того, авторы благодарны разработчикам ПО “IPlab” И.И. Приезжеву и А.А. Трофимуку за помощь и консультации при проведении нейросетевых расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ампилов Ю.П. Поглощение и рассеяние сейсмических волн в неоднородных средах. М.: Недра, 1992. 160 с.

Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В. Роль сейсмической инверсии в геологическом моделировании морских газовых месторождений. // Газовая промышленность. 2011. № 12. С. 69–74.

Ампилов Ю.П., Барков А.Ю., Яковлев И.В. и др. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3–16.

Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Кунченко Д.С. и др. Прогноз мощности тонких пластов с использованием сейсмического полномасштабного моделирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 1. С. 97–104.

Ампилов Ю.П., Вершинин А.В., Левин В.А. и др. Полномасштабное моделирование в сейсморазведке на основе цифровой геологической модели с использованием метода спектральных элементов // Геология и геофизика, издательство СО РАН. 2024. Т. 65, № 10. С. 1435–1445.

Вапник В. Н, Червоненкис А. Я. Теория распознавания образов. М.: Наука, 1974. 416 с.

Воронцов К.В. Комбинаторный подход к оценке качества обучаемых алгоритмов // Математические вопросы кибернетики. 2004. № 13. С. 5–36.

Воскресенский Ю.Н. Изучение изменений амплитуд сейсмических отражений для поисков и разведки залежей

углеводородов: Учебное пособие для вузов. М.: РГУ нефти и газа, 2001. 68 с.

Дюбрул О. Использование геостатистики для включения в геологическую модель сейсмических данных / Пер. с англ. Е.В. Ковалевский. EAGE. Zeist, 2002. 296 с.

Приезжев И.И., Осипенко Р.С., Боровкова Е.Е., Петренко Е.Н. Пример использования нейронных сетей Колмогорова при прогнозировании свойств пласта покурской свиты в Западной Сибири // Геофизика. 2022. № 1. С. 57–63.

Яковлев И.В., Ампилов Ю.П., Филиппова К.Е. Почти все о сейсмической инверсии. Часть 2 // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15.

Ampilov Yu.P From Seismic interpretation to modelling and assessment of oil and gas fields // EAGE Publ. 2010. P. 1–274.

Ampilov Yu.P, Vershinin A.V., Levin V.A., et al. Full-Waveform Seismic Modeling Based on Digital Geological Model Using Spectral Element Method: Applications to Seismic Exploration // Russian Geology and Geophysics. 2024. 65 (10): 1220–1228.

Ampilov Yu.P, Oblogina T.I. A Method for Evaluating the Attenuation from Refraction Data // Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Fizika Zemli. 1982. Issue 10. P. 31–41.

Статья поступила в редакцию 21.08.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-113-116

РЕЗУЛЬТАТЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН НА МОРСКИХ СЛАБО КОНСОЛИДИРОВАННЫХ ОСАДКАХ БЕЛОГО МОРЯ

Анна Сергеевна Дернова¹✉, Александр Николаевич Ошкин²,
Анастасия Сергеевна Пирогова³

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; azya98@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4269-0348>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; a.oshkain@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8610-8677>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; anastasya.pir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3619-7656>

Аннотация. Оценка упругих свойств донных осадков необходима для изучения инженерно-геологических условий акватории. Одним из способов получения упругих свойств осадков являются ультразвуковые исследования. В июне 2024 г. в губе Ругозерской Канда拉克шского залива Белого моря были проведены ультразвуковые исследования на образцах слабо консолидированных донных осадков, представленных илами и глинами различного минерального состава. Отбор проб был выполнен при помощи гравитационной трубы на 11 станциях, предварительно выбранных по результатам анализа сейсмоакустических профилей. Всего было отобрано 25 проб (трубок), глубина отбора составила от 0,2 до 2 м. На 88 образцах из отобранных трубок были выполнены измерения скоростей продольных и поперечных волн ультразвуковым методом. Определение скорости продольной волны проводилось по времени первых вступлений при фиксированной базе измерения (длине исследуемого образца), поперечной — по годографу прямой поперечной волны на сейсмограмме, получаемой за счет изменения базы измерений. Ультразвуковые исследования выполнялись с помощью пьезокерамических датчиков продольной и поперечной волн частотой 60 кГц и 100 кГц соответственно. Полученные в результате исследования скорости поперечных волн в осадках, представленных глинами и илами, составили от 10 до 40 м/с, продольных волн — от 1000 до 1800 м/с.

Ключевые слова: слабо консолидированные осадки, скорости продольных волн, скорости поперечных волн, УЗИ, Канда拉克шский залив, Белое море

Для цитирования: Дернова А.С., Ошкин А.Н., Пирогова А.С. Результаты ультразвуковых измерений скоростей продольных и поперечных волн на морских слабо консолидированных осадках Белого моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 113–116.

THE RESULTS OF ULTRASONIC MEASUREMENTS OF COMPRESSIONAL AND SHEAR WAVE VELOCITIES IN POORLY CONSOLIDATED MARINE SEDIMENTS OF THE WHITE SEA

Anna S. Dernova¹✉, Alexander N. Oshkin², Anastasiya S. Pirogova³

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; azya98@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-4269-0348>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a.oshkin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8610-8677>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; anastasya.pir@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3619-7656>

Abstract. Assessment of the elastic properties of bottom sediments is necessary for studying the engineering-geological conditions of the investigated water area. One of the methods for obtaining the elastic properties of sediments is ultrasonic research. In June 2024, ultrasonic studies were conducted on samples of poorly consolidated bottom sediments, represented by silts and clays of various mineral compositions, in Rugozerskaya Bay of the Kandalaksha Gulf in the White Sea. Sampling was carried out using a gravity corer at 11 stations, preliminarily selected based on the analysis of seismic-acoustic profiles. A total of 25 samples (cores) were collected, with sampling depths ranging from 0.2 to 2 meters. Ultrasonic measurements of compressional and shear wave velocities were performed on 88 samples from the collected cores. The compressional wave velocity was determined based on the first arrival times at a fixed measurement base (length of the sample), while the shear wave velocity was determined using the travel-time curve of the direct shear wave on the seismogram obtained by varying the measurement base. Ultrasonic studies were conducted using piezoelectric ceramic transducers for compressional and shear waves with frequencies of 60 kHz and 100 kHz, respectively. The resulting shear wave velocities in the sediments, represented by clays and silts, ranged from 10 to 40 m/s, while compressional wave velocities ranged from 1000 to 1800 m/s.

Keywords: poorly consolidated sediment, compressional wave velocity, shear wave velocity, ultrasound, the Kandalaksha Bay, the White Sea

For citation: Dernova A.S., Oshkin A.N., Pirogova A.S. The results of ultrasonic measurements of compressional and shear wave velocities in poorly consolidated marine sediments of the White Sea. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 113–116. (In Russ.).

Введение. Необходимость в изучении упругих свойств слабо консолидированных осадков, слагающих морское дно и придонную часть разреза, связана с активным освоением шельфовых месторождений в настоящее время. Морские слабо консолидированные осадки из-за малого гидро- и литостатического давления обладают высокой пористостью (от 50 до 70 %) и низким сдвиговым сопротивлением (десятки кПа), что необходимо учитывать при строительстве и проектировании инженерных конструкций на шельфе.

В работе представлены результаты ультразвуковых исследований (УЗИ) образцов слабо консолидированных осадков, отобранных на полигоне в губе Ругозерская Кандалакшского залива Белого моря в июне 2024 г.

Ультразвуковые исследования на слабо консолидированных осадках проводятся достаточно редко из-за технических сложностей таких измерений. В целях ознакомления с существующими методиками УЗ исследований слабо консолидированных осадков, а также определить ожидаемый диапазон измеряемых значений был проведен краткий обзор существующего мирового опыта.

Так, в работе [Zimmer, et al., 2007] исследуется проблема зависимости сейсмических скоростей от давления в неконсолидированных песках. Авторы провели измерения скоростей продольных и поперечных волн при давлении, изменяющимся от 0,1 до 20 МПа. Были использованы семь различных по текстуре типов кварцевого песка, состоящего преимущественно из кварца, плагиоклаза и КППШ. Из них были подготовлены сухие и полностью водонасыщенные образцы диаметром 3,81 см и длиной 3–5 см. В зависимости от прилагаемого давления пористость образцов изменялась от 36 до 40 %. Скорости распространения продольных и поперечных волн измерялись с помощью пьезоэлектрических датчиков частотой 200 кГц. В зависимости от давления (от 0,1 до 20 МПа) скорости распространения поперечных волн в насыщенных образцах изменялись от 200 до 1000 м/с.

В работе [Ojha, Sain, 2014] исследуются корреляции значений скорости продольных волн и пористости водонасыщенных осадков по данным ГИС в скважине, глубина моря в месте расположения которой составляет 2663 м. Исследуемые породы имеют пористость от 40 до 80 %, полученные в результате проведения акустического каротажа скорости распространения продольных волн в таких породах составляют от 1500 до 2000 м/с.

В работе [Horn, 1980] приводятся результаты лабораторных экспериментов по исследованию распространения поперечных волн в слабо консолидированных песках с использованием пьезоке-

рамических датчиков на частотах 517 кГц и 1,5 кГц. Пористость водонасыщенных образцов пляжного песка изменялась от 25 до 50 %, скорость поперечных волн — от 35 до 63 м/с.

В работе [Richardson, et al., 1991] приводятся оценки упругих свойств слабо консолидированных морских осадков, полученные с помощью подводных зондов. Скорость поперечных волн измерялась с шагом 10 см до глубины 2 м от дна на частотах от 200 до 2000 Гц. Было исследовано четыре группы разнотипных осадков, залегающих на разной глубине: илы с глинистыми частицами, переслаивание мелкозернистых песков и илистых глин, хорошо сортированные мелкозернистые плотноупакованные пески, высокопористые глины. Скорость поперечных волн в первой группе возрастала от 20 до 50 м/с с увеличением глубины, во второй — от 30 до 60 м/с (со значениями до 113 м/с в песках), в третьей группе скорость около дна составляла 56–100 м/с, а в четвертой скорость поперечных волн возрастала от 25 до 50 м/с. Авторы сделали вывод о том, что скорость поперечных волн увеличивается с глубиной, увеличением размера частиц в осадке и с уменьшением пористости.

В работе [Richardson, 2002] исследуются различные наборы данных, от мягких низкопористых илов до хорошо-сортированных песков, скорости в которых были получены с помощью подводных зондов. Глубина залегания осадка составляла от 10 до 30 см, измерения проводились на частоте от 70 до 2000 Гц. Скорость поперечных волн увеличивалась с глубиной и принимала значения от 50 до 150 м/с при пористости от 30 до 75 %. Авторы сделали вывод о том, что скорость поперечных волн увеличивается с увеличением глубины, уменьшением пористости и увеличением плотности.

В рассмотренных статьях авторы оценивали значения скоростей продольных и поперечных волн. Исследования проводились в широком диапазоне частот, от 70 Гц до 200 кГц. Пористость исследуемых осадков была в диапазоне от 25 до 80 %. Скорость продольных волн изменялась от 1500 до 2250 м/с, поперечных — от 20 до 1000 м/с. Такой большой разброс значений предположительно связан с различной глубиной отбора проб, их составом, текстурой и степенью консолидации. Наиболее часто используемые датчики — керамические датчики с пьезоэлементами, однако выбор аппаратуры зачастую обуславливался условиями проведения исследований.

Осадки, отобранные на Белом море, характеризуются пористостью от 45 до 70 %, глубина воды в местах отбора проб достигает 20 м, следовательно, суммарное давление составляло до 0,3 МПа. С учетом небольших глубин отбора проб, относительно

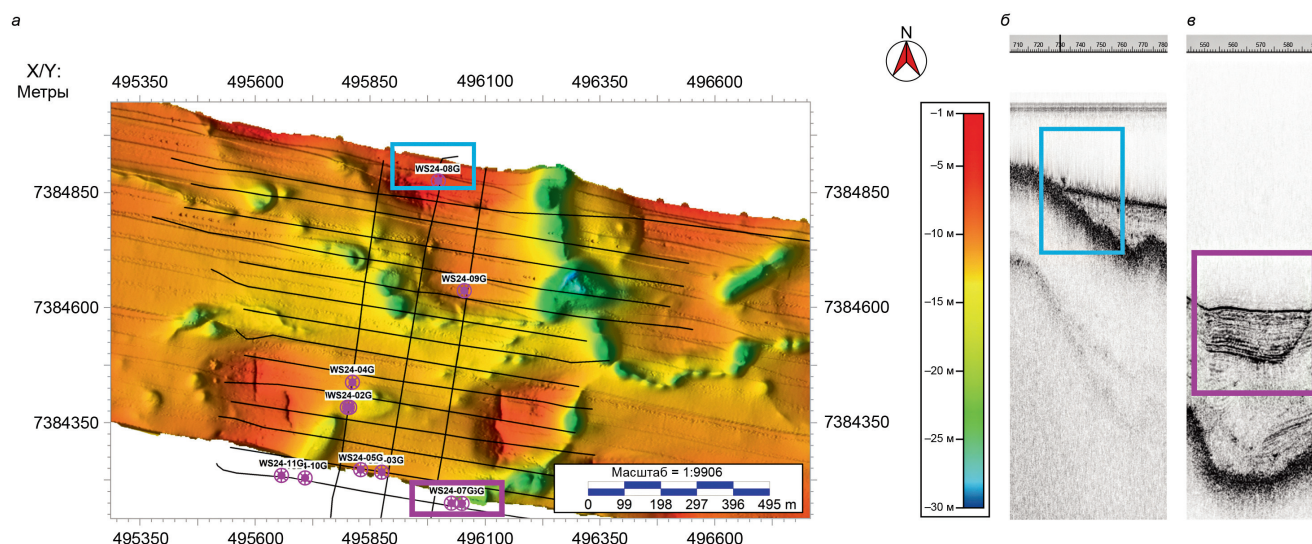


Рис. 1. Расположение профилей акустического профилирования (АПр) и станций геологического пробоотбора (а). Положение профилей и станций показано на карте батиметрии; б, в — наиболее интересные объекты на данных АПр, WS24-08G и WS24-06G, выклинивания и «врезы»

небольшой мощности водной толщи, а также высокой пористости значения скоростей поперечных волн в отобранных осадках ожидаются не более 100–200 м/с.

Пробоотбор. В рамках подготовки к пробоотбору было проведено акустическое профилирование на полигоне в губе Ругозерской Канда拉克шского залива Белого моря. Было пройдено 14 продольных и 3 поперечных профиля (рис. 1, а). Наиболее интересными объектами для пробоотбора были выклинивания придонных слоев и придонные врезы, представленные на рис. 1, б и в соответственно, а также газовые аномалии. Таким образом, было выбрано 11 станций.

Пробоотбор выполнялся при помощи гравитационной трубы длиной 2 м, координаты сброса и касания фиксировались для уточнения места отбора пробы. Поднятую гравитационную трубу вскрывали, доставали содержащую отобранную пробу трубку-вкладыш и меняли ее на пустую. На каждой из 11 станций было отобрано по две трубки, а на трех (WS24-01G, WS24-10G, WS24-11G) — по три, для дополнительных исследований, в частности томографии. Каждая из 11 уникальных трубок была вскрыта на берегу и описана. 14 других трубок были герметично упакованы и отправлены в МГУ, где для каждой из них, было выполнено литологическое описание, а также отбор образцов для лабораторных исследований: определение минерального и гранулометрического составов, измерение плотности, пористости, проведение пиролитического анализа.

Проведение УЗИ и обработка данных. На этапе литологического описания трубок было отобрано 88 образцов. Для каждого из них проводилось измерение скоростей распространения продольной и поперечных волн. Длина образца измерялась штангенциркулем с точностью до 0,1 мм. На первом этапе на образцах измерялась скорость продоль-

ной волны. Образец помещался между датчиками р-волн, имеющими частоты 60 кГц. Результатом становилась записанная трасса, на которой четко видно первое вступление продольной прямой волны. Далее образец помещался между датчиками s-волн с частотой 100 кГц, к которым были прикреплены тонкие пластилиновые пластины. Далее следовала серия измерений с переменной базой, результатом которых являлась сейсмограмма с достаточным S/N для выявления сигнала s-волны.

После проведения всех измерений была выполнена обработка полученных данных. Были выполнены пикировки времен первых вступлений для р-волн и времен первого перехода через ноль для s-волн по всем трассам после суммирования. Переход через ноль был выбран для пикировки вместо первого вступления из-за большей четкости.

Результаты и выводы. Согласно результатам литологического описания трубок более половины всех образцов (53 %) относятся к глинам, 15 % — к глинам с содержанием алеврита менее 5 %, 6 % — к глинам алевритистым (содержание алеврита 5–10 %), 5 % — к глинам гидротроилитовым, и по 2 % — к глинам с незначительным содержанием алевритового материала и к илу глинистому. Изучаемые донные осадки относятся к неплотным и слабо консолидированным и характеризуются пористостью 50–70 %.

В результате обработки данных УЗИ были получены значения скоростей распространения продольных и поперечных волн на частоте 60 и 100 кГц, соответственно (рис. 2).

Для изучаемых донных осадков скорости поперечных волн составляют от 10 до 40 м/с, продольных — от 1000 до 1800 м/с, что в целом согласуется с имеющимися представлениями об упругих свойствах для слабо консолидированных осадков [Zimmer, et al., 2007; Horn, 1980; Ojha, 2014; Richardson, et al., 1991; Richardson, 2002].

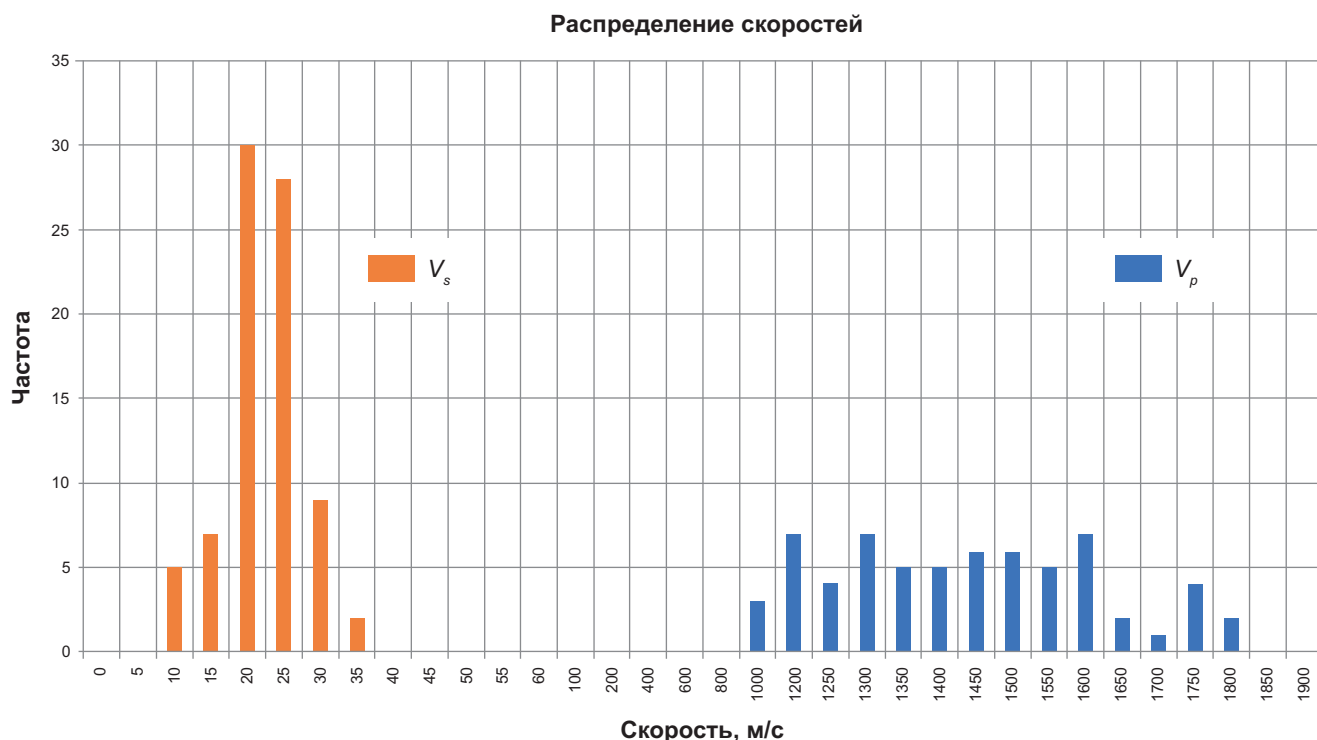


Рис. 2. Гистограммы распределения скоростей в слабо консолидированных осадках, полученные в результате УЗИ. Оранжевым цветом — скорости поперечных волн (V_s), синим — продольных (V_p)

Близость плотных моренных отложений к поверхности дна повлияла на результаты опробования на станции, расположенной на участке выклинивания придонных слоев: вскрытые трубкой осадки маломощны и не отличаются от осадков, полученных на других станциях (рис. 1, б). Осадки, вскрытые на станции WS24-06G, приуроченной ко врезу (рис. 1, в), преимущественно представлены гидротроилитовыми глинами, которые по минералогическому составу незначительно отличаются от проб с других станций.

Стоит отметить, что полученные по результатам УЗИ скорости в среднем выше, чем скорости, оце-

ненные по данным сейсмоакустических исследований в Кандалакшском заливе. По данным предыдущих сейсмоакустических исследований скорость продольных волн оценивается в диапазоне от 1350 до 1450 м/с. По всей видимости, различие связано с дисперсией скоростей и с большей детальностью УЗ исследований.

Полученные оценки скоростей не коррелируют с петрофизическими параметрами изучаемых осадков, такими как пористость. Вероятно, это связано с небольшой глубиной отбора проб (до 2 м от дна) и достаточно однородным составом отбираемого осадка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Horn I.W. Some e laboratory experiments on shear wave propagation in unconsolidated sands // *Marine Geotechnol.* 1980. 4: 1. P. 31–54.

Ojha M., Sain K. Velocity-Porosity and Velocity-Density Relationship for Shallow Sediments in the Kerala-Konkan Basin of Western Indian Margin // *Journal of the Geological Society of India*. 2014. Vol. 84. P. 187–191.

Richardson M.D. Variability of shear wave speed and attenuation in surficial marine sediments, impact of littoral

environmental variability on acoustic predictions and sonar performance. 2002. P. 107–114.

Richardson M.D., Muzi E., Miaschi B., Turgutcan F. Shear wave velocity gradients in near-surface marine sediment. *Shear Waves in Marine Sediments* / Eds. J.M. Hovem, et al. 1991. P. 295–304.

Zimmer M.A., Prasad M., Mavko G., Nur A. Seismic velocities of unconsolidated sands: Part 1 — Pressure trends from 0.1 to 20 MPa // *Geophysics*. 2007. Vol. 72, No. 1. P. E1–E13.

Статья поступила в редакцию 18.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.8.053

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-117-125

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОГНОЗА РУСЕЛ

Екатерина Андреевна Милентьева¹, Алексей Андреевич Баранцев²,
Алина Александровна Оболенская³, Антон Сергеевич Гриневский⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kate0808mm@yandex.ru

² ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Alexey.Barancev@lukoil.com

³ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Alina.Obolenskaya@lukoil.com

⁴ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Anton.Grinevskiy@lukoil.com

Аннотация. В данной статье представлены результаты переобработки материалов сейсморазведки 3D — объединенной сейсмической съемки, состоящей из съемок 4 отдельных лицензионных участков, расположенных на территории Западной Сибири. На примере данных материалов детально продемонстрирована важность роли интерпретационного сопровождения обработки для цели повышения качества сейсмических данных, подготовленных для последующей интерпретации. Постоянный мониторинг изменения качества сейсмических данных последовательно на каждом из этапов обработки учитывает анализ сейсмического сигнала и геологические особенности разреза, а регулярное взаимодействие со специалистами-обработчиками необходимо для контроля качества выполненных процедур, направленных на повышение разрешенности сейсмического разреза и, как следствие, улучшения прослеживаемости целевых объектов, в частности в данной статье — русловых тел. Для сравнения качества прослеживаемости русел на старых и новой съемках был применен частотный анализ сейсмических кубов на основе RGB частотного суммирования. По результатам переобработки 2023 г., проведенной на объединенной территории 4-х площадей, была отмечена существенная детализация русловых объектов в интервале целевых тюменских отложений. Также авторами была применена специально обученная для поиска русел нейронная сеть, показывающая, насколько лучше/хуже прослеживаются русловые объекты при применении той или иной процедуры обработки. На основании полученных результатов был сформирован единый граф, учитывающий степень влияния той или иной процедуры обработки на исследуемые геологические объекты.

Ключевые слова: интерпретационное сопровождение обработки, объединение съемок, нейронная сеть, русла, точность прогноза

Для цитирования: Милентьева Е.А., Баранцев А.А., Оболенская А.А., Гриневский А.С. Разработка методики интерпретационного сопровождения обработки сейсмических данных в Западной Сибири с целью улучшения качества прогноза русел // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 117–125.

IMPROVEMENT OF A METHODOLOGY FOR INTERPRETATIVE CONTROL OF SEISMIC DATA PROCESSING IN WESTERN SIBERIA IN ORDER TO IMPROVE THE QUALITY OF RIVERBED FORECASTING

Ekaterina A. Milenteva¹, Aleksey A. Barantsev², Alina A. Obolenskaya³,
Anton S. Grinevskiy⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kate0808mm@yandex.ru

² LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Alexey.Barancev@lukoil.com

³ LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Alina.Obolenskaya@lukoil.com

⁴ LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Anton.Grinevskiy@lukoil.com

Abstract. This article presents the results of the reprocessing of the materials of the CDPM 3D seismic survey (using the common depth point method) of the combined seismic survey that is consisted of surveys of 4 separate license areas located in Western Siberia. Using the example of these materials, the importance of the role of interpretative processing control (IPC) for the purpose of improving the quality of seismic data prepared for subsequent interpretation is demonstrated in detail. IPS is the constant monitoring of changes in the quality of seismic data sequentially at each stage of processing. The constant interaction of the IPS group with processing specialists is necessary to control the quality of the performed procedures aimed at increasing the resolution of the seismic image and, as a result, improving the traceability of target objects, in particular in this article — channel objects. Frequency analysis of seismic data was used to compare the quality of paleochannels traceability in previous and new surveys. This analysis is based on RGB (red-green-blue) frequency summation. According to the results of the re-processing of 2023, significant detailing of paleochannel objects in the range of target Tyumen deposits was noted. The authors also used a specially trained neural network for searching for riverbeds, showing how much better/worse riverbed objects are traced when applying a particular processing procedure. Based on the results obtained, a consensus was formed on the acceptance or non-acceptance of the results of a particular procedure of the conducted IPS.

Keywords: interpretative control of processing, surveys merging, neural network, channels, forecast accuracy

For citation: Milenteva E.A., Barantsev A.A., Obolenskaya A.A., Grinevskiy A.S. Improvement of a methodology for interpretative control of seismic data processing in Western Siberia in order to improve the quality of riverbed forecasting. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 117–125. (In Russ.).

Введение. С каждым годом в сфере контроля качества проводимой на проектах обработки данных сейсморазведки стремительно развивается направление супервайзинга и интерпретационного сопровождения обработки (ИСО), включающее в себя последовательность определенных процедур, способных вовремя отследить недочеты в сейсмических данных (например, сквозные амплитудно-частотные аномалии, остаточные помехи, недодавленные кратные волны и др.), проявляющиеся после выполнения того или иного этапа обработки. Например, в статье [Никольников и др., 2019] было проанализировано изменение формы сигнала на различных этапах обработки и предложен комплекс атрибутов контроля качества, который позволяет надежно оценить изменение спектральных и динамических характеристик сейсмической записи.

В данной статье рассмотрена возможность контроля качества обработки с помощью комплексирования методов расчета спектральной декомпозиции, сейсмических атрибутов и применения нейронной сети, специально обученной с целью поиска геологических объектов. Все перечисленные выше инструменты анализа позволяют своевременно заметить ошибку уже на ранних стадиях и предотвратить ее, таким образом сэкономив время и деньги на очередной итерации обработки, интерпретации или затраты на других, уже более поздних этапах геологоразведочных работ (ГРП) [Кирьянова и др., 2023]. Изучаемый район работ находится на территории Западной Сибири. Целевыми объектами района работ являются отложения тюменской свиты, имеющие сложное строение по площади распространения и по разрезу в пределах каждого из месторождений, в первую очередь связанное с развитием речных долин и осложняющими проявлениями доюрского комплекса. В ходе исследования была произведена переобработка материалов сейсморазведки МОГТ 3D (метод общей глубинной точки) объединенной сейсмической съемки, состоящей из съемок 4 отдельных лицензионных участков общим объемом 790 км². По этой причине задача осуществления переобработки и интерпретационного сопровождения осложнена необходимостью учета особенностей результатов обработки сейсмических данных при объединении разнородных съемок прошлых лет. В ходе работы были предложены идеи и методические подходы для повышения качества результатов обработки данных сейсморазведки, выбранные на основании проведенного на каждом этапе анализа ИСО и способствующие своевременному учету особенностей объединяемых съемок, улучшению качества прогноза русел. В последнее время в сейсморазведке, как и во многих других сферах, для целей

ускорения и автоматизации расчетов, а также для минимизации влияния человеческого фактора всё чаще применяются методы машинного обучения, в том числе и нейронные сети. В рамках данной работы авторы протестировали на исследуемых данных нейронную сеть, специально обученную для поиска и автоматического выделения палеорусел. С точки зрения ИСО применение данной нейронной сети позволило понять, насколько лучше или хуже прослеживаются русловые объекты при применении той или иной процедуры обработки [Алексеева, 2022].

Материалы и методы исследований. Исходными материалами для написания статьи стали данные сейсморазведки МОГТ 3D, полученные с единой сейсмической съемки в объеме 790 км² (3D данные 4-х съемок прошлых лет также были проанализированы и стали объектом сравнения с результатом новой обработки 2023 г. на предмет наличия прироста сейсмогеологической информации). Данная территория характеризуется большим объемом скважинных данных, включая 412 скважин с акустическим каротажем (АК), из которых 13 — с данными вертикального сейсмического профилирования (ВСП).

Все расчеты и сравнения сейсмической и скважинной информации проводились в ПО Petrel и Hampson Russell. Специально обученная нейронная сеть была использована как метод для объективной оценки прослеживаемости палеорусловых объектов и влияния процедур обработки на результаты их автоматического выделения. В работе использовалась нейронная сеть U-Net, обученная и запатентованная П.А. Алексеевой и Д.Е. Мирошниченко в управлении сейсмических исследований ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» в 2023 г. [Мирошниченко, 2023].

Результаты исследований и их обсуждение. Для контроля корректного выполнения обработки на каждом из ее этапов со стороны ИСО проводился анализ привнесенных в сейсмические данные изменений. В рамках контроля обработки инструменты ИСО применяются ради 2-х целей:

1 — выявление, доказательство наличия и экспресс-интерпретация новых геологических особенностей, отслеживание эволюции сейсмического разреза и сейсмограмм;

2 — поиск, предупреждение и недопущение «ошибок обработки» — применения неэффективных процедур или неоптимальных параметров процедур обработки, искажающих сейсмическое изображение или приводящих к потере полезной информации.

Одной из главных проблем проведения переобработки и ИСО на данной площади стала необходимость увязки 4-х разнородных съемок между собой: одновременного учета фазовых сдвигов съемок друг

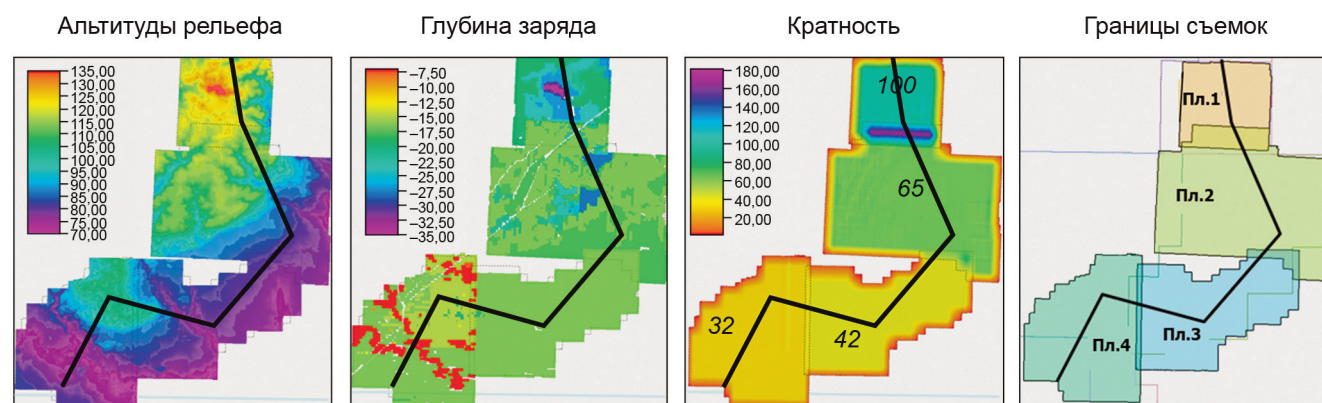


Рис. 1. Карты основных характеристик новой сейсмической съемки 2023 г. На карте кратности цифрами указана средняя кратность сейсмических съемок отдельно для каждой из площадей, на карте границ съемок — Пл. 1, Пл. 2 и т. п. — номера площадей съемок

относительно друга, ввод временных статических поправок с целью приведения их к общему уровню, выравнивание амплитуд по площади района работ. Кроме того, выполнялось постоянное отслеживание корреляции карт атрибутов с картой рельефа и с картой глубины заложения заряда для учета влияния поверхностных условий.

На рис. 1 представлены карты рельефа района работ, глубины заложения заряда, распределения кратности и положения границ предшествующих съемок.

К основным типам помех на площади работ были отнесены: случайные амплитудные помехи, поверхностные волны, кратные волны, линейные помехи, техногенные помехи от линий электропередач. Амплитудные аномалии, связанные с влиянием поверхностных условий, были устранены с помощью процедуры SCAC (surface consistent amplitude correction — поверхностно-согласованная коррекция амплитуд) и амплитудно-частотной балансировки.

Обязательным шагом при ИСО является контроль качества подавления различных типов кратных волн. Данный контроль выполнялся через анализ атрибутов, сравнение сейсмограмм и временных разрезов на ближних, средних и дальних удалениях с целью возможного обнаружения остаточного фона кратных волн и для своевременного предотвращения случайного подавления полезного сигнала.

Помимо проиллюстрированных процедур была выполнена амплитудно-частотная балансировка, протестирован частотно-зависимый SCAC, выполнена 5D регуляризация, миграция до и после суммирования. Контроль результатов обработки, в частности, контроль качества привязки к скважинам (рис. 2), позволил выполнить главную задачу ИСО, состоящую в сохранении полезного сигнала, недопущении его подавления при устранении помех и повышении отношения сигнал/шум.

Применение нейронных сетей для повышения точности ИСО и улучшения качества прогноза русел. Для сравнения качества прослеживаемости русел к сейсмическим данным прошлых лет и к ре-

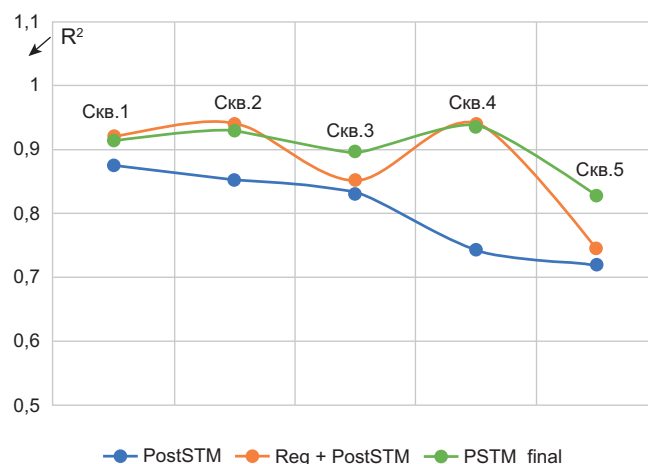


Рис. 2. Изменение квадрата коэффициента корреляции при привязке на разных этапах обработки. В легенде к графику указаны названия этапов обработки данных сейсморазведки (PostSTM — этап миграции после суммирования, Reg + PostSTM — этап миграции после суммирования и регуляризации, PSTM — финальный этап миграции после суммирования), по вертикальной оси R^2 отложены значения квадрата коэффициента корреляции сейсмических и скважинных данных

зультатам переобработки 2023 г. был применен метод спектральной декомпозиции и RGB суммирования различных частот. По результатам переобработки 2023 г. отмечается существенная детализация русловых тел в интервале целевых тюменских отложений (рис. 3).

Особое внимание уделялось ярко-выраженным русловым объектам, расположенным в северной и южной частях площади съемки (Пл. 1 и Пл. 4 на рис. 1). Они рассматривались как перспективные объекты для размещения эксплуатационных скважин под бурение. Исходя из целевых объектов изучения, авторами были предложены описанные ниже рекомендации к последовательности проведения ИСО, направленные на повышение степени прослеживаемости этих геологических тел. Важным моментом является то, что данные рекомендации учитывают постоянное итеративное взаимодействие групп обработки, супервайзеров и интерпретации.

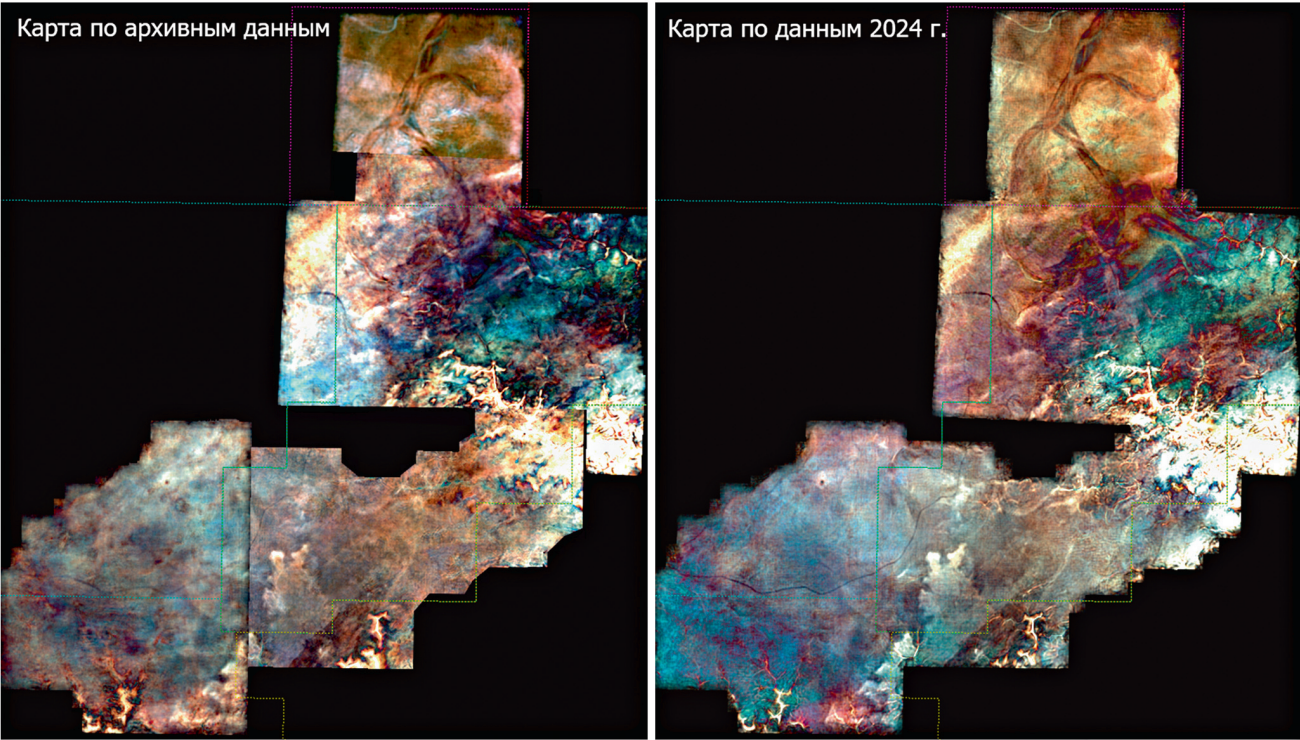


Рис. 3. Сравнение результатов RGB суммирования на старых и новой съемках

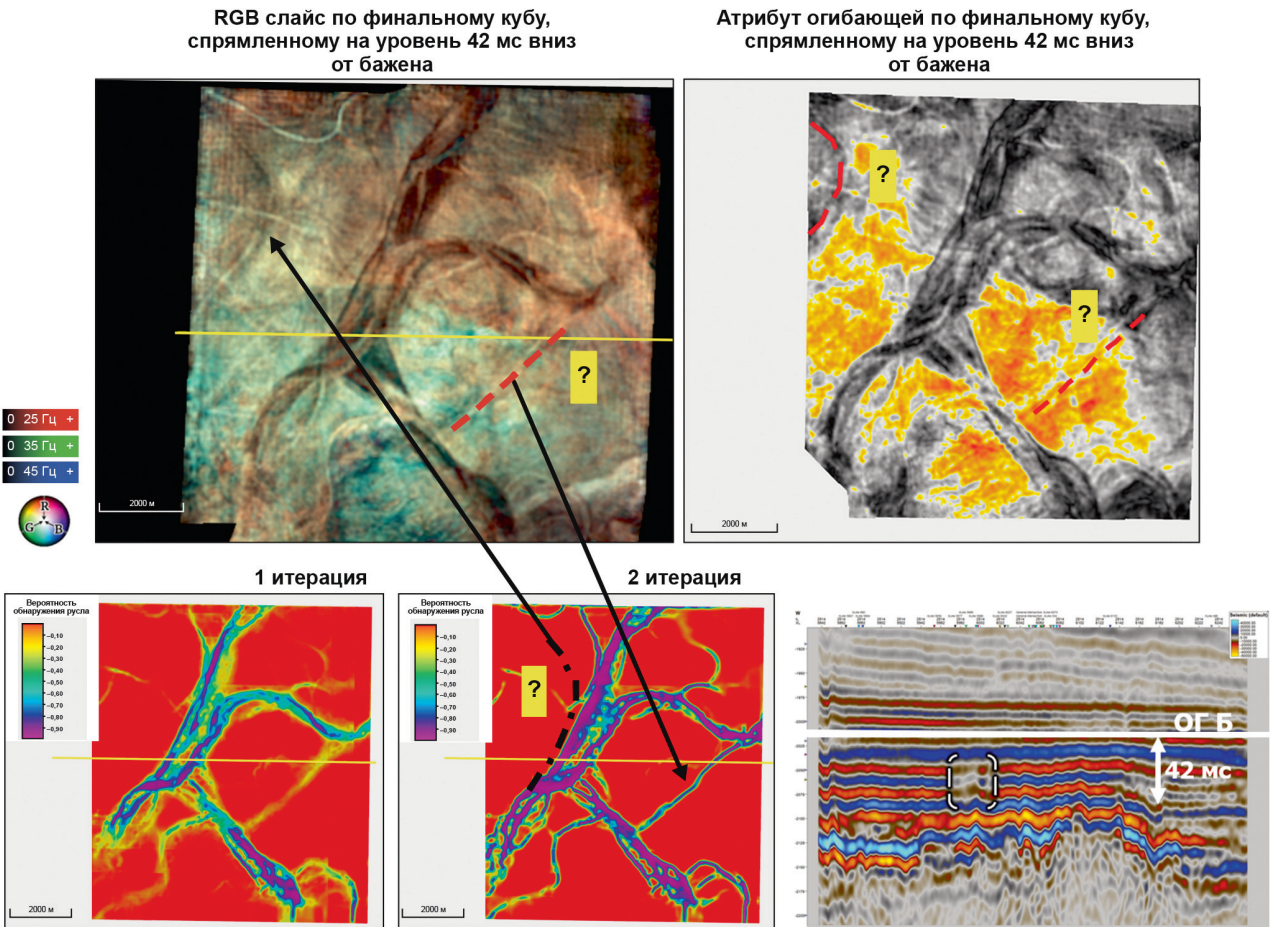


Рис. 4. Сопоставление примененных методов интерпретации русловых объектов на примере финального куба: ОГ Б — отражающий горизонт баженовской свиты; финальный куб был спрямлен на ОГ Б, после чего был рассчитан атрибут огибающей и спектральная декомпозиция на уровне ниже ОГ Б на 42 мс; итерация 1 и итерация 2 — итерации расчета нейронной сети U-Net (на вход 2-ой итерации работы нейронной сети был подан результат 1-ой итерации); знаками вопроса обозначены неопределенные, уточняемые области, представляющие интерес для исследований

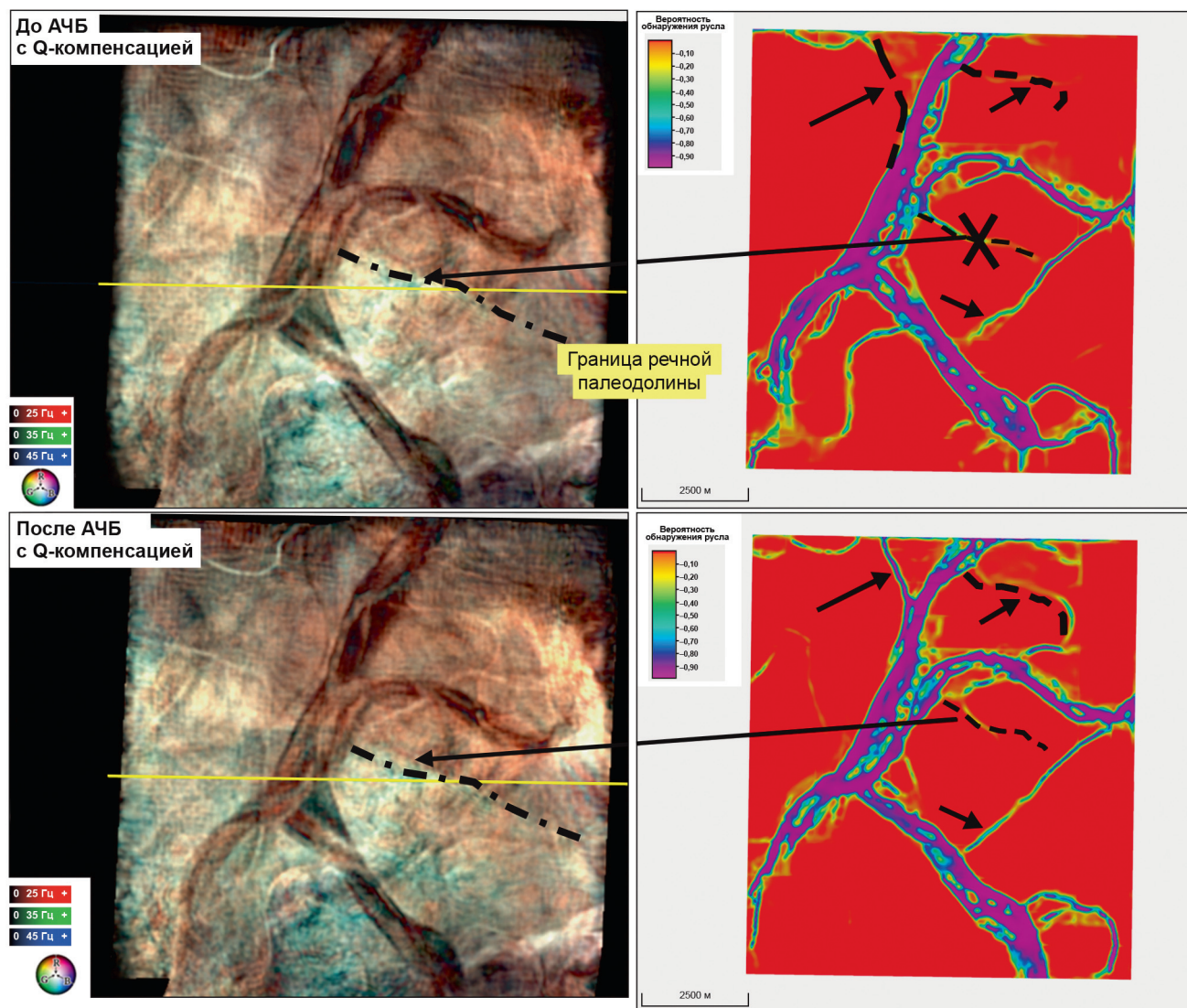


Рис. 5. Сравнение результатов расчета спектральной декомпозиции и работы нейронной сети U-Net до и после АЧБ: АЧБ — амплитудно-частотная балансировка, Q-компенсация — метод компенсации частотно-зависимого затухания сейсмической записи

Последовательность методов ИСО.

1. Анализ карт атрибутов (RMS-амплитуды, мгновенные частоты, half energy, огибающая) на каждом из этапов обработки сейсмических данных в широких/узких окнах. Данный анализ направлен на повышение отношения сигнал/помеха и, как следствие, улучшение прослеживаемости целевых объектов.

2. Анализ RGB срезов спектральной декомпозиции (мультидисциплинарный метод совместно с геологами и петрофизиками) также позволяет выделить геологические тела в результате разложения спектра сейсмической волны на частоты и соотнесения каждой из частот с определенным цветом.

3. Постоянный контроль над улучшением привязки синтетических и сейсмических данных на последовательных этапах обработки (особенно — в целевом интервале), проводимый с целью отслеживания соответствия целевых сейсмических горизонтов и геологических отбивок в скважинах и увеличения квадрата коэффициента корреляции между скважинной и сейсмической информацией.

Кроме того, авторы статьи сопоставили результаты работы нейронной сети и других методов интерпретации русловых объектов на примере сейсмического куба, полученного на финальном этапе обработки (рис. 4).

Как видно из рисунка, карты вероятности палеорусел, рассчитанные с применением нейронной сети, не уступают традиционным атрибутам, предназначенным для картирования палеорусловых объектов (RGB-срезы спектральной декомпозиции, огибающая и т. д.). Для максимально подробного картирования объектов нейронная сеть обрабатывала изображение дважды, вследствие чего на рисунке указаны две итерации. В некоторых отдельных зонах нейронная сеть позволяет выделить более тонкие элементы, что может свидетельствовать о большей чувствительности к изменениям в геологии. Данный метод имеет ряд преимуществ, однако есть и определенные ограничения его применения, которые будут описаны далее в статье.

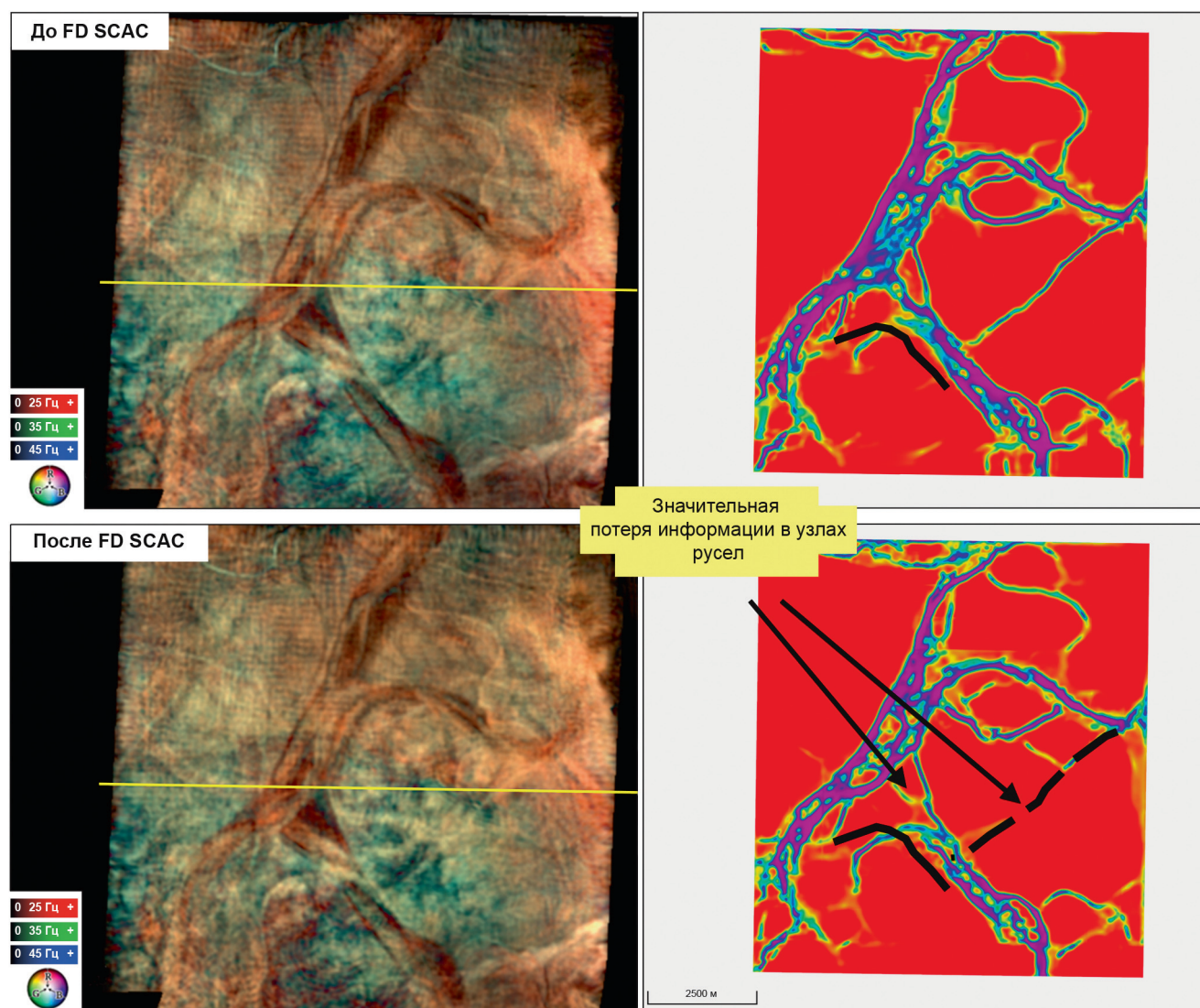


Рис. 6. Сравнение результатов расчета спектральной декомпозиции и работы нейронной сети U-Net до и после частотно-зависимой поверхностно-согласованной коррекции амплитуд (FD SCAC — frequency-dependent surface-consistent amplitude correction — частотно-зависимая поверхностно-согласованная коррекция амплитуд)

На одном из этапов обработки были сравнены кубы до и после амплитудно-частотной балансировки (АЧБ) (рис. 5).

Процедура АЧБ предназначена для выравнивания амплитудно-частотного спектра в пределах определенной площади работ с помощью осреднения значений амплитуд в заданном временном окне и в диапазоне выбранных частотных панелей. После сравнительного анализа этих кубов с применением нейронной сети и сопоставления полученных результатов с соответствующими срезами спектральной декомпозиции, было выявлено первое ограничение работы алгоритма нейронной сети, а именно: до АЧБ на срезах атрибута в целевых отложениях наблюдается граница речной долины, датируемая более ранним возрастом, то есть в данном случае нейронная сеть выделяет ее как русло. Таким образом, можно сделать вывод о том, что АЧБ выравнивала амплитудно-частотный спектр сейсмического куба и предотвратила проявления

ложных границ, относящихся к разновозрастным геологическим объектам.

Процедура частотно-зависимой поверхностно-согласованной коррекции амплитуд (FD SCAC — frequency-dependent Surface Consistent Amplitude Correction) (аналогично АЧБ выравнивающая амплитудный спектр в зависимости от частоты), неблагоприятным образом подействовала на исследуемые сейсмические данные, ухудшив прослеживаемость основных русел и продемонстрировав значительную потерю информации даже в узлах русел (рис. 6).

Исходя из данного рисунка, можно сделать вывод, что к процедуре частотно-зависимой поверхностно-согласованной коррекции амплитуд следует относиться с особым вниманием с точки зрения прослеживаемости палеорусел и тщательно тестировать параметры перед применением данной процедуры.

Как отмечалось выше, одной из главных проблем проведения переобработки и ИСО на исследуемой площади стала необходимость увязки 4-х разно-

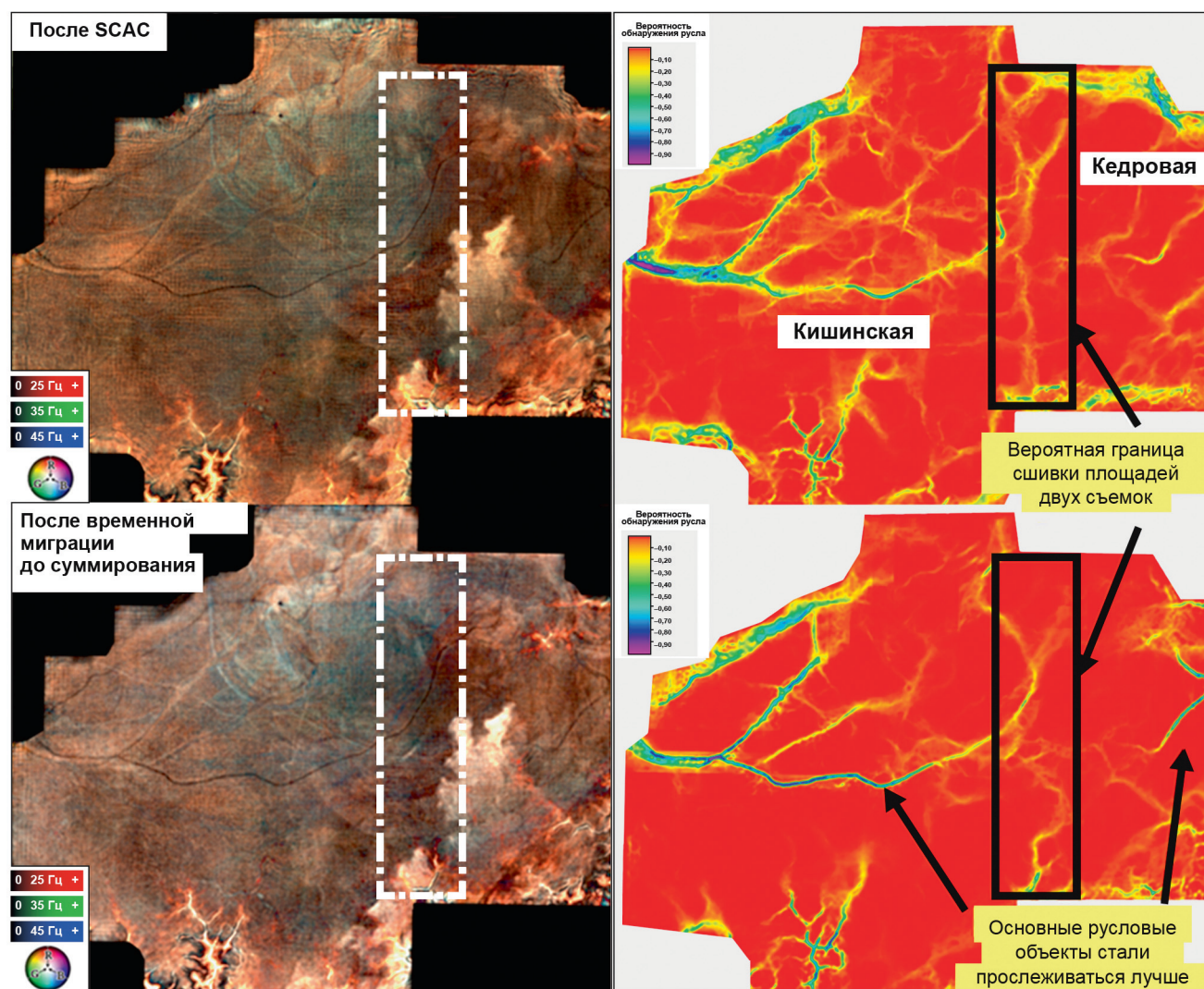


Рис. 7. Сравнение результатов расчета спектральной декомпозиции и работы нейронной сети U-Net до и после временной миграции до суммирования (SCAC — surface-consistent amplitude correction — частотно-зависимая поверхностно-согласованная коррекция амплитуд)

родных съемок между собой. Вследствие сшивки площадей двух соседних съемок, на различных атрибутах возникла заметная граница в зоне сочленения площадей, особенно привлекавшая к себе внимание группы ИСО. На этапе временной миграции до суммирования после применения сопутствующих ей итераций АЧБ вышеописанную проблему удалось разрешить. Цель сейсмической миграции — перемещение (или миграция) сейсмического сигнала отраженных волн с поверхности в реальное местоположение отражающих границ или дифрагирующих объектов в глубине. В случае миграции до суммирования некогерентные помехи подавляются уже на стадии предварительной обработки, и далее еще тщательнее фильтруются при суммировании трасс мигрированных сейсмограмм. Проведенный на следующих этапах обработки скоростной анализ и коррекция кинематики позволяют детальнее учесть скоростную модель среды, и, как следствие, корректнее восстановить отражающую границу в глубине. Итеративно выполненные процедуры

АЧБ с подобранными для каждого этапа обработки параметрами позволили выровнять АЧХ сейсмических данных различных съемок.

Исходя из полученных результатов можно заключить, что нейронная сеть хорошо «чувствует» границы разных съемок, поэтому очень важно выровнять по площади отличающиеся амплитудно-частотные характеристики (рис. 7).

Подводя итог выполненного исследования, авторы обобщили рекомендации по усовершенствованию методики ИСО с целью повышения качества прослеживаемости целевых русловых объектов, сделав акцент на особенностях изучаемых геологических тел. Палеорусловая система данного участка характеризуется сложным строением: чередованием зон хорошо сортированного материала с зонами ухудшенного коллектора. Максимальные эффективные толщины были встречены только в средне- и высокоамплитудных зонах русел в пределах речной долины. Минимальные толщины встречены в заиленных руслах за пределами речной долины. Для



Рис. 8. Схема рекомендаций по ИСО с целью повышения качества прослеживаемости русловых объектов

проводимых геологоразведочных работ основной интерес представляют неяркие и широкие русла, так как они предположительно обладают лучшими фильтрационно-емкостными свойствами. В зависимости от признаков целевых объектов были подобраны подходящие способы структурного или динамического анализов и отвечающие их требованиям тестируемые процедуры обработки, а также даны рекомендации по применению или неприменению этих процедур (рис. 8).

Методы структурного и динамического анализов, представленные в данной схеме, универсальны для анализа различных интервалов временного разреза, но параметры, использованные в каждой отдельной процедуре, тщательно подбирались группой обработки и ИСО с целью наиболее точного выделения именно палеорусловых объектов.

Заключение. В результате выполнения данной исследовательской работы была выполнена ее основная цель — разработка методического подхода ИСО с целью улучшения качества прослеживаемости русел. Применяя для анализа различные интерпретационные атрибуты, метод спектральной декомпозиции и специально обученную для поиска русел нейронную сеть U-Net, было проанализировано качество сейсмических данных после каждого из этапов обработки на предмет ухудшения/улучшения

прослеживаемости основных геологических тел, подавления техногенных некогерентных шумов и кратных волн, сохранения полезного сигнала, контроля корреляции данных с поверхностными условиями и др. Кроме того, авторы выявили ограничения протестированной сети U-Net, заключенные в том, что данная сеть отслеживает на одном срезе атрибута разновременные геологические тела и прорисовывает границу сшивки соседних съемок с разными АЧХ. Были учтены особенности результатов обработки сейсмических данных при объединении разнородных съемок прошлых лет и обобщены рекомендации по выбору способов структурного или динамического анализов и соответствующих им процедур обработки, направленных на детализацию и уточнение структурного плана.

Благодарности. Авторы выражают признательность геофизической компании CGG и ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» за профессиональную обработку данных сейсморазведки, контроль качества этих данных и предоставление их для написания статьи. Также авторы благодарны Алексеевой П.А., Мирошниченко Д.Е., Калугину А.А. и Кирияновой Т.Н. за исследования в области выделения палеорусел в отложениях тюменской свиты с использованием нейронной сети по данным сейсморазведки 3D.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеева П.А. Выделение и прогноз свойств палеорусел по сейсмическим данным с использованием нейронной сети и методов спектрального анализа: Канд. дисс. М., 2022.

Кириянова Т.Н., Оболенская А.А., Золотой Н.В. и др. Роль супервайзинга и интерпретационного сопровождения обработки сейсмических данных на различных этапах жизни месторождения от открытия до разработки, Сборник научных трудов специалистов ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». М., 2023. 84 с.

Мирошниченко Д.Е., Алексеева П.А., Кириянова Т.Н. и др. Опыт исследования строения русловых систем с использованием свёрточных нейронных сетей, 11-я международная конференция «Геонауки: современные вызовы и пути решений». СПб., 2023.

Никульников А.Ю., Горбачев С.В., Мясоедов Д.Н., Нурмухамедов Т.В. Применение количественного контроля качества в процессе обработки данных сейсморазведки // Геофизика. 2019. Т. 1. С. 55–64.

Статья поступила в редакцию 13.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.8.053

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-126-133

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ СТРУКТУРНЫХ ПОСТРОЕНИЙ В СЛУЧАЕ ОТСУТСТВИЯ СКВАЖИН НА ТЕРРИТОРИИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Екатерина Андреевна Милентьева¹, Роман Олегович Верещакин²,
Александра Сергеевна Ломакина³, Алина Александровна Оболенская⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kate0808mm@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; veresagin2001@gmail.com

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lomakina.aleksa@bk.ru

⁴ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; Alina.Obolenskaya@lukoil.com

Аннотация: Статья посвящена вопросам минимизации неопределенности структурных построений по данным сейсморазведки 2D в условиях отсутствия скважинной информации на примере одной из площадей Каспийского моря. Площадь исследований характеризуется наличием высоко и низкоскоростных локальных аномалий в верхней части разреза, оказывающих унаследованное влияние на структурные планы по целевым отражающим горизонтам. Сейсмические данные, полученные по 2D методу общей глубинной точки, на площади исследований были обработаны и интерпретированы в 2020 г. для решения задач структурной оценки ресурсов, а затем в 2023 г. переработаны с применением новых технологий и переинтерпретированы с целью уточнения и актуализации полученных ранее результатов. В рамках переработки 2023 г. качество сейсмического изображения контролировалось при помощи технологий супервайзинга и интерпретационного сопровождения обработки с целью минимизации неопределенностей структурных построений и уточнения ресурсных прогнозов. Минимизация неопределенностей структурных построений имела принципиальное значение для дальнейшего планирования 3D методики проведения сейсморазведочных работ, оценки ресурсов и бурения.

Ключевые слова: сейсморазведка 2D, обработка сейсмических данных, оценка неопределенности структурных построений, супервайзинг обработки, Каспийский регион

Для цитирования: Милентьева Е.А., Верещакин Р.О., Ломакина А.С., Оболенская А.А. Оценка неопределенностей структурных построений в случае отсутствия скважин на территории Каспийского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 126–133.

ESTIMATION OF THE UNCERTAINTIES OF STRUCTURAL IMAGING IN THE ABSENCE OF WELLS IN THE CASPIAN SEA

Ekaterina A. Milenteva¹, Roman O. Vereshchakin², Aleksandra S. Lomakina³,
Alina A. Obolenskaya⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kate0808mm@yandex.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; veresagin2001@gmail.com

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lomakina.aleksa@bk.ru

⁴ LUKOIL-Engineering LLC, Moscow, Russia; Alina.Obolenskaya@lukoil.com

Abstract. The article is dedicated to the factors affecting the estimation of the structural uncertainty on the 2D seismic data for the case of no LOG and VSP data on the one of the Caspian Sea areas. Complex seismogeological structure of the near-surface section and high and low-velocity local anomalies affected the structural geometry for the target reflecting horizons — are the key features of project. 2D seismic data was processed and interpreted from 2020 and 2023. During re-processing in 2023, the imaging of time and depth migrated images was significantly enhanced in particular by efficient supervision and interpretive maintenance. The results of the evaluation of the uncertainties of the structural plan for the area of interest were of fundamental importance for the further planning of the methodology of 3D seismic exploration and drilling.

Keywords: 2D seismic survey, seismic data processin, estimation of uncertainty of structural imaging, processing supervising, the Caspian region

For citation: Milenteva E.A., Vereshchakin R.O., Lomakina A.S., Obolenskaya A.A. Estimation of the uncertainties of structural imaging in the absence of wells in the Caspian Sea. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 126–133. (In Russ.).

Введение. Достоверность оценки перспектив нефтегазоносности и предбурового прогноза во многом зависит от результатов структурной и дина-

мической интерпретации, которые в свою очередь определяются качеством полевых сейсмических данных и проведенной обработки, а также объ-

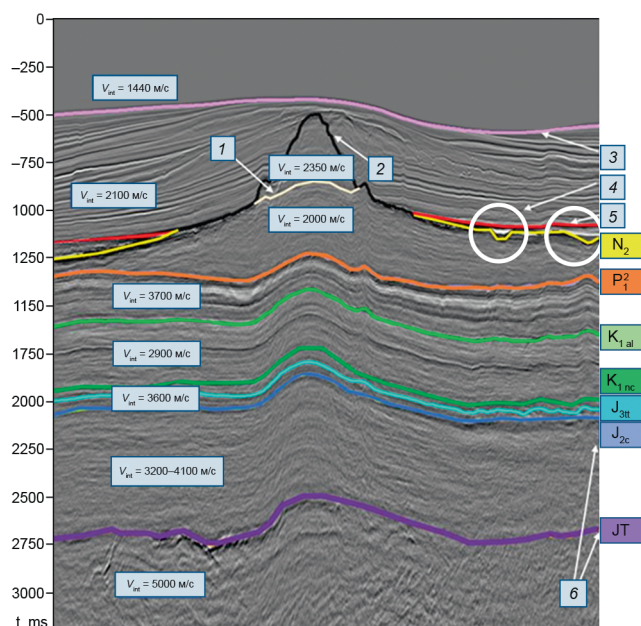


Рис. 1. Пример сейсмического разреза с выделенными опорными ОГ и структурными особенностями: 1 — граница раздела высоко- и низкоскоростной частей останца; 2 — кровля останца; 3 — морское дно; 4 — палеоврез; 5 — кровля клиноформ, 6 — геологический возраст горных пород

емом доступной априорной геолого-геофизической информации. Для повышения достоверности прогноза нефтегазоносности и оценки его точности необходимо минимизировать факторы, влияющие на неопределенности структурного плана на стадии обработки сейсмических данных. Согласно литературным данным [Гржибовский, 2007], огромный вклад в неопределенность структурных построений вносит качество глубинно-скоростной модели и мигрированного сейсмического изображения. Неопределенность структурных построений зависит от качества и полноты априорных данных: геофизических исследований скважин (ГИС), вертикального сейсмического профилирования (ВСП) по скважинам сопредельных районов исследования, региональных карт и т. д. Кроме того, такие факторы, как плотность сейсмических наблюдений также способны понизить качество прогноза. Перечисленные факторы были проанализированы с целью учета их влияния на структурный план и выбора оптимальной стратегии проведения дальнейших геологоразведочных работ (ГРП) на площади исследований.

Материалы и методы исследований. Исходным материалом для написания статьи стали 2D сейсморазведочные данные изучаемой площади работ, данные АК и ВСП из скважин, расположенных на соседних площадях, информация по региональным трендам осадконакопления, поверхностям несогласия и другим геологическим особенностям, аналоги которых изучены на соседних площадях. Исследуемый участок находится в акватории Среднего Каспия. Перспективными являются юрские и меловые отложения, кровля которых уверенно прослеживается на сейсмическом разрезе (рис. 1).



Рис. 2. Современные аналоги палеоостанца (п-ов Мангышлак, Казахстан) снизу и гора Тарки-Тай, Республика Дагестан сверху: предположительно высокоскоростная часть останца (1), низкоскоростная часть останца (2)

Район работ характеризуется сложным строением отложений возраста N1-P12, включающих системы акустически контрастных палеоврезов, клиноформ, поверхностей несогласия, а также эрозийные карбонатные останцы (современные аналоги, наблюдаемые на территории Казахстана и Дагестана, представленные на рис. 2).

Ввиду отсутствия скважин на изучаемой территории для проведенного исследования были привлечены данные акустического и плотностного каротажей, полученных в скважинах, расположенных на соседних площадях.

С целью оценки неопределенностей структурных построений было необходимо решить следующие задачи: 1) детально изучить геологическое строение исследуемого участка; 2) выделить сейсмостратиграфические особенности разреза и определить их влияния на нижележащие горизонты; 3) исследовать причины возникновения структурных неопределенностей, методы их оценки и минимизации; 4) оценить вклад каждого из факторов в оценку неоднозначности структурной интерпретации.

Структурная интерпретация исходных данных сейсморазведки и оценка неопределенностей структурных построений были проведены с использованием ПО Petrel и Excel.

Результаты исследований и их обсуждение.

Ранее было установлено, что в ряде случаев олигоцен-миоценовые останцы, наблюдаемые в акватории Каспия, формируют в волновом поле локальную высокоскоростную аномалию, способную оказать унаследованное влияние на структурный план нижележащих отражающих горизонтов (ОГ). В процессе выполненного интерпретационного анализа было установлено, что структура палеоостанца, вероятнее всего, включает в себя высокоскоростную, сильно эродированную часть и подстилающую ее низкоскоростную слабоэродированную часть площадного распространения. Для того, чтобы детализировать структурный план по целевым ОГ в условиях отсутствия априорных скважинных данных непосредственно на площади работ, авторами

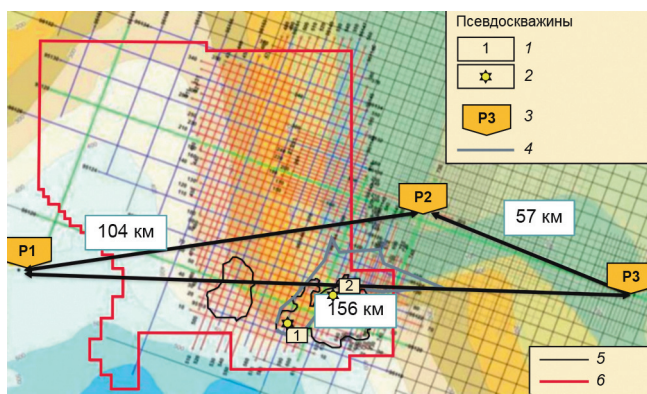


Рис. 3. Схема расположения профилей, скважин и псевдоскважин, зон распространения сейсмогеологических аномалий на площади исследований: 1 — номер реальной скважины, 2 — условное обозначение реальной скважины, 3 — номер и условное обозначение псевдоскважины, 4 — контур предполагаемой зоны распространения останца, 5 — контур исследуемых геологоразведочных территорий, представляющих интерес, 6 — контур лицензионного участка

было предложено сформировать псевдокаротажные кривые в некоторых точках на площади, например, в сводах перспективных структур в проектных точках для будущего бурения. Для данной территории было предложено сформировать 2 псевдоскважины в сводах двух перспективных структур. Для каждой из псевдоскважин на основе статистических данных по скважинам с соседних участков и региональных трендов была сконструирована кривая акустического каротажа. Схема расположения двух псевдоскважин (под номерами 1 и 2) трех реальных скважин (P1-P3), находящихся на соседних площадях, и останца на площади исследования представлена на рис. 3.

Построение кривой АК псевдоскважин. Для оптимизации оценки структурных неопределенностей на малоизученном районе были построены псевдоскважины в сводах двух перспективных структур. В рамках данного исследования для учета влияния особенностей верхней части разреза псевдоскважины позволили оценить допустимые диапазоны коэффициента отражения на границах опорных горизонтов и, насколько это возможно, диапазоны интервальных скоростей в слоях.

Как было отмечено выше, две псевдоскважины были размещены в сводах двух перспективных структур, а именно в точке пересечения 2D профилей (что благоприятно для привязки данных к скважинным и необходимого соответствия t_0 и значений глубин отбиток) (рис. 4).

Псевдоскважина № 1 локализована в своде структуры № 1, расположенной непосредственно под палеоостанцом. В рамках работ 2020 г. структура считалась основной с точки зрения перспективности для последующего бурения. По результатам переобработки и переинтерпретации 2023 г. ее прогнозируемые размеры были существенно уменьшены за счет детального учета унаследованного влияния

палеоостанца на структурный план. Псевдоскважина № 2 расположена в своде структуры № 2 в зоне отсутствия палеоостанца, однако северное замыкание структуры контролируется унаследованным влиянием локальных скоростных аномалий, связанных с различными объектами верхней части разреза (ВЧР) (палеоврезами и оползневыми телами) олигоцен-миоценового возраста. В рамках работ 2020 г. структура считалась второстепенной с точки зрения перспективности для последующего бурения. По результатам переобработки и переинтерпретации 2023 г. ее прогнозируемые размеры были существенно увеличены, и она стала представлять интерес для дальнейших работ ГРП.

В точках псевдоскважин восстанавливались кривые псевдоакустического каротажа с учетом информации о глубинах опорных отражающих горизонтов и диапазонах интервальных скоростей слоев путем комбинации и трансформации реальных фрагментов записи акустического каротажа (АК) скважин с соседних лицензионных участков с учетом трендов изменения мощности и глубин залегания слоев. После построения глубинно-скоростной модели, применения методики Full Wave Inversion (FWI) и сейсмической томографии для ее уточнения, проведения глубинной миграции Кирхгофа амплитуда структур и, соответственно, конфигурация основных отражающих горизонтов изменилась. Анализ глубинных мигрированных разрезов показал, что амплитуда структуры в точке псевдоскважины № 1 уменьшилась, а в точке псевдоскважины № 2 увеличилась.

На рис. 4 изображен композит глубинных профилей, полученных после уточнения глубинно-скоростной модели (ГСМ) и глубинной миграции Кирхгофа. Пример кривых акустического каротажа псевдоскважин № 1 и № 2 см, наложенных на сейсмические разрезы в глубинной области, приведен на рис. 5.

Однако, такой способ восстановления кривых псевдоакустического каротажа имеет ряд ограничений, которые необходимо учитывать при дальнейшем использовании полученных кривых в качестве априорной информации:

- восстановление отрезка кривой АК для заданного слоя возможно, если в реальных скважинах этот слой был вскрыт или существуют априорные данные о физических свойствах в этих слоях;
- чем больше данных по реальным скважинам доступно при построении заданного слоя, тем надежнее фрагмент восстановленной кривой;
- слабая региональная изменчивость свойств по латерали внутри пласта, относительное постоянство гипсометрического положения слоя в реальных скважинах и псевдоскважинах, а также схожесть фрагментов реальных кривых АК по абсолютным величинам, трендам и качеству способствуют повышению надежности восстановленного фрагмента АК и наоборот;

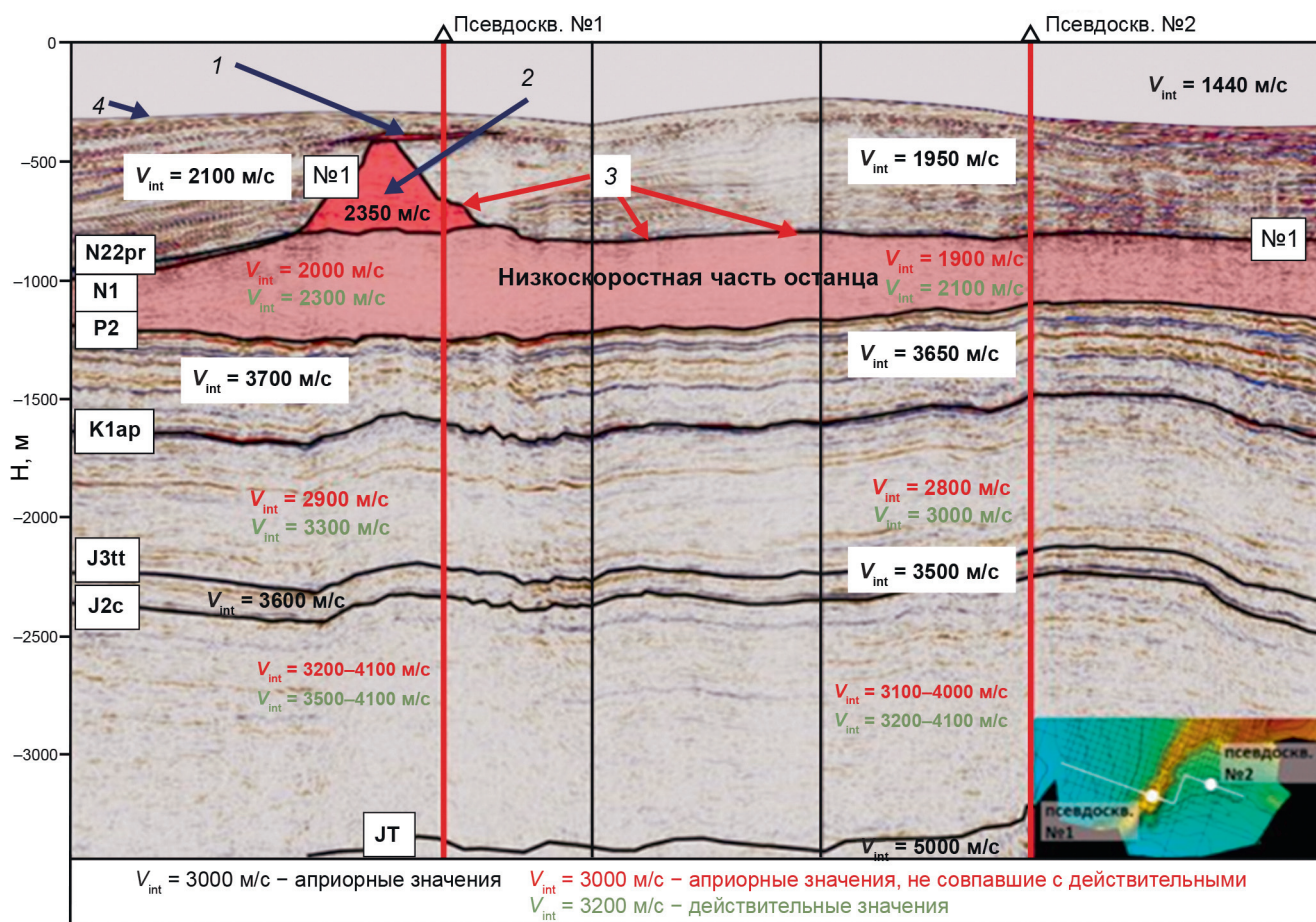


Рис. 4. Композитный глубинный профиль, проходящий через псевдоскважины № 1 и № 2: красным цветом выделены тонкий прослой карбонатных пород и высокоскоростная часть останца, розовым цветом выделена низкоскоростная часть останца (1 — карбонаты, 2 — высокоскоростная часть останца, 3 — поверхность размыва, 4 — морское дно)

– скорости в слоях, ограниченных поверхностями несогласия, неконтрастными плохо прослеживаемыми на сейсмических данных ОГ, а также в мало-мощных слоях, заведомо сложнее восстановить в псевдоскважине, поэтому надежность кривых в этих интервалах снижается.

Априорных данных по реальным скважинам, находящимся на соседних площадях, при построении слоев верхней части разреза было недостаточно, чтобы фрагмент восстановленной кривой в данном интервале был надежным без единой погрешности. Соответственно, нарушения данного ограничения методики были исправлены для верхней части разреза путем учета трендовой составляющей. Корректировок для нижней части разреза, в том числе целевого интервала, не производилось, поскольку в данной области нам хорошо известны не только скорости из сейсмических данных, но и скважинная информация, позаимствованная с соседних реальных скважин. Следует отметить, что верхняя неоген-четвертичная часть разреза для обеих псевдоскважин была восстановлена условно в отсутствии полноценных данных АК на основании геологических предположений о строении разреза, поэтому на графиках этот интервал разреза представлен осредненными ступенчатыми кривыми. По

результатам глубинной обработки данный интервал был уточнен и детализирован.

В качестве оценки качества созданных моделей псевдоскважин, авторами было проведено одномерное моделирование трасс коэффициентов отражения по восстановленной акустике и плотностному каротажу, после чего были сопоставлены полученные синтетические трассы с реальными трассами в трех существующих скважинах, расположенных на соседних площадях. Была сравнена привязка сейсмических данных к смоделированным трассам и тех же сейсмических данных к синтетическим трассам скважин с соседних площадей.

Результаты моделирования синтетических трасс и привязки реальных сейсмических данных к ним представлены на рис. 6.

По итогам привязки коэффициент корреляции реальной скважины, расположенной на соседней площади, составил 0,84, а коэффициент корреляции псевдоскважины № 2, расположенной в своде структуры № 2, — 0,58. Полученный коэффициент корреляции привязки псевдоскважины № 2 ниже сравниваемого с ним коэффициента корреляции привязки реальной скважины, но авторы объясняют данное расхождение приблизительно значений акустического и плотностного каротажей, восста-

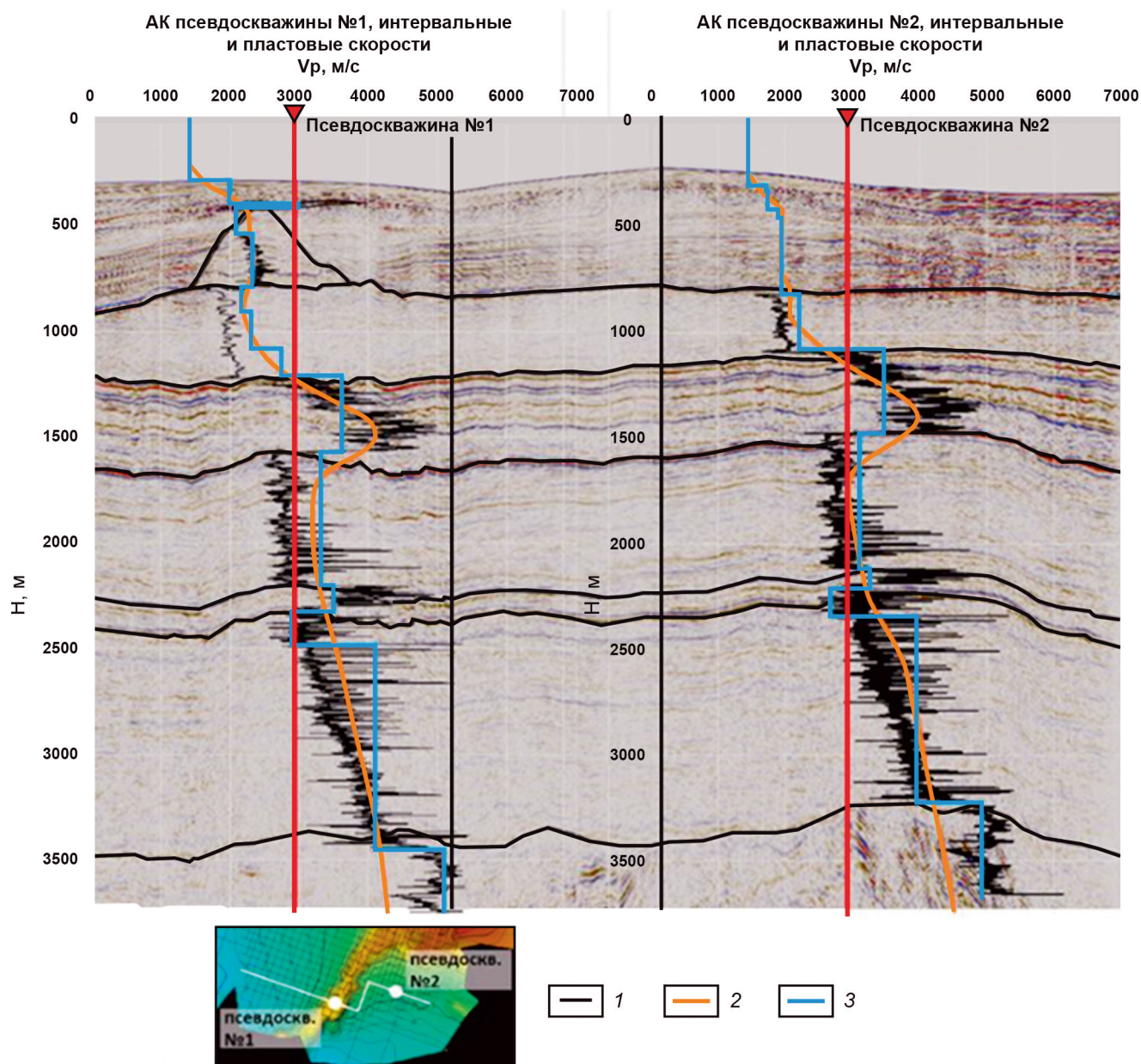


Рис. 5. Композитный профиль, проходящий через псевдоскважины № 1 и № 2 (1 — АК псевдоскважины, 2 — трасса интервальных скоростей (по данным обработки), 3 — пластовые скорости)

новленных по данным вспомогательных скважин с соседних площадей. В целом, коэффициент корреляции, полученный при привязке псевдоскважины № 2 можно считать удовлетворительным для выполненного приблизительного моделирования.

Оценка неопределенностей структурных построений. По мнению авторов, к факторам, влияющим на неопределенность структурной интерпретации, относятся:

- точность, устойчивость и детальность определения скоростных характеристик по сейсмограммам в ходе обработки;
- локальные скоростные аномалии, сопоставимые с сейсмической расстановкой в вышележащей толще, или латеральная изменчивость скоростей в слоях;
- редкая сеть профилей 2D;

- неустойчивая корреляция ОГ для построения структурных карт, неоднозначный выбор фазы для корреляции;

- выдержанность сейсмической фазы, использованной для корреляции ОГ;
- интерференция с остаточными кратными волнами и боковыми отражениями;
- метод и параметры интерполяции при картопостроении;
- радиус сглаживания карты;
- сама методика 2D при условии наклонной границы дает неопределенности.

В литературе описаны различные подходы к оценке неопределенностей структурной интерпретации, например, метод нелинейной наклонной томографии [Messud, et al., 2020] и вероятностная оценка [Орлов, 2004]. В публикации [Куркин, 2016]

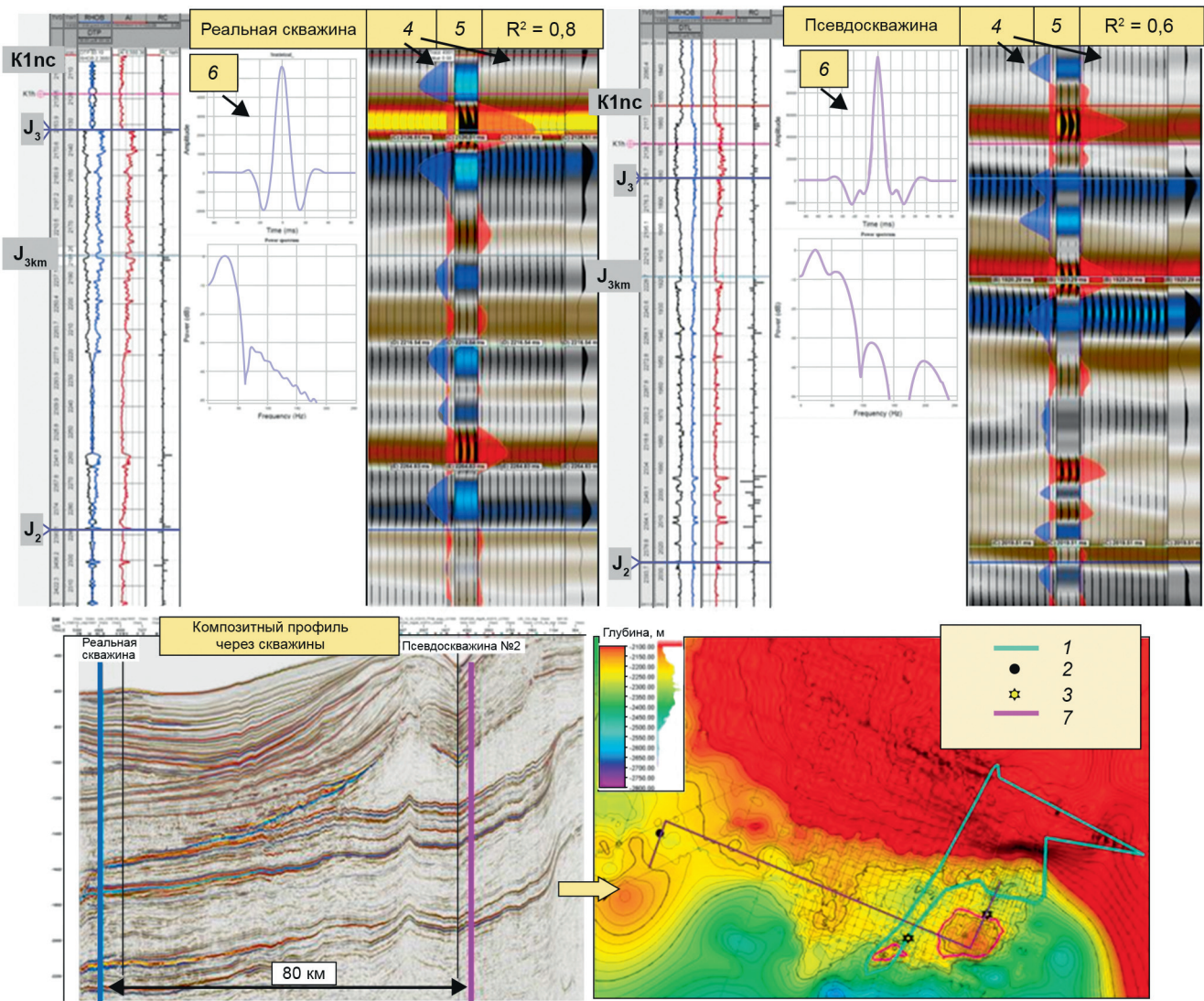


Рис. 6. Привязка реальной скважины и псевдоскважины № 2 к исследуемой территории сейсмических работ: 1 — контур останца (пояснения к кривым ГИС: RHOV — плотность, DTP- акустический каротаж, AI — акустический импеданс (AI=RHOV*DTP), RC — трасса коэффициентов отражения); 2 — реальная скважина; 3 — псевдоскважины; 4 — сейсмические данные; 5 — синтетические данные из скважины; 6 — импульс, сворачиваемый с трассой коэффициентов отражения для получения синтетической трассы, R2 — квадрат коэффициента корреляции сейсмических и синтетических данных, K1nc, J3, J3km, J2 — геологические отбивки; 7 — контуры структур

подробно рассмотрена схема оценки структурной неопределенности, с использованием детерминистических и стохастических методов.

В работах [Гржибовский, 2007, Орлов, 2004, Шаталов, 2016] показано, что точность определения какого-либо фактора можно вычислять аналитически, например, используя распределение Стьюдента. Измеряемой физической величиной в нашем случае была выбрана площадь ошибки структурных построений при влиянии одного из возможных факторов f , определяющих вероятность возникновения структурной неопределенности, полученная по n вариациям (полигонам).

Доверительный интервал площади ошибки структурных построений для фактора f в данной работе был рассчитан по следующей формуле Стьюдента (1):

$$\overline{\Delta S^{[f]}} = t_{p,f} \sqrt{\frac{1}{n} \frac{\sum_i w_i (S_i^{[f]} - S^{[f]})^2}{\sum_i w_i}} \tag{1}$$

где $\Delta S^{[f]}$ — доверительный интервал для ошибки структурных построений при влиянии фактора f , n — количество измерений (полигонов, оконтуривающих структуру), $S^{[f]}$ — средняя ошибка структурных построений при влиянии f фактора в i -й вариации (полигоне), S^k — средняя площадь ошибки при влиянии фактора f по всем вариациям (полигонам), $t_{p,f}$ — коэффициент Стьюдента, $f = n - 1$ — количество степеней свободы в распределении Стьюдента, p — доверительный интервал, w_i — вклад i -ой вариации данного фактора в неоднозначность структурных построений. В результате получаются значения доверительных интервалов определения ошибки

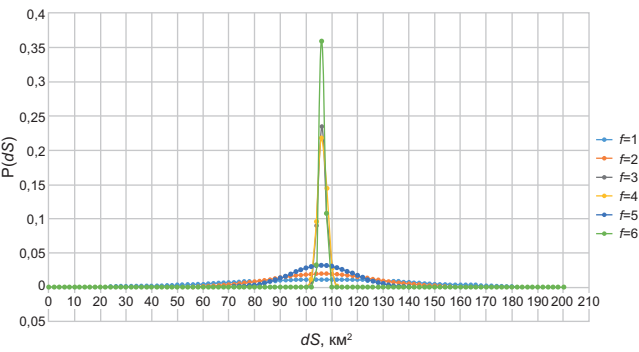


Рис. 7. Плотность распределения случайной величины площади dS по факторам неоднозначности структурных построений: $f=1$ — изменение скоростей; $f=2$ — редкая сеть 2D; $f=3$ — метод интерполяции; $f=4$ — радиус сглаживания; $f=5$ — качество корреляции отражающего горизонта; $f=6$ — краевой эффект; dS — изменение площади структуры; $P(dS)$ — плотность распределения случайной величины dS при неоднозначности структурных построений

структурных построений для каждого из факторов: $f=1$, для фактора локальных скоростных аномалий, латеральной изменчивости скоростей в слоях; $f=2$, для фактора редкой сетки 2D; $f=3$, для фактора метода интерполяции при картопостроении; $f=4$, для фактора сглаживания (радиус сглаживания); $f=5$, для фактора способа корреляции ОГ для построения структурных карт, выбора фазы; $f=6$, для фактора влияния краевого эффекта.

Таким образом, был оценен вклад каждого из факторов в оценку общей структурной неопределенности (табл. 1).

Вклад в неоднозначность структурных построений рассчитывался как величина в процентах, равная доли неопределенности, полученной по каждому из вышеперечисленных факторов, от общей неопределенности (суммы неопределенностей по всем факторам вместе). В свою очередь доля неопределенности, вносимая каждым из факторов в отдельности, была получена как изменение площади полигона по отношению к его исходной площади ($106\text{ км}^2=100\%$), полученной на одном из последних этапов переобработки данных. Как видно из представленной таблицы, процентный показатель вклада в неоднозначность структурных построений может варьироваться в достаточно широком интервале. Это происходит из-за того, что для построения структурных карт геофизики-обработчики рассчитывают скоростные модели и на каждом из этапов обработки корректируют их, применяя в т.ч. методы полноволновой инверсии (FWI) для учета особенностей верхней части разреза и томографии для корректировки скоростей в нижележащих интервалах. Соответственно, выбор той или иной версии скоростной модели будет напрямую влиять на изменение контура замыкания структур и, как следствие, на площадь внутри этого контура замыкания.

Таблица 1

Факторы, влияющие на возникновение структурных неопределенностей

Фактор, влияющий на оценку структурных неопределенностей	Доверительный интервал для ошибки оценки неопределенности, ΔS , км ²	Вклад в неоднозначность структурных построений, %
Латеральная изменчивость скоростей в слоях	40	≈ 25–32 %
Интервальные скорости (в средней части разреза, над целевым горизонтом)	25	≈ 18–25 %
Редкая сеть 2D	18	≈ 10–20 %
Качество корреляции ОГ для построения структурных карт, выбор фазы	15	≈ 10–15 %
Метод интерполяции при картопостроении и сглаживание (радиус сглаживания)	1,2	менее 10 %
Влияние краевого эффекта	менее 1	менее 7 %

На графиках, представленных на рис. 7, показаны плотности распределения величин площадей для каждого фактора. Для визуализации полученных результатов было выбрано Гауссово распределение (нормальный закон).

Нормальный закон подходит для использования в качестве первого приближения и эффективен в практической применении. Нормальное распределение имеет несколько областей применения (например, при анализе данных, моделировании случайных процессов, прогнозировании), в том числе при контроле качества анализируемой информации. При использовании данного распределения постулируется, что значения исследуемой непрерывной случайной величины формируются под воздействием очень большого числа независимых случайных факторов (в этой статье — факторов возникновения неопределенности), причем сила воздействия каждого отдельного фактора мала и не может превалировать среди остальных.

Для того, чтобы сделать оценку неопределенностей структурных построений законченной, авторами статьи было принято решение рассчитать неопределенность по глубине. Данный расчет проводился по стандартной формуле (2) для оценки прогнозной погрешности по глубине, приведенной в методическом пособии ВНИИ ГЕОФИЗИКА [Киселёв и др., 1984]:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{V^2 \cdot \sigma_t^2 + T^2 \cdot \sigma_v^2}{2}},$$

(2)

где V — среднее по карте значение средней скорости, T — среднее по карте (пикировке) значение двойного

времени t , $\sigma^2 t$ — дисперсия погрешностей времени, $\sigma^2 V$ — дисперсия погрешностей средней скорости.

Значение прогнозной погрешности по глубине для целевого горизонта поздней юры J3tt составило 54 м.

Оценка контуров нефтегазоперспективных структур по вероятностям P10-P90. Результаты оценки неопределенности структурных построений были использованы для уточнения вероятностного прогноза контуров структур и оценки перспектив P10-P90 по классификации [Cao, et al., 2017]. Прогнозные контуры замыкания структур, выявленных после учета погрешности структурной интерпретации сейсмических данных, сопоставлены с контурами P10, P50, P90, выделенными в рамках оценки ресурсов. Как видно из рис. 8, для P90 эти контуры практически совпали.

Заключение. После рассмотрения наиболее вероятных причин возникновения структурных неопределенностей можно сказать, что все перечисленные причины вносят большой вклад в неоднозначность структурных построений. Особенно большая невязка в структурных картах появляется при возникновении локальных скоростных аномалий, латеральной изменчивости скоростей в слоях, при учете редкой сети 2D и при использовании различных методов картопостроения и интерполяции. Значительные изменения в форме полигонов, построенных по контурам структур № 1 и № 2, заметны при тестировании способов корреляция ОГ для построения структурных карт, выборе фазы, радиуса сглаживания при интерполяции и учете краевого эффекта.

Также для оценки структурных неопределенностей и уточнения информации, ввиду отсутствия скважин на исследуемом участке, могут быть соз-

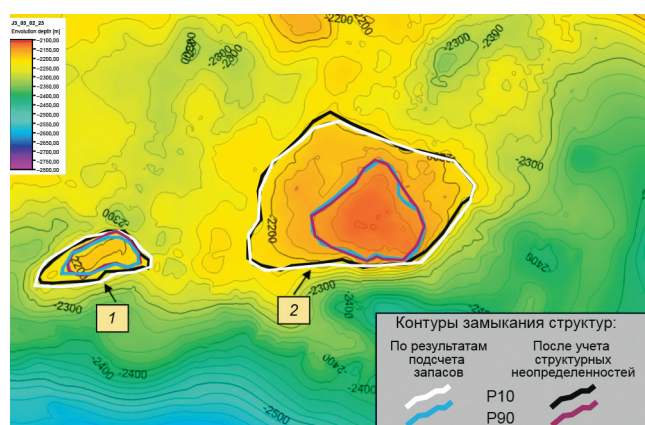


Рис. 8. Сопоставление контуров замыкания изучаемых структур, полученных по подсчету запасов и по результатам структурных построений № 1 и 2 (после учета структурных неопределенностей)

даны псевдоскважины, применение которых может быть полезно при оценке коэффициента отражения на границах опорных горизонтов и при уточнении диапазонов интервальных скоростей в слоях.

Оценка структурных неопределенностей важна для решения производственных задач. Для построения геологической модели необходимо правильно определить замыкание структур для карт вероятностей P10-P90, чтобы точно оценить площадь перспективной либо опасной структуры и учесть возможный геологический риск.

Благодарности. Авторы выражают признательность И.Д. Агапотову, М.С. Судаковой, С.Ю. Штуню, Т.Н. Кирьяновой, Н.В. Золотому, О.М. Быкадоровой, Е.В. Черняеву за предоставление данных для написания статьи, за ценный вклад в процесс работы над ней и стремление сделать ее качественной, интересной и актуальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гржибовский А.М. Проверка распределения и описательная статистика. Архангельск: Экология человека, 2007. С. 52–58.

Киселёв В.С., Козлов Е.А., Захарова Г.А. Инструкция по оценке качества структурных построений и надежности выявленных и подготовленных объектов по данным сейсморазведки МОВ-ОГТ (при работах на нефть и газ). М., 1984. С. 7–15.

Куркин А.А. Оценка пространственного распределения погрешности структурных построений. Тюмень: ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2016. 20 с.

Орлов А.И. Математика случая. Вероятность и статистика — основные факты: Учебное пособие. М.: МЗ-Пресс, 2004. 110 с.

Шаталов К.В., Кириллова А.В. Применение критерия Стьюдента для оценки результатов межлабораторных сравнительных испытаний. Эталон. Стандартные образцы. 2016. 350 с.

Cao J., Shi Ya., Wang D., Zhang X. Acoustic Log Prediction on the Basis of Kernel Extreme Learning Machine for Wells in GJH Survey, Erdos Basin, College of Computer Science and Information Engineering, Tianjin University of Science and Technology, China, 2017. 6 с.

Messud J., Guillaume P., Lambar'e G. Massy. CGG. On velocity and migration structural uncertainties: A new approach using non-linear slope tomography. Published in arXiv.org // Research Gate, Engineering. Geology. 2020. 27 с.

Статья поступила в редакцию 13.10.2024, одобрена после рецензирования 30.10.2024, принята к публикации 23.05.2025

УДК 551.763.1(470.62)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-134-144

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА НА РУБЕЖЕ ЮРЫ И МЕЛА

Святослав Юрьевич Яковичин¹, Сергей Иванович Бордунов²,
Елена Васильевна Яковичина³, Павел Анатольевич Фокин⁴

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; carapaxy@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геологический институт РАН, Москва, Россия; sib-msu@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yakovishina@mail.ru

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; fokinpav@rambler.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения условий формирования отложений Северо-Западного Кавказа на рубеже юры и мела. Полученные данные позволили выяснить палеообстановки седиментации и источники сноса обломочного материала. Установлено существование трех систем осадконакопления: карбонатной, карбонатно-терригенной и терригенной. Палеообстановки на границе юры и мела на Северо-Западном Кавказе представляли собой переход от мелководно-морских с рифовыми постройками на бровке шельфа к относительно глубоководным морским троговым.

Ключевые слова: Кавказ, юра, нижний мел, литология, палеообстановки

Для цитирования: Яковичин С.Ю., Бордунов С.И., Яковичина Е.В., Фокин П.А. Условия формирования отложений Северо-Западного Кавказа на рубеже юры и мела // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 134–144.

CONDITIONS OF FORMATION OF THE DEPOSITS OF THE NORTHWESTERN CAUCASUS ON THE BOUNDARY OF THE JURASSIC AND CRETACEOUS

Svyatoslav Yu. Yakovishin¹, Sergey I. Bordunov², Elena V. Yakovishina³, Pavel A. Fokin⁴

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; carapaxy@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University; Geological Institute RAS, Moscow, Russia; sib-msu@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yakovishina@mail.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; fokinpav@rambler.ru

Abstract. The results of studying the conditions of formation of the deposits of the Northwestern Caucasus on the boundary of the Jurassic and Cretaceous are presented. The data obtained made it possible to clarify the paleoenvironments of sedimentation and the sources of erosion of clastic material. The existence of three sedimentation systems has been established: carbonate, carbonate-terrigenous and terrigenous. Paleoenvironments at the boundary of the Jurassic and Cretaceous in the Northwestern Caucasus were represented as a pass from shallow-water with reef buildups on the shelf edge to relatively deep-sea marine trough environments.

Keywords: Caucasus, Jurassic, Lower Cretaceous, lithology, paleoenvironments

For citation: Yakovishin S.Yu., Bordunov S.I., Yakovishina E.V., Fokin P.A. Conditions of formation of the deposits of the Northwestern Caucasus on the boundary of the Jurassic and Cretaceous. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 134–144. (In Russ.).

Введение. Северо-Западный Кавказ является важным геологическим объектом и всегда вызывал повышенный интерес для изучения. Особенно интенсивно исследования здесь проводились с 1930-х по 1980-е годы прошлого века. Активная работа велась по обоснованию стратиграфии региона, геологическому картированию разных масштабов, поиску и разведке полезных ископаемых, прежде всего нефти и газа [Мордвилко, 1960; Бурлин, 1961; Егоян, 1964 и др.].

Отложения нижнего мела широко распространены на Северо-Западном Кавказе, где они представлены, в основном, в относительно глубоководных

глинистых фациях [Бурлин, 1961; Корсаков и др., 2013]. В районе исследований толщи нижнего мела несогласно перекрывают верхнеюрские отложения, состоящие из рифогенных известняков и карбонатно-терригенных зарифовых фаций, сложенных толщей чередования известковистых аргиллитов, алевролитов, песчаников, гравелитов, валунно-глибовых известняковых конгломератов.

Выявленные в прилегающих районах залежи нефти и газа в нижнемеловых отложениях (Хадыженская кордильера [Бабаринова, Микерина, 1989] на востоке и Псифское месторождение [Пинчук, Попков, 2013] на западе), а также притоки и при-

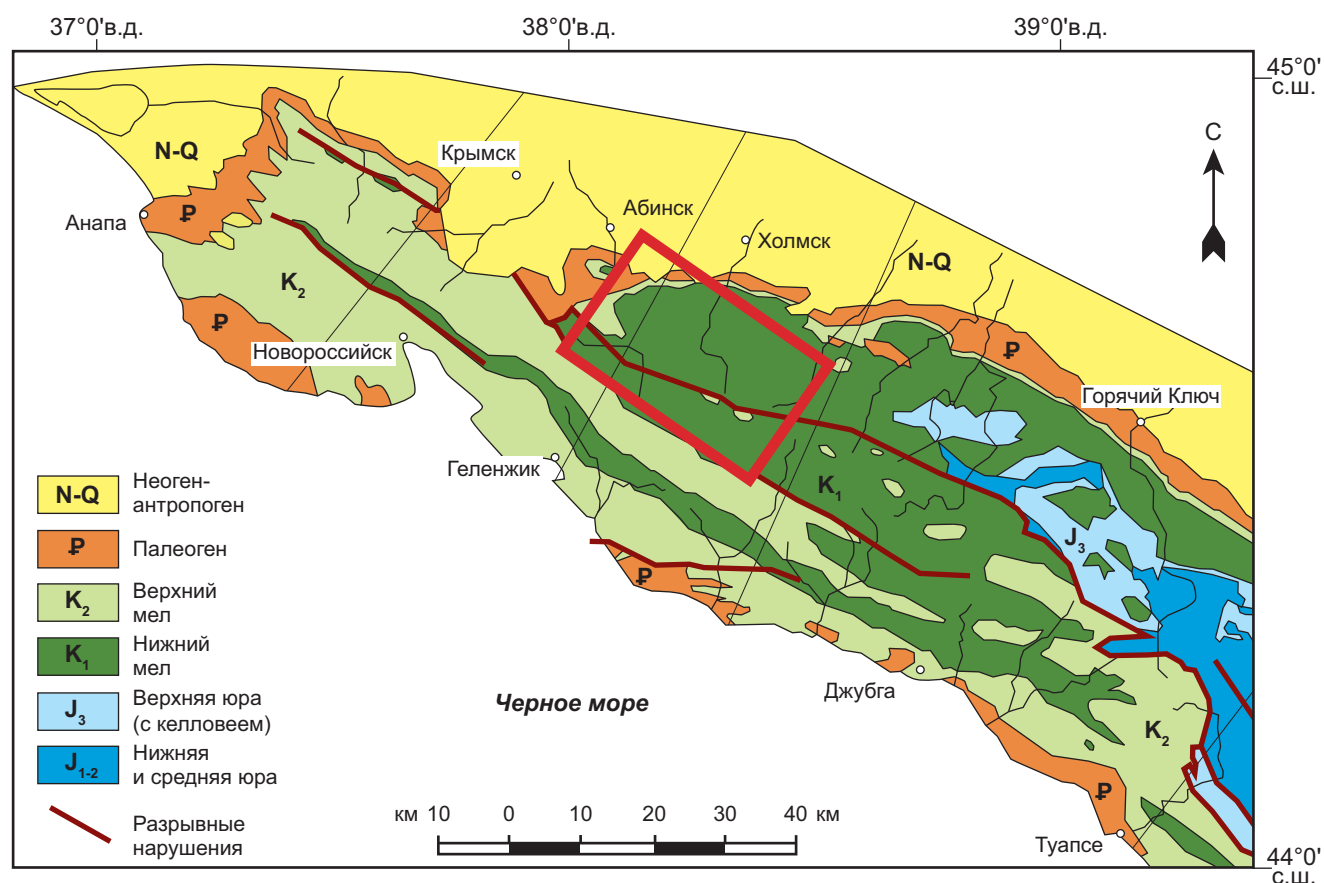


Рис. 1. Фрагмент геологической карты Северо-Западного Кавказа, по [Маринин, Расцветаев, 2008], с изменениями. Красный прямоугольник — расположение района исследований

знаки углеводородов (УВ) на других площадях [Суслова, 2006; Микерина, 2019] свидетельствуют о существовании перспектив обнаружения залежей нефти и газа и на изучаемой территории. Для этого необходима постановка геологоразведочных работ по изучению структурных особенностей, коллекторских свойств и нефтегазогенерационного потенциала верхнеюрских-нижнемеловых карбонатно-терригенных комплексов Северо-Западного Кавказа.

В этом стратиграфическом интервале наряду с глинистыми породами большой мощности встречаются и мощные пласты песчаников с хорошими показателями фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) [Яковишин и др., 2024а; 2024б]. Коллекторами для УВ также могут служить верхнеюрские известняки [Афанасенков и др., 2007]. Таким образом, в разрезе нижнего мела есть нефтематеринские и коллекторские толщи, а также покрывки. Это подтверждает перспективы данного стратиграфического интервала для поисков углеводородного сырья.

Территория района исследований находится в междуречье рек Абин и Убин в северо-западной части Кавказа на границе с Западно-Кубанским краевым прогибом, где отложения нижнего мела протягиваются широкой полосой в 15–30 км в субширотном направлении (рис. 1).

В тектоническом плане большую часть территории занимает Абино-Гунайская складчатая зона, сложенная терригенными отложениями раннеме-

лового возраста [Корсаков и др., 2013]. Зона характеризуется развитием продольной складчатости общекавказского простираения, осложненной нарушениями линейного характера. В северной части Абино-Гунайской зоны выделяются Собербашско-Гунайский синклиний на юге и Псебско-Гойхтский антиклинорий на севере, разделенные Тхмахинским глубинным разломом [Маринин, Расцветаев, 2008].

Цель работы заключалась в реконструкции обстановок осадконакопления отложений Северо-Западного Кавказа на рубеже юры и мела. Для этого на комплексной основе проведены литолого-фациальный, петрографическо-минералогический и рентгенофазовый анализы. Уточнение условий формирования отложений для титона и берриаса позволило установить закономерности смены данных толщ в разрезе и предложить направления дальнейших геолого-поисковых работ.

Материалы и методы исследования. Аналитические исследования проводились на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова. Петрографический состав пород изучался в прозрачных шлифах, изготовленных из 32 образцов, которые были отобраны из основных литологических разновидностей пород, 9 из которых приходится на пихтарскую свиту, 17 на запорожский горизонт и 6 на мацмаловскую свиту.

Для их исследования использовался оптический микроскоп Полам-213М. В результате изучения пе-

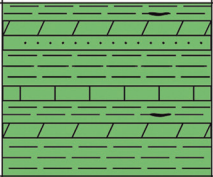
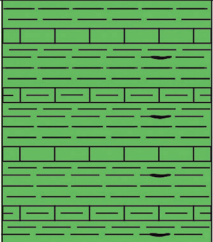
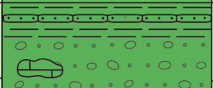
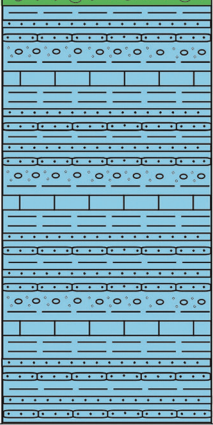
Система	Отдел	Ярус	Свита	Горизонт	Литология	Мощность, м	Характеристика подразделений
МЕЛОВАЯ	НИЖНИЙ	Берис	Чаталовская			250	Переслаивание глин, алевролитов и известняков. Глины известковистые и мергели серые и зеленые, плотные, алевролитистые, с прослоями алевролитов, обломочных известняков.
			Мачаловская			220–350	Глины серовато-зеленые, коричневые, слабо алевролитистые и аргиллитоподобные, слюдистые, с прослоями алевролитистого и обломочного известняка. В нижней части переслаивание песчаников и глин, реже конгломератов, конгломерато-брекчий.
			Запорожский			130	Конгломераты, конгломератобрекчии с валунами и глыбами известняков, переслаивание песчаников и глин.
			Пихтарская			110–600	Переслаивание аргиллитов, алевролитов, песчаников, пачки (до 20 м) конгломератов, гравелитов, обломочных известняков, малые рифовые массивы.
ЮРСКАЯ	ВЕРХНИЙ	Титон					

Рис. 2. Литолого-стратиграфическая колонка пограничных отложений юры и мела

трографических шлифов были определены основные литологические типы пород и осуществлена их генетическая типизация [Фролов, 1984], что позволило составить представление об условиях формирования изучаемой толщи. Классификация известняков приведена по [Dunham, 1962].

Минералогический состав глин изучен в 5 образцах методом рентгенофазового анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М. Исследования проводились на кафедре нефтегазовой седиментологии и морской геологии геологического факультета МГУ. Идентификация минералов осуществлялась на основании определения межплоскостных расстояний, которые на дифрактограммах показаны базальными рефлексами. В результате удалось установить наличие глинистых минералов разных групп. Полученные результаты были использованы при восстановлении обстановок седиментации [Лидер, 1986].

Результаты и обсуждение. Литологическая характеристика. Пограничные отложения юры и мела представлены пихтарской свитой (J_3-K_1pht)

и запорожским горизонтом (K_1zp) мачаловской свиты ($K_1mč$) (рис. 2). Все точки отбора образцов находятся на вершине и склонах г. Медвежья в северо-восточной части района исследований, где они выходят в ядре Медвежьегорской антиклинали, опрокинутой на север с углами падения около 70–80°. Обнажения на вершине горы Медвежья являются уникальными, в пределах исследуемой территории, точками выхода на поверхность юрских пород. Данные обнажения, имеющие антропогенную природу, расположены в стенках Медвежьегорского карьера, разрабатывающего верхнеюрские рифогенные известняки. Они дают полное представление о характере отложений, накапливавшихся здесь в конце юры и начале раннего мела.

Пихтарская свита (J_3-K_1pht) представляет нижнюю часть изученного разреза. Нижний контакт свиты тектонический, она залегает на разновозрастных образованиях, а сверху она стратиграфически несогласно перекрывается запорожским горизонтом. В нижней части свиты отмечается рифовый массив мощностью до 100 м, оконтуренный на поверхности

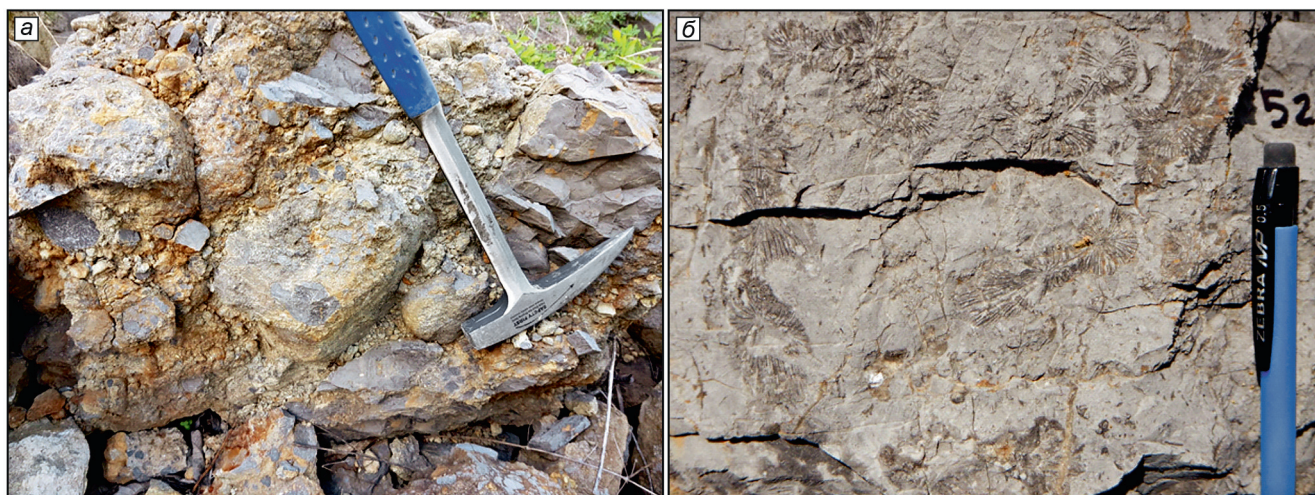


Рис. 3. Породы пихтарской свиты: а — валунные конгломераты, б — серые рифогенные известняки с ископаемыми кораллами. Фото Е.В. Яковишиной



Рис. 4. Обнажение отложений запорожского горизонта в западной стенке Медвежьегорского карьера. Фото Е.В. Яковишиной



Рис. 5. Обнажение пород мачмаловской свиты в южной стенке Медвежьегорского карьера. Фото Е.В. Яковишиной

и по скважинам, сложенный органогенно-обломочными известняками, местами оолитовыми [Корсаков и др., 2013]. Верхняя часть свиты представлена переслаиванием глин, алевролитов, песчаников с редкими прослоями конгломератов, мелкообломочных известняков. При этом вверх по разрезу увеличивается мощность и количество пластов глин при одновременном уменьшении количества и мощности прослоев песчаников, конгломератов, известняков. Мощность свиты до 600 м, а возраст определяется как титон — начало раннего берриаса.

Как уже писалось ранее наиболее полный разрез пограничных отложений юры и нижнего мела находится на горе Медвежьей, где он вскрыт в разрабатываемом карьере известняков. Западная стенка карьера сложена буро-серыми конгломератами (рис. 3). Они сложены обломками от мелкогалечной размерности (1–2 см) до крупных валунов диаметром 15–50 см. Галька в конгломератах средней и хорошей окатанности. Цемент средней плотности, карбонатно-глинистый. Обломки сложены серыми

микритовыми известняками юрского с фауной кораллов (рис. 3).

Запорожский горизонт (K_1zp) представлен чередованием конгломератов, глин, алевролитов и песчаников (рис. 4). Залегаёт стратиграфически несогласно на отложениях пихтарской свиты. Горизонт является базальной грубообломочной частью мачмаловской свиты ($K_1m\check{c}$). Мощность слоев конгломератов достигает до 30 м, глин 5–60 см, песчаников 10–260 см. Конгломераты сложены обломками рифовых известняков, кварца, кварцитов, вулканических пород и кремней. Мощность горизонта — 130 м. Возраст — ранний берриас.

Мачмаловская свита ($K_1m\check{c}$): залегаёт согласно как с вышележащими, так и с нижележащими толщами (рис. 5). Литологический состав представлен переслаиванием известковых глин и песчаников, а также редкими прослоями сидерита. Мощность свиты — 220–350 м. Возраст — ранний берриас.

Чаталовская свита (K_1ch) в основании представлена мергелями, перекрывающимися пере-

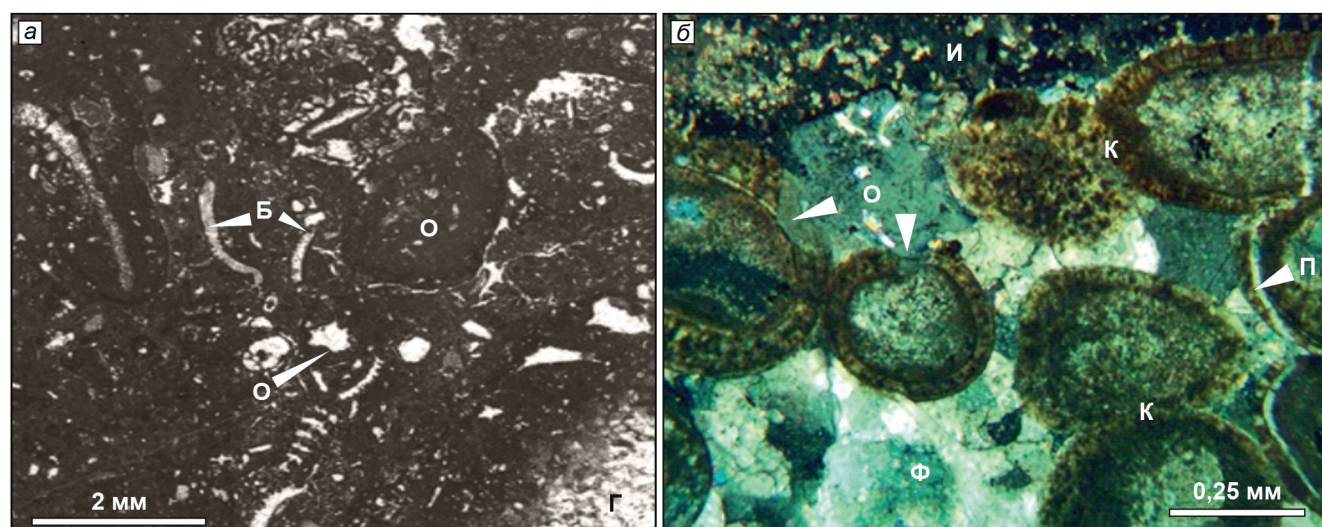


Рис. 6. Фото шлифов пихтарской свиты (J_3 - K_1pht): а — шлиф обр. 1112/5 без анализатора, ооидный флоатстоун. Средние и крупные онколиты (О) в ядрах содержат водорослевые образования, обломки раковин, известковых губок (Г). Биокласты (Б) окатаны, часто имеют поверхностную микритизацию. Карбонатные зерна погружены в матрикс со структурой пелоидный вакстоун; б — шлиф обр. 588/1 с анализатором, оолитовый грейнстоун. Оболочки оолитов сложены буроватым, железистым кальцитом, часто имеют конформные границы (К). Биокласты представлены иглой ежа (И) и перекристаллизованной фораминиферой (Ф). Зерно кварца при регенерации дорастивается в соседние оолиты (стрелки). Тонкий кальцитовый прожилок (П)

слаиванием глин и песчаников, а также иногда встречающимися прослоями гравелитов. Мощность свиты — 250 м, возраст — поздний берриас.

Петрографический состав. Петрографическое изучение шлифов показало, что верхнеюрские отложения представлены известняками, преимущественно пелоидными, биокластово-пелоидными вак- и пакстоунами, редко — биокластово-оолитовыми грейнстоунами.

Для пород характерно присутствие большого количества цианобионтных образований, инкрустирующих форм цианобионтов, фораминифер и остатков неясного происхождения, что обычно для мелководных в пределах верхней части фотической зоны обстановок. С этим хорошо согласуется и присутствие биокластов организмов эуфотической зоны: колониальных кораллов, известковых губок, зеленых водорослей, а также разнообразного комплекса других бентосных организмов. Широкое распространение цианобионтов, значительное количество пелоидного материала, онколитов (ооидов), а также обильного микрита и фенестровых структур в цементе (рис. 6, а) говорит о тиховодности обстановок. В то же время, в ряде шлифов с ними находятся окатанные, крупные микритизированные биокласты (рис. 6, б), что характерно для обстановок с высокой гидродинамической активностью волнового типа. Ассоциация же в отложениях остатков колониальных кораллов, губок и цианобионтов свидетельствует о связи обстановок формирования данных отложений с рифогенными образованиями, широко распространенными на Северном Кавказе в позднеюрское время. Таким образом можно сказать, что во время накопления верхнеюрских отложений исследуемого района в условиях мелководья

сосуществовали обстановки, а в ряде случаев чередовались обстановки спокойной и активной волновой гидродинамики, характерные для внешних частей зарифовых лагун. Для района горы Медвежьей, судя по наличию рифовых брекчий и оолитовых известняков, возможно накопление отложений и в условиях внешнего, верхнего склона рифового массива.

Базальная толща нижнего мела — запорожский горизонт, носит следы активизации тектонического режима, о чем говорит грубый по размерности и разнообразный состав ее обломочных пород. В шлифах представлены песчано-гравийные отложения полимиктового и кварц-полимиктового состава. Среди них многочисленны обломки известняков верхней юры (обр. 137/12), разнообразные осадочные и вулканические породы, как, отчасти юрского, так и более древнего возраста: разнообразные кремнистые породы, глинистые сланцы, кварцитопесчаники, вулканыты от базальтов и андезитов (обычно преобладают) до андезидацитов, дацитов (рис. 7, а, б) и редко — риолитов; интрузивные породы, чаще — гранитоидного состава и метаморфиты: кварциты и сланцы, редко — гнейсовидные породы.

Содержание полевых шпатов невелико — до 15 % и обычно увеличивается в более грубых разностях пород. Окатанность обломков неравномерная, преимущественно низкая и в целом ухудшается с уменьшением размерности зерен. Это может свидетельствовать о небольшой дальности переноса и его транспортировке потоками высокой активности (горные реки); накопление же отложений происходило в морских и прибрежно-морских условиях, подобных дельтам гильбертова типа [Galloway, 1975].

Вышележащие нижнемеловые отложения (свиты чепси, шишанская афипская, убинская) весьма близ-

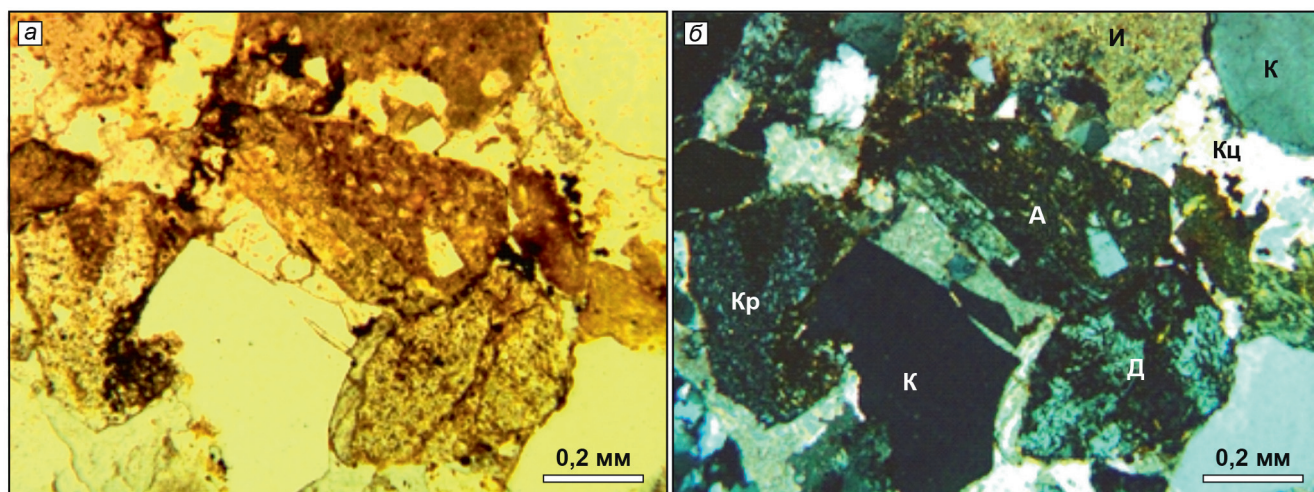


Рис. 7. Фото шлифа обр. 1112/4 без анализатора (а) и с анализатором (б), запорожская свита (K_{1zp}). Зерна кварца (К) разной окатанности, иногда слабо корродированы. Контакты обломков пород (известняков (И), андезитов (А), дацитов (Д), кремней (К)) часто конформные. Цемент поровый, кальцитовый, кристаллический (Кц)

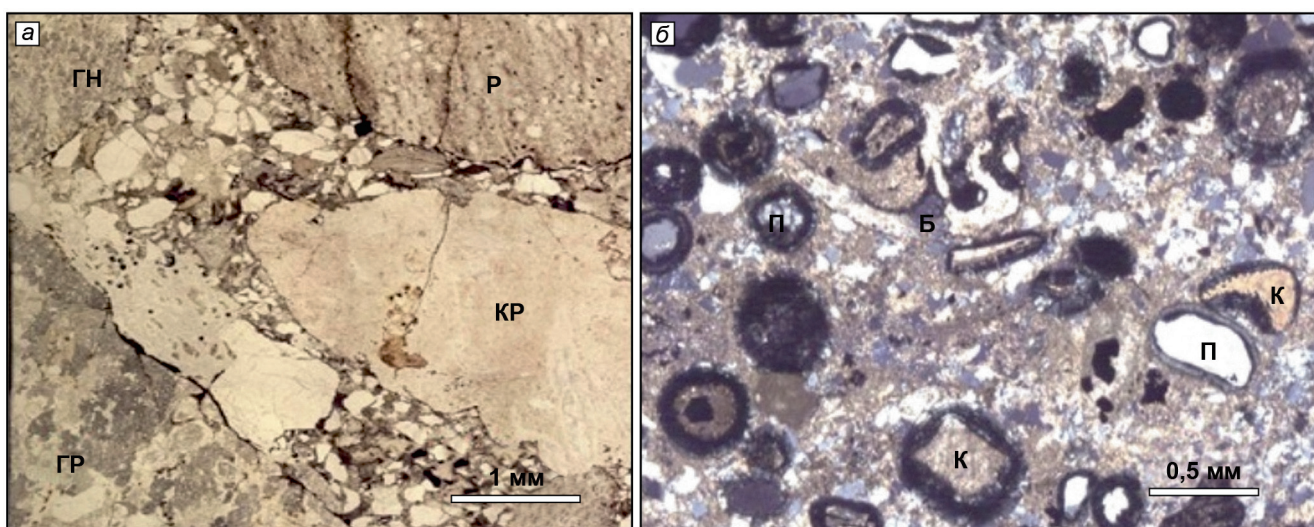


Рис. 8. Фото шлифов: а — обр. 580/4 без анализатора, афипская свита (K_{1af}), гравелит, в плохо сортированном песчаном матриксе — гравийные обломки кремнистых пород — радиоляритов (Р, КР), гнейсов (ГН) и гранитов (ГР) с сильно карбонатизированными плагиоклазами (КР), б — обр. 88/3 с анализатором, шишанская свита (K_{1ss}), песчаник мелко-тонкозернистый, известковый, с примесью оолитов, с примесью биокластов (Б) известняк. В оолитах с карбонатными (К) и песчаными (П) ядрами, оболочки замещены пирит-тонкокварцевым агрегатом

ки по литологическому составу. В низах свит — пачки песчаников, от средне- до мелко- и тонкозернистых, реже — грубо-крупнозернистых и гравелитов. Для этих песчаников характерен мезо- и олигомиктовый состав с набором литокластов, схожим с приведенным выше для песчаников запорожской свиты (рис. 8, а). В песчаниках иногда встречаются оолиты и биокласты (в мацмаловской и шишанской свитах) (рис. 8, б), однако оолиты обычно изменены и видимо, захоранивались в более глубоководных условиях, чем зона их образования. В афипской свите в гравелитистых песчаниках полевошпатовая составляющая возрастает до 20 %, возможно, из-за вскрытия эрозией в области сноса крупного интрузива гранитов.

Преобладающие в составе нижнемеловых толщ глинистые, алевроито-глинистые и известково-гли-

нистые породы в основном имеют темную окраску, тонкую слоистость, сравнительно невысокую степень биотурбации мелкими ходами, характерными для ихнофагии *Nereites*, что говорит об относительной глубоководности обстановок их образования. Иногда отмечается тонкая ритмичная слойчатость, связанная, по-видимому, с периодичностью выноса песчано-алевритового материала течениями, вероятно штормового генезиса (рис. 9, а). Фаунистические остатки в этих отложениях очень редки; в шлифах встречаются радиолярии, планктонные фораминиферы (рис. 9, б), единичные гастроподы (птероподы?) и остракоды. В осадке и, возможно, в придонных водах часто возникали восстановительные обстановки (без сероводородного их заражения), с которыми связано образование сидеритов. Глубины формирования нижнемеловых отложений можно оценить

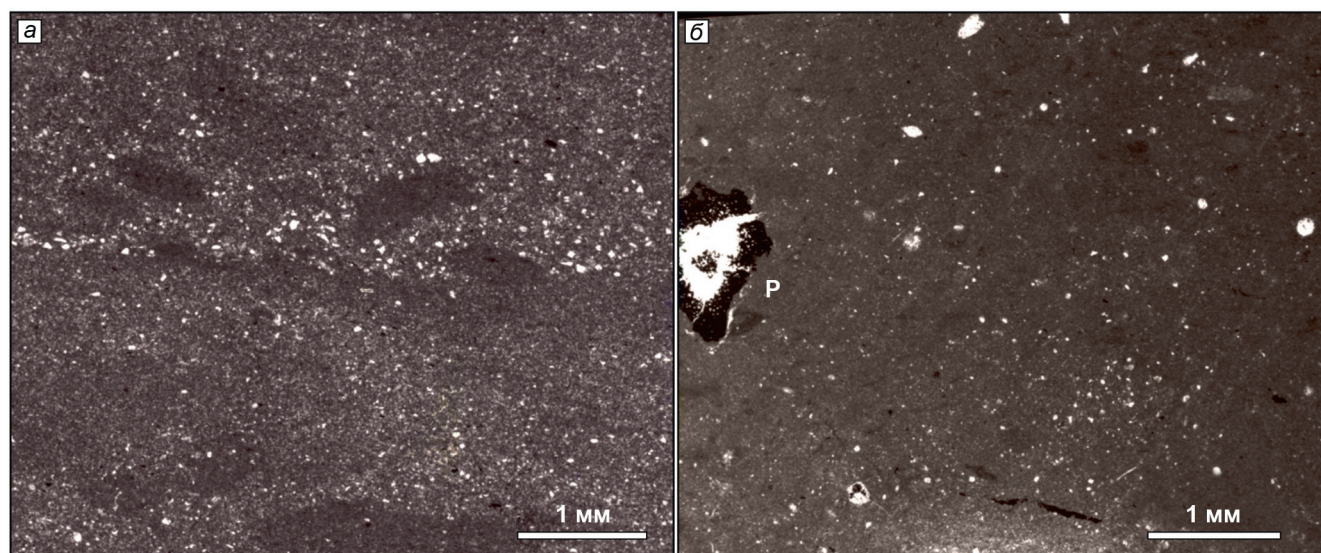


Рис. 9. Фото шлифов свиты чепси (K_{1cp}) без анализатора: а — шлиф обр. 1100/3, высокоглинистый известняк/мергель, ритмичность в породе проявляется в градиционном строении алевритистых прослоек, порода частично биотурбирована; б — шлиф обр. 100/1, сидерит, содержащий мелкие шаровидные, замещенные карбонатом радиолярии (Р), основная масса биотурбирована, имеет пятнистую окраску, частично пиритизирован

как ниже базиса штормовых волн и более глубоких обстановок.

Обстановки осадконакопления. Результаты литолого-фациальных исследований позволили установить обстановки осадконакопления на рубеже юры и мела для пихтарской свиты, запорожского горизонта и мачмаловской свиты. Оценивая комплекс результатов изучения отложений запорожского горизонта можно предполагать, что обстановки их осадконакопления наиболее соответствуют модели мелководной дельты в условиях развивающейся трансгрессии моря с начальным доминированием в процессах седиментации речного стока (рис. 10) [Galloway, 1975; Бхаттачария, Уолкер, 2017]. Слои конгломератов и гравелитов в основании запорожского горизонта фиксируют начальную стадию трансгрессивного цикла в берриасе. Образование отложений фронта дельты происходило как при участии течений, существовавших в бассейне, так и при гидродинамической активности потоков продельты [Аллен и др., 1990; Лидер, 1986].

На основании результатов исследования литологического состава пород, их последовательной смены в разрезе, а также особенностей состава их глинистых минералов предложена седиментологическая модель обстановок осадконакопления в изученном районе на границе юры и мела. Модель предполагает три основных этапа формирования отложений, приуроченных к трем различным обстановкам, которые сложились на данной территории: 1) титон — ранний берриас (пихтарская свита и запорожский горизонт); 2) берриас (мачмаловская и чаталовская свиты); 3) валанжин — апт (шишанская, чепси, афипская, убинская свиты). Соответственно установлено существование трех систем осадконакопления: карбонатной, карбонатно-терригенной и терригенной.

Осадконакопление в позднеюрско-раннемеловом бассейне имело циклический характер, что обуславливалось сменой тектонических режимов и палеоклиматическими условиями. Сочетание этих факторов привело к формированию как флишевых прогибов, так и развитию рифовых систем в пределах ограничивающих их поднятий. На севере вдоль Ахтырской шовной зоны сформировались рифы барьерного типа. Барьерный риф ограничивал позднеюрско-раннемеловой бассейн Северо-Западного Кавказа и существенно влиял на условия осадконакопления. В этом бассейне формировались флишеидные толщи большой мощности, которые существенно отличаются от одновозрастных зарифовых платформенных образований, имеющих значительно меньшую мощность и иное строение разреза. Рифы разрушались достаточно длительное время, а их обломки сносились в бассейн, образуя грубообломочные шлейфы вниз по зарифовому склону. Тектонические процессы, происходившие вдоль границы Скифской плиты на рубеже юры — мела вызвали ее погружение, что в свою очередь, привело к углублению трога Большого Кавказа, значительной трансгрессии и общему погружению бассейна [Милановский, Хаин, 1963].

Широкое распространение горизонтов, сложенных грубообломочным карбонатным и терригенным материалом в подошве берриаса (запорожский горизонт), валанжина (свита дерби), верхнего готерива (солодкинский горизонт) и баррема (фанарский горизонт) указывает на существование мощных источников сноса. Совокупность всех признаков (литологическая и палеонтологическая характеристика, характер напластования, сортировка, окатанность и др.) свидетельствуют о том, что образование грубообломочных горизонтов связано с мощными гравитационным перемещением масс обломочного

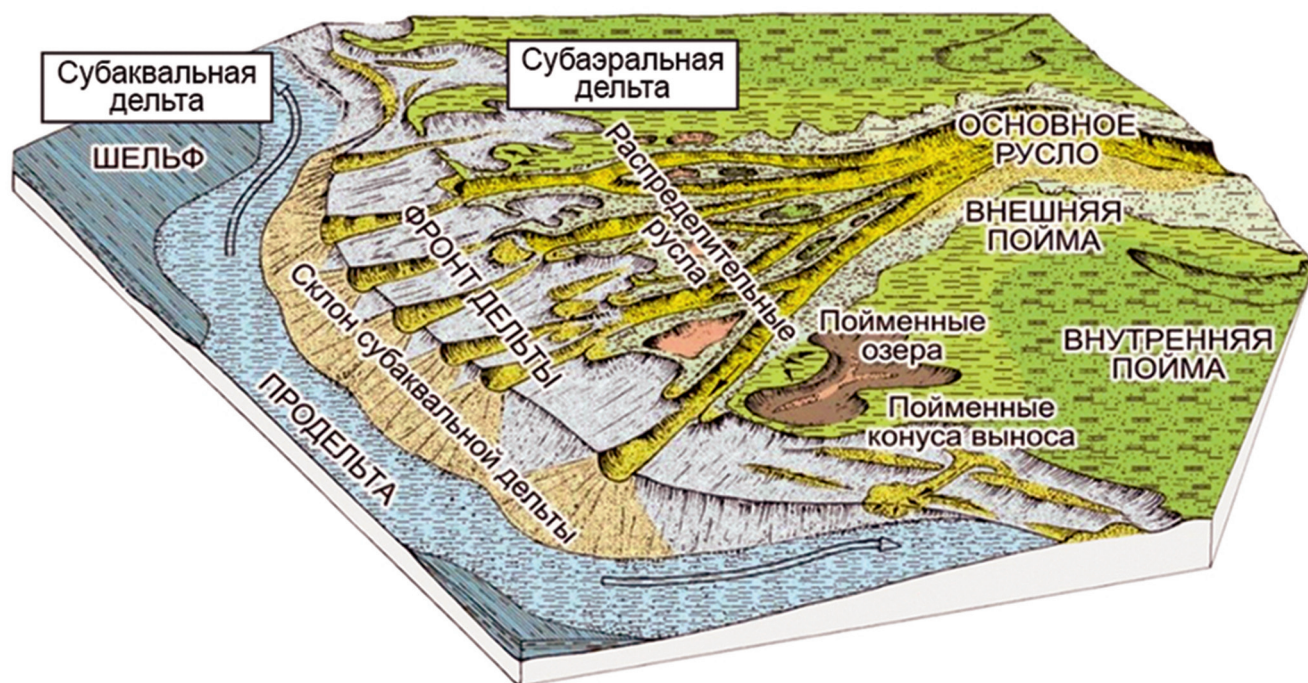


Рис. 10. Строение распределительной системы дельты по [Муромцеву, 1984] с изменениями и дополнениями [Жемчугова, 2014]

материала, вызываемого обвалами и оползнями на краю юрской карбонатной платформы [Корсаков и др., 2013]. Неокатанность обломков пород могла сохраниться только ниже базиса волнового воздействия при быстром захоронении материала [Breda et al., 2007]. Фациальная изменчивость слоев, непостоянство разрезов конгломератов и карбонатных брекчий могут быть связаны с периодическим обрушением края карбонатной платформы и с локальными донными потоками обломочных карбонатов [Tucker, Wright, 2002]. Преобладание в конгломератах известковых галек и присутствие крупных глыб органогенно-обломочного известняка свидетельствует о развитии рифовой зоны в широтном направлении на запад. Вероятно, что в междуречье рек Абин и Убин и далее на запад рифовые постройки не образовывали единый массив, а слагали цепочку островов. Крупные обломки верхнеюрских известняков присутствуют в базальных горизонтах нижнемеловых свит. Но встречаются они не только вблизи предполагаемого барьерного рифа, но и на значительном удалении от него. Следовательно, можно предположить, что помимо края платформы отдельные рифовые постройки располагались в пределах и внутришельфовой впадины, являясь в периоды усиления тектонической активности локальными поставщиками обломочного материала. Наряду с известняками разрушались и терригенные средне-верхнеюрские породы, и собственно нижнемеловые отложения, которые поставляли обломки глинистых пород, сидеритов, алевролитов и песчаников, образовавших внутриформационные грубообломочные толщи из конгломератов, гравелитов и песчаников. На близость суши, и ее роль как основного поставщика терригенного материала,

указывает насыщенность грубообломочных базальных горизонтов обуглившимися растительными остатками, свидетельствующими о развитии на суше растительного покрова [Фролов, 1993].

В пределах изучаемого участка не выявлено единого источника поступления обломочного материала, вероятнее всего их было: первый — северный, северо-восточный (Скифская плита), второй — гряда рифовых островов и третий — юго-восточный (района Большого Кавказа). Со Скифской плиты происходил снос значительного количества глинистого материала, что обусловлено двумя основными факторами — погружением плиты и изменением климата с аридного на гумидный. Обломки известняков сносились с гряды рифовых островов на севере и с юга с отдельных рифовых построек в виде островов. Данный источник перестал существовать в готериве, когда рифогенные постройки были полностью перекрыты вышележащими глинистыми осадками. О выносе материала с Кавказа можно судить по значительной (до ~20 %) примеси кварца, кварцитов, метаморфитов и вулканитов кислого и среднего-кислого состава. Обилие глинистого осадка также свидетельствует и о высокой скорости сноса [Фролов, 1993].

В пределах изучаемого района возможно существование трех систем осадконакопления: карбонатной, терригенной и карбонатно-терригенной. На первом этапе, в условиях трансгрессии, на бровке крутого склона (контролируемого крупным разрывным нарушением?) происходило формирование рифовых массивов, возможно, окаймленных отмелью. В периоды тектонической активности и вызванного этим резкого падения относительного уровня моря, карбонатные массивы выводились на поверхность

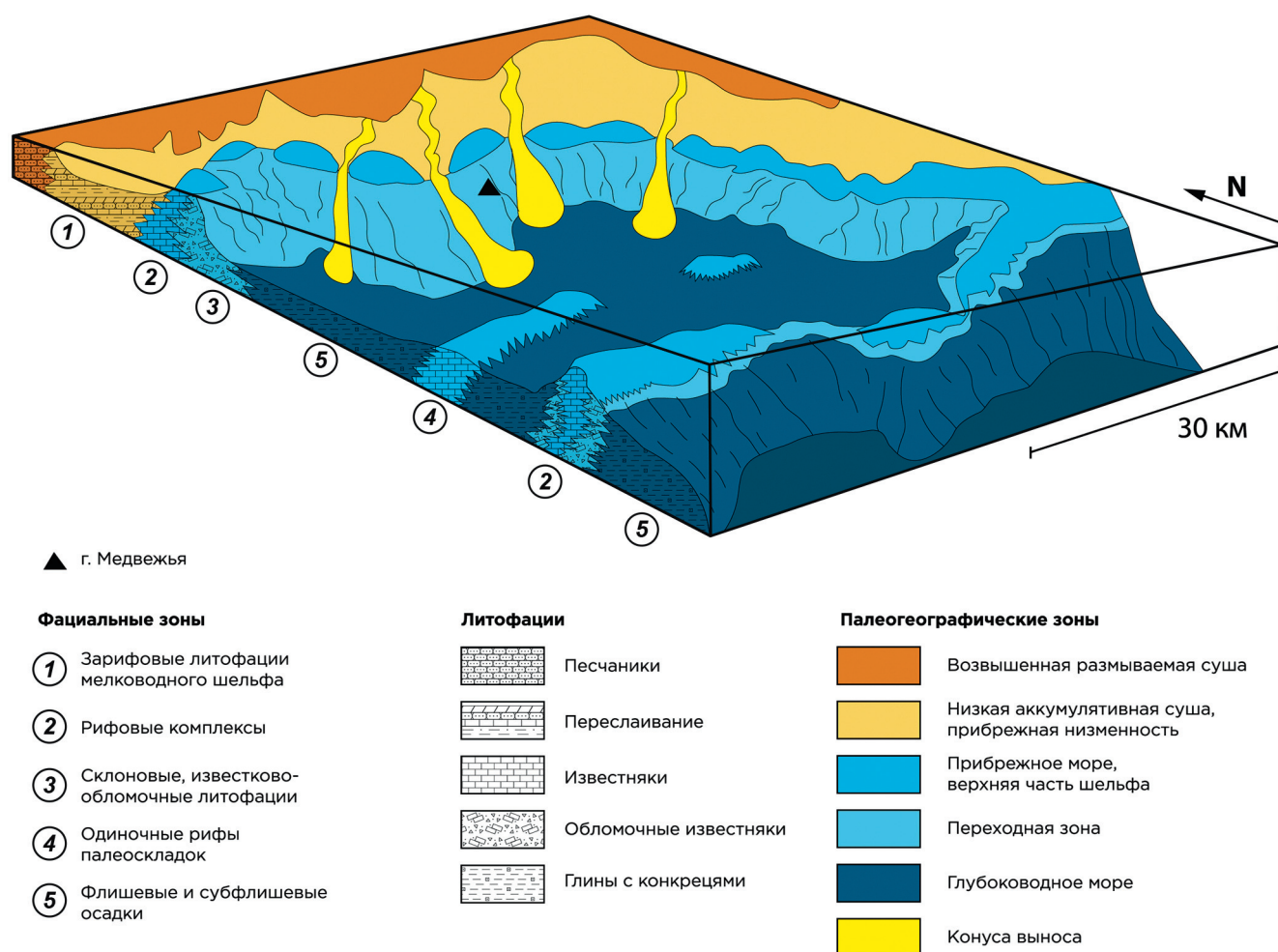


Рис. 11. Седиментационная модель палеобстановок в районе исследований на рубеже юры и мела

и подвергались сильной эрозии, что приводило к формированию шлейфа грубообломочных карбонатных пород. В этот период усиливается поступление терригенного материала с суши, формируя, тем самым, сложную, карбонатно-терригенную седиментационную систему гравитационных потоков.

Возможное существование в позднеюрско-раннемеловое время таких обстановок подтверждается существованием подобных систем, ранее описанных в литературе [Лидер, 1986; Wilson, 1975; Flügel, 2010]. Наиболее географически близким и изученным аналогом такого рода систем является район Горного Крыма, где установлено, что формирование толщ конгломератов верхнеюрских отложений горы Пахкал-Кая происходило в условиях образования дельты гильбертова типа на крутом краю карбонатной платформы, а образование карбонатного массива и его разрушение с формированием грубообломочных склоновых фаций и дополняющих их дельтовых происходило на последующих стадиях [Барабошкин и др., 2010].

Таким образом, в поздней юре осадконакопление происходило в относительно мелководном морском тепловодном бассейне, обладающим условиями, подходящими для роста карбонатных рифовых по-

строек, которые к концу юры покрывали значительную часть территории Северо-Западного Кавказа (рис. 11). С юга эти постройки были ограничены северным бортом трога Большого Кавказа [Егоян, 1964].

В начале раннего мела, с общим подъемом территории, происходило быстрое разрушение карбонатных построек, а также формирование речной сети с дельтами гильбертова типа. Породы разрушенных карбонатных построек заполняли на юге трог Большого Кавказа, образуя толщ известняковых брекчий и конгломератов (запорожский горизонт), сменяющихся фациально изменчивыми карбонатно-терригенными толщами берриаса (мачмаловская и чаталовская свиты), которые к валанжину перекрываются относительно глубоководными флишеидными, в основном глинистыми отложениями.

Выводы. В результате проведенных реконструкций условий осадконакопления были установлены палеобстановки седиментации, существовавшие на рубеже юры и мела в палеобассейне Северо-Западного Кавказа. Активизация тектонических процессов в это время привела к разнонаправленным движениям Земной коры, что обусловило возникновение и существование следующих палеобстановок.

1. В поздней юре осадконакопление проходило в мелководно-морском тепловодном бассейне, имевшем благоприятные условия для роста карбонатных рифовых построек, которые к концу юры покрывали значительную часть территории Северо-Западного Кавказа. Эти постройки располагались на границе эпиконтинентального бассейна Скифской плиты и северного борта глубоководного трога Большого Кавказа.

2. В начале раннего мела с общим подъемом территории и значительной регрессией происходило быстрое разрушение карбонатных построек, а также формирование речной сети с дельтами гильбертова типа. Породы разрушенных карбонатных построек заполняли впадину трога Большого Кавказа, образуя толщи известняковых брекчий и конгломератов, которые к середине берриаса перекрываются глубоководными карбонатно-терригенными толщами с преобладанием глинистых пород. Обилие терригенного осадка также свидетельствует и о высокой скорости сноса.

3. Активизация тектонических процессов на границе юры — мела привела к значительной трансгрессии и общему погружению бассейна. На фоне дальнейшего погружения трога Большого Кавказа, происходило углубление и соседних территорий, где до этого времени в поздней юре шло формирование рифогенных построек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аллен Ф.А., Болдуин К.Т., Дженкинс Х.К. и др. Обстановка осадконакопления и фации. Т. 1. М.: Мир, 1990. 384 с.

Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н. Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона. М.: Научный мир, 2007. 172 с.

Бабаринова Г.Б., Микерина Т.Б. Перспективы нефтегазоносности карбонатных комплексов в Хадыженской кордильере // Геология нефти и газа. 1989. № 10. С. 40–45.

Барбошкин Е.Ю., Пискунов В.К. Строение и условия формирования верхнеюрских отложений района г. Пахкал-Кая (Крым) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 1. С. 17–25.

Бурлин Ю.К. Литолого-фациальные особенности нижнемеловых отложений Северо-Западного Кавказа и Западного Предкавказья. Тр. КЮГЭ. Т. 20. М.: АН СССР, 1961. 394 с.

Бхаттачария Д.П., Уолкер Р.Д. Дельты // Фациальные модели / Под ред. Р.Д. Уолкера. М.; Ижевск: Ин-т комп. иссл.-ний. 2017. С. 346–393.

Егоян В.Л. Черк стратиграфии нижнего мела Северо-Западного Кавказа. Тр. КФ ВНИИнефть, вып.12. М.: Недра, 1964. С. 118–153.

Жемчугова В.А. Практическое применение резервуарной седиментологии при моделировании углеводородных систем: Учебное пособие для вузов. М.: Рос. гос. у-т нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. 344 с.

Корсаков С.Г., Семенуха И.Н., Белуженко Е.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. 2-е изд. Серия Кавказская. Лист L-37-XXVII, Объяснительная записка. М., 2013. 216 с.

4. Вероятно существовало три источника сноса обломочного материала: северный, северо-восточный на Скифской плите со стороны Ставропольского поднятия, второй — рифовые острова вдоль южного края Скифской плиты и с востока со стороны карбонатной платформы, третий (в меньшей степени) — с юго-востока (острова района нынешнего Большого Кавказа).

4. Берриас — альбские отложения, в основном, представлены темноцветными глинами с конкрециями и линзовидными прослоями сидеритов. Все эти толщи имеют очень схожий литологический состав и накапливались в условиях относительно глубоководного бассейна, о чем свидетельствует темная окраска, тонкая слоистость, а также сравнительно невысокая степень биотурбированности отложений. Характерны ихнофации *Scolithos* и *Nereites*, что также говорит о сравнительной глубоководности их образования.

Благодарности. Авторы признательны рецензентам за внимательное прочтение нашей статьи, что позволило улучшить ее текст, а также сотрудникам лабораторий геологического факультета МГУ за помощь в обработке и интерпретации полученного материала.

Финансирование. Работа выполнена по теме государственного задания геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, а также госзадания ГИН РАН.

Лидер М. Р. Седиментология. Процессы и продукты. М.: Мир, 1986. 439 с.

Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. М.: Изд-во Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 2008. С. 191–224.

Микерина Т.Б. Циклы седиментогенеза и закономерности накопления органического вещества в мезо-кайнозойских отложениях Западного Предкавказья и Северо-Западного Кавказа // Геология нефти и газа. 2019. № 2. С. 73–83.

Милановский Е.Е., Хаин В.Е. Очерки региональной геологии СССР. Геологическое строение Кавказа. М.: Изд-во МГУ, 1963. 378 с.

Модвилко Т.А. Нижнемеловые отложения Северного Кавказа и Предкавказья. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 258 с.

Муромцев В. С. Электрометрическая геология песчаных тел — литологических ловушек нефти и газа. Л.: Недра, 1984. 260 с.

Пинчук Т.Н., Попков И.В. Нефтегазоносность Северо-Западного Кавказа // Геология, география и глобальная энергия. 2013. № 3 (50). С. 79–92.

Суслова Э.Ю. Нефтематеринский потенциал юрских и меловых отложений Западного Предкавказья: Автореф. ... дисс. к. геол.-мин. н. М., 2006. 23 с.

Фролов В.Т. Генетическая типизация морских отложений. М.: Изд-во МГУ, 1984. 222 с.

Фролов В.Т. Литология: Учебное пособие. Кн. 2. М.: Изд-во МГУ, 1993. 432 с.

Яковичин С.Ю., Бордунов С.И., Гусев А.В. и др. Обстановка осадконакопления и коллекторские свойства

фанарского горизонта нижнего мела Северо-Западного Кавказа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024а. № 5. С. 73–82.

Яковишин С.Ю., Бордунов С.И., Косоруков В.Л., Яковичина Е.В. Условия седиментации и экранирующие свойства глинистых отложений нижнего мела Северо-Западного Кавказа // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024 б. № 3. С. 42–53.

Breda A., Mellere D., Massari F. Facies and processes in a Gilbert-delta-filled incised valley (Pliocene of Ventimiglia, NW Italy) // Sed. Geol. 2007. Vol. 200. P. 31–55.

Dunham R.J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture // Classification of Carbonate Rocks. Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol. 1962. Vol. 1. P. 108–121.

Galloway W.E. Process framework for distributing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems // Deltas, models for exploration / Ed. M.I. Broussard. Houston TX, Houston Geological Society. 1975. P. 87–98.

Flügel E. Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. Second Edition. Berlin: Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 929 p.

Tucker M.E., Wright V.P. Carbonate sedimentology. Oxford: Alden Group, 2002. 483 p.

Wilson J. Carbonate facies in geologic history. N.Y.: Springer-Verlag, 1975. 471 p.

Статья поступила в редакцию 13.10.2024,
одобрена после рецензирования 30.10.2024,
принята к публикации 23.05.2025

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-2-145-152

ФТОР В ПОВЕРХНОСТНЫХ И ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Алла Витальевна Савенко¹, Виталий Савельевич Савенко²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; alla_savenko@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vitya_savenko@rambler.ru

Аннотация. Определено содержание фтора в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья, являющегося зоной сопряжения Мезенской синеклизы и Балтийского щита. Установлено, что обследованные воды характеризуются низким содержанием фтора, сильно отличающимся от физиологически оптимального диапазона, за исключением вод из скважины 27 в долине р. Золотицы. Уровень концентраций фтора близок к таковому для вод питьевого назначения смежных территорий Архангельской области с иной литогенной основой. Это позволяет предположить определяющую роль климатического фактора в распространности фтора в поверхностных и пресных подземных водах региона — действующих и потенциальных источниках питьевого водоснабжения.

Ключевые слова: фтор, речные воды, пресные подземные воды, химический состав, питьевое водоснабжение, Архангельская область

Для цитирования: Савенко А.В., Савенко В.С. Фтор в поверхностных и пресных подземных водах Архангельской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 2. С. 145–152.

FLUORINE IN SURFACE AND FRESH GROUNDWATER OF THE ARKHANGELSK REGION

Alla V. Savenko¹, Vitaly S. Savenko²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; alla_savenko@rambler.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vitya_savenko@rambler.ru

Abstract. The fluorine content in river and fresh groundwater of the South-Eastern White Sea area, which is the conjugation zone of the Mezen syncline and the Baltic Shield, was determined. It was established that the studied waters are characterized by a low fluorine content, very different from the physiologically optimal range, with the exception of waters from well 27 in the Zolotitsa River valley. The level of fluorine concentrations is close to that for drinking water in adjacent territories of the Arkhangelsk Region with a different lithogenic base. This suggests the determining role of the climatic factor in the fluorine prevalence in surface and fresh groundwater in the region, which serves as current and potential sources of drinking water supply.

Keywords: fluorine, river water, fresh groundwater, chemical composition, drinking water supply, Arkhangelsk Region

For citation: Savenko A.V., Savenko V.S. Fluorine in surface and fresh groundwater of the Arkhangelsk Region. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 2: 145–152 (In Russ.).

Введение. Фтор влияет на функционирование и развитие любых форм жизни на Земле: человека, животных, растений и микроорганизмов [Weinstein, Davison, 2004; Агалакова, Гусев, 2011; Иорданишвили, 2019]. В основе столь широкого проявления физиологических функций фтора, по-видимому, лежит «биохимический изоморфизм» гидроксил- и фторид-ионов, обусловленный близостью их физико-химических свойств, включая размер и склонность к комплексообразованию. Например, в результате образования прочных комплексных соединений фтор контролирует активность многочисленных ферментов, содержащих магний, кальций и железо [Агалакова, Гусев, 2011; Горностаева, Фукс, 2017; Жукова и др., 2017]. Недостаток и избыток фтора в организме человека относительно оптимума приводит к возникновению двух групп заболеваний,

называемых соответственно гипо- и гиперфторозами [Авцын и др., 1991]. Для их предотвращения концентрация фтора в питьевой воде — главном источнике усвояемого фтора — должна соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям, находясь в интервале от 0,7 до 1,5 мг/л [СанПиН..., 2021]. Очевидно, что содержание фтора в поверхностных и подземных водах питьевого назначения является важной эколого-гигиенической характеристикой окружающей среды.

Несмотря на то, что распространенность фтора в водах питьевого назначения послужила предметом многочисленных исследований, например [Габович, Минх, 1979; Сазонов, 2000; Янин, 2007; Edmunds, Smedley, 2013; Ali et al., 2016; Fuge, 2019], до сих пор остается ряд недостаточно изученных в этом отношении территорий, в том числе обширные площади

Российской Арктики, хозяйственное освоение которых в настоящее время идет нарастающими темпами. Цель настоящей работы заключалась в определении современного содержания фтора в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья, а также фторидного эколого-гигиенического статуса поверхностных и пресных подземных вод Архангельской области — действующих и потенциальных источников питьевого водоснабжения.

Материалы и методы исследований. Характеристика объектов исследований. Юго-Восточное Беломорье расположено в пределах Беломорско-Кулойского плато и Архангельской низины и представляет собой северо-западную часть Северо-Двинского артезианского бассейна (Мезенской синеклизы в зоне ее сопряжения с Балтийским щитом). Протекание процессов осадконакопления и денудации в условиях сильной геодинамической активности этой территории, а также опускание восточных и поднятие западных частей Мезенской синеклизы при отсутствии четко выраженных водоупоров между водоносными горизонтами способствовало проникновению инфильтрационных вод на значительные глубины и привело к формированию как пресных, так и минерализованных вод во вмещающих породах разных возрастов [Малов, 2003; Malov, 2018].

В качестве материала для исследования были использованы пробы поверхностных и пресных подземных вод Юго-Восточного Беломорья, отобранные по нашей просьбе в 2012–2014 гг. сотрудником ФИЦ комплексного изучения Арктики УрО РАН А.И. Маловым. Обследовались реки Золотица, Белая, устьевой участок Северной Двины, а также четвертичные, каменноугольные, кимберлитовые и вендские водоносные горизонты с несколькими повторностями для большинства точек (скважин), расположение которых показано на рис. 1.

Методы исследований. Вначале, до контакта с атмосферой измеряли величину pH отобранных вод, после чего отфильтровывали их через мембранный фильтр с диаметром пор 0,45 мкм и помещали в герметично закрывающиеся полипропиленовые пробирки объемом 50 мл для лабораторных анализов. Содержание фтора определяли методом прямой потенциометрии с фторидным ионоселективным электродом «Элит-221» и хлорсеребряным электродом сравнения в присутствии ацетатного солевого буфера [Савенко, 1986]; концентрации главных катионов, хлоридов и сульфатов — методом капиллярного электрофореза [Комарова, Каменцев, 2006], щелочность $\text{Alk} \approx \text{HCO}_3^-$ — объемным ацидиметрическим методом. Погрешность измерений не превышала 0,05 pH, $\pm 2\%$ для фтора и $\pm 3\%$ для компонентов основного солевого состава. Предел обнаружения фтора составил 0,02 мг/л.

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты определений величины pH, содержания фтора и компонентов основного солевого состава в речных и пресных подземных водах Юго-Восточ-

ного Беломорья представлены в табл. 1. Концентрация фтора в речных водах изменяется от 0,05 до 0,18 мг/л, причем среднее значение для устьевого участка Северной Двины (0,13 мг/л) заметно превышает таковое для малых рек Золотицы и Белой (0,09 и 0,07 мг/л). Причина отмеченных различий, по-видимому, состоит в том, что водосборы указанных малых рек в целом расположены севернее по сравнению с водосбором Северной Двины, а с возрастанием суровости климата интенсивность процессов мобилизации растворенных веществ должна уменьшаться.

Средние концентрации фтора в пресных подземных водах из разных водоносных горизонтов близки между собой и находятся в интервале $0,19 \pm 0,03$ мг/л при общем диапазоне наблюдаемых значений 0,05–0,41 мг/л. Только в одной точке вендского водоносного горизонта (скважина 27) содержание фтора составляет 1,16 (0,97–1,35) мг/л, достигая эколого-гигиенического оптимума. По величине pH и ионному составу, за исключением небольшого превышения концентраций бикарбонатов и натрия, воды из скважины 27 не выходят за характерные для венда пределы, однако, по данным [Malov, 2024], помимо фтора, они также сильно обогащены бором и молибденом. Возможно, указанная аномалия связана с расположением вблизи точки пробоботбора рудопроявлений, что нуждается в дополнительном изучении.

Вычисленные для всего массива данных коэффициенты корреляции содержания фтора с величиной pH и концентрациями компонентов основного солевого состава (табл. 2) показывают слабую положительную связь фтора с pH ($r = 0,65$), минерализацией ($r = 0,60$) и бикарбонатами ($r = 0,65$). Значимость корреляций фтора с натрием, калием, хлоридами и сульфатами еще меньше, а с магнием и кальцием близка к нулю. Отсутствие тесной взаимосвязи концентраций фтора и других растворенных компонентов может быть обусловлено тем, что в настоящей работе обследовались разнородные водные объекты. Это предположение частично подтверждается расчетом аналогичных корреляционных связей для отдельных типов вод (см. табл. 2). Так, в речных водах содержание фтора плотно положительно коррелирует с минерализацией и концентрациями компонентов основного солевого состава. В водах четвертичных водоносных горизонтов такая же плотная, но отрицательная корреляция проявляется между фтором, с одной стороны, и хлоридами, сульфатами, натрием и калием, с другой. В водах каменноугольных водоносных горизонтов фтор, наоборот, тесно положительно связан с pH, минерализацией и всеми компонентами основного солевого состава, исключая хлориды. Однако в подземных водах венда корреляционные связи фтора выражены слабо: наибольшее значение коэффициента корреляции $r = 0,64$ наблюдается между фтором и бикарбонатами. Поскольку пробы из вендского водоносного

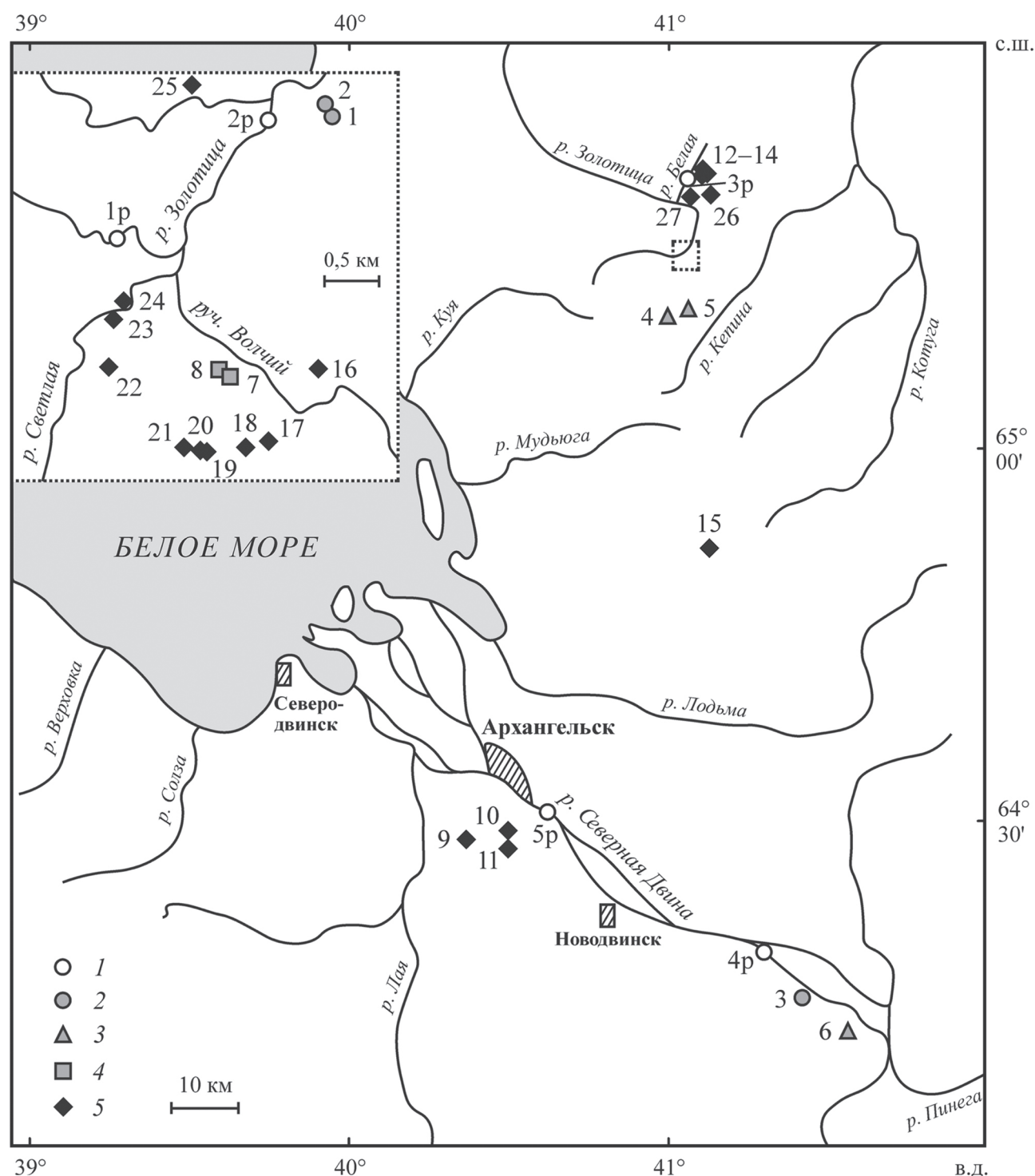


Рис. 1. Расположение мест отбора проб (и их номера) речных (1) и пресных подземных вод четвертичных (2), каменноугольных (3), кимберлитовых (4) и вендских (5) водоносных горизонтов на территории Юго-Восточного Беломорья в 2012–2014 гг.

горизонта составляют более 2/3 общего количества проанализированных образцов, именно они формируют общую картину корреляционных зависимостей. Тем не менее, неоднократно отмечавшаяся в литературе тенденция увеличения концентрации фтора с ростом pH все же прослеживается (рис. 2).

Установленные низкие концентрации фтора в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья согласуются с определениями

этого элемента в водах крупных и средних рек Юго-Восточного побережья Белого моря, а также в малых реках и грунтовых водах юга Архангельской области (табл. 3). Таким образом, имеются все основания утверждать, что содержание фтора в поверхностных и подземных водах Архангельской области, потенциально пригодных для питьевого водоснабжения, в несколько раз меньше нижнего предела эколого-гигиенического оптимума. Отсю-

Таблица 1

Величины рН, минерализации, содержание фтора и компонентов основного солевого состава
в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья

Номер точки или сква- жины* / глубина, м	Дата отбора	pH	Минерализа- ция М, мг/л	Концентрации в растворе, мг/л							
				F	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	K	Mg	Ca
Речные воды											
1р (R1) / 0,1	04.2013	7,53	77,0	0,05	5,41	2,94	50,3	7,85	0,62	4,16	5,67
	05.2014	7,50	84,5	0,07	8,22	4,20	48,8	13,3	0,80	3,12	6,06
	09.2014	7,60	185	0,11	16,9	6,93	111	26,4	1,27	7,39	15,1
2р (R2) / 0,1	04.2013	7,85	196	0,06	16,8	9,13	122	29,5	1,67	7,91	9,19
	04.2014	7,80	136	0,08	19,0	8,35	68,6	26,3	1,13	4,54	8,14
	05.2014	7,70	181	0,11	22,4	11,2	97,6	29,3	1,24	6,20	13,2
09.2014	7,70	380	0,18	74,1	24,2	162	82,5	2,68	11,9	23,0	
3р (R3) / 0,1	04.2013	7,70	151	0,07	5,70	5,82	108	3,31	1,15	12,1	14,6
4р / 0,1	04.2014	7,70	141	0,08	24,6	10,1	68,6	24,6	1,06	4,39	8,03
	05.2014	7,60	193	0,14	25,1	11,3	104	30,7	1,29	6,68	14,1
	09.2014	7,70	367	0,17	70,2	23,6	160	76,5	2,51	11,3	22,6
5р / 0,1	04.2014	7,50	145	0,08	26,7	10,7	67,9	26,0	1,08	4,61	8,32
	05.2014	7,50	185	0,11	25,4	10,3	96,1	30,9	1,31	6,73	14,8
	09.2014	7,60	363	0,18	69,4	23,4	159	75,7	2,43	11,2	22,0
Среднее		7,64	199	0,11	29,3	11,6	102	34,5	1,45	7,30	13,2
Подземные воды четвертичных водоносных горизонтов											
1 (8q) / 20	05.2014	7,80	233	0,18	12,4	12,0	154	24,0	2,23	9,57	19,1
2 (9q) / 20	05.2014	7,70	272	0,22	28,7	14,2	156	37,2	3,22	10,4	22,6
3 (II) / 20	09.2013	7,80	793	0,11	237	81,5	214	177	5,57	31,8	46,0
	04.2014	7,80	463	0,21	3,26	26,3	322	9,15	2,28	33,6	66,5
Среднее		7,78	440	0,18	70,3	33,5	212	61,8	3,33	21,3	38,6
Подземные воды каменноугольных водоносных горизонтов											
4 (2o) / 20	05.2014	7,50	171	0,10	5,35	4,77	122	7,28	0,35	11,3	20,1
5 (3u) / 40	05.2014	7,70	285	0,11	8,11	11,9	196	23,6	1,35	15,1	28,5
6 (Mk) / 40	09.2012	8,20	678	0,22	1,74	136	380	54,7	7,71	24,9	73,0
	04.2013	8,20	543	0,20	20,4	154	233	52,0	7,73	23,8	51,5
Среднее		7,90	419	0,16	8,90	76,7	233	34,4	4,29	18,8	43,3
Подземные воды кимберлитовых водоносных горизонтов											
7 (Ae) / 80	04.2013	8,70	320	0,15	19,2	11,0	206	59,7	4,68	9,58	9,89
8 (Ac) / 90	04.2013	9,10	596	0,29	117	38,4	255	174	3,39	4,26	4,02
Среднее		8,90	458	0,22	68,1	24,7	231	117	4,04	6,92	6,96
Подземные воды вендских водоносных горизонтов											
9 (Is) / 40	09.2012	–	253	0,17	12,6	3,36	181	6,69	3,82	16,3	28,7
	04.2013	7,60	490	0,17	106	42,2	200	98,8	3,96	15,6	24,3
10 (Le) / 60	04.2013	7,60	183	0,10	3,95	3,35	137	6,85	3,20	12,9	15,5
11 (Le1) / 60	09.2012	8,20	209	0,18	0,09	2,19	159	6,96	6,24	13,2	21,7
12 (KoR) / 60	09.2012	8,00	227	0,10	4,73	3,67	171	2,03	2,41	16,1	27,2
13 (KoL) / 60	09.2012	8,10	219	0,11	2,89	3,75	163	11,0	2,76	14,4	21,5
14 (Ko2) / 60	09.2013	8,30	233	0,09	19,3	9,04	146	24,0	2,36	14,7	17,4
15 (Ch) / 120	09.2012	8,20	251	0,11	12,5	6,43	177	15,7	2,74	16,4	19,9
	04.2013	7,80	235	0,05	1,10	0,60	181	18,5	2,86	15,0	15,9
16 (36d) / 140	09.2012	8,56	329	0,20	15,0	11,9	217	55,3	3,11	11,6	15,3
	04.2013	8,50	326	0,18	27,5	15,9	200	57,1	3,20	10,8	12,1
	09.2013	8,55	332	0,21	22,7	15,1	212	56,4	3,20	10,8	12,2
	04.2014	8,40	348	0,25	23,6	18,2	220	49,7	3,21	10,7	22,7
	05.2014	8,15	336	0,24	19,1	14,7	215	47,1	3,35	11,9	24,6
	09.2014	8,20	321	0,28	22,3	16,2	194	51,7	3,22	10,8	22,7

Номер точки или скважины / глубина, м	Дата отбора	pH	Минерализация M , мг/л	Концентрации в растворе, мг/л							
				F	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	K	Mg	Ca
17 (28d) / 120	09.2012	8,54	262	0,09	2,93	5,93	194	25,1	5,07	13,7	15,7
	04.2013	8,70	234	0,14	5,21	7,50	168	21,4	4,98	13,7	13,7
	09.2013	8,60	239	0,12	5,44	8,39	172	20,8	5,01	13,7	13,8
	05.2014	8,60	268	0,17	3,25	8,78	197	18,9	1,54	13,5	25,2
	09.2014	8,24	270	0,15	2,84	7,75	195	22,6	1,81	14,6	25,0
18 (26d) / 140	09.2012	8,13	347	0,15	23,6	13,2	220	59,1	3,47	12,1	16,4
	04.2013	8,50	313	0,14	28,5	15,5	185	55,1	3,53	12,0	13,5
	09.2013	8,60	325	0,21	34,4	14,5	192	55,0	3,52	11,8	13,5
	04.2014	8,30	365	0,21	38,7	18,9	214	54,8	3,60	11,5	24,3
	05.2014	8,03	336	0,25	34,8	17,1	192	49,4	3,74	12,7	26,2
	09.2014	8,06	300	0,20	26,9	14,7	174	39,4	3,68	13,7	27,7
19 (24d) / 140	09.2012	8,64	307	0,23	12,1	12,3	203	60,6	3,02	6,59	9,62
20 (22d) / 140	09.2012	8,63	451	0,20	79,8	31,0	203	113	3,96	9,46	10,8
	04.2013	8,45	480	0,17	72,7	30,5	226	118	5,96	13,1	13,8
	09.2013	–	410	0,24	72,5	27,8	194	93,8	3,94	8,68	9,29
	05.2014	8,50	395	0,34	41,6	29,7	214	83,8	3,89	8,16	14,7
	09.2014	8,40	353	0,31	33,3	20,2	203	70,8	3,77	7,62	14,2
21 (21d) / 180	09.2012	8,65	583	0,19	138	46,3	210	153	4,96	14,3	16,7
	04.2013	8,35	669	0,24	172	56,6	229	177	5,28	15,2	14,8
	09.2013	8,60	719	0,16	174	64,7	239	199	6,52	18,8	17,7
	04.2014	8,70	647	0,24	178	56,2	206	157	5,39	16,0	28,8
	05.2014	8,17	681	0,23	195	59,9	206	170	5,47	16,0	28,5
	09.2014	8,32	641	0,26	179	57,8	206	155	5,23	14,8	24,0
22 (10d) / 140	09.2012	9,16	387	0,19	26,8	22,4	224	101	4,22	3,78	3,91
	04.2013	9,15	389	0,27	51,7	26,0	201	97,8	4,48	3,93	3,66
	09.2013	9,10	401	0,18	48,3	23,3	218	98,3	4,66	4,10	3,85
	04.2014	9,10	387	0,23	38,9	25,6	217	85,5	5,00	6,10	9,34
	05.2014	9,08	373	0,26	29,5	23,5	220	80,0	4,99	6,20	9,52
	09.2014	9,03	366	0,26	26,6	23,2	218	77,0	4,88	6,33	9,66
23 (6d) / 180	09.2012	8,91	715	0,25	160	82,9	238	216	4,74	6,47	6,39
	04.2013	9,00	762	0,41	194	78,9	242	229	4,95	6,20	5,61
	09.2013	8,90	760	0,18	179	77,7	253	221	9,45	10,6	9,73
	04.2014	9,10	732	0,40	178	76,1	249	210	5,03	5,24	8,49
	05.2014	9,06	748	0,26	190	80,9	244	214	5,10	5,42	9,06
	09.2014	9,02	704	0,31	155	75,6	247	207	5,14	5,81	8,93
24 (4d) / 150	09.2012	9,03	613	0,25	118	56,4	242	184	5,18	3,59	3,47
	04.2013	9,20	625	0,38	129	49,7	250	183	5,60	3,99	3,43
	09.2013	9,10	686	0,20	150	61,1	249	209	7,12	5,29	4,62
	04.2014	9,00	638	0,31	141	50,8	244	183	6,13	5,25	7,98
	09.2014	8,89	646	0,33	138	53,0	247	187	6,15	5,24	8,91
25 (9mz) / 200	05.2014	7,60	725	0,26	189	77,4	210	212	5,03	10,1	20,7
26 (16h) / 180	09.2012	–	392	0,35	42,9	17,1	218	75,3	9,14	15,3	14,1
	04.2013	8,55	939	0,13	272	140	214	282	8,58	12,9	9,82
27 (Lo) / 180	09.2012	–	792	1,21	168	41,2	320	248	6,37	4,51	3,33
	05.2013	9,15	811	1,11	165	57,3	314	262	6,10	4,15	2,71
	05.2014	9,00	828	1,35	201	48,4	313	251	5,98	3,60	5,26
	09.2014	9,15	742	0,97	149	35,2	313	225	6,80	5,13	7,36
Среднее без скв. 27		8,54	446	0,22	74,2	33,0	208	101	4,53	10,8	15,2
Среднее для скв. 27		9,13	793	1,16	171	45,5	315	247	6,31	4,35	4,67

Примечание. * В скобках указаны номера точек (скважин) отбора проб согласно [Malov, 2018].

Таблица 2

Корреляционные связи содержания фтора с величиной рН, минерализацией и концентрациями компонентов основного солевого состава в речных и пресных подземных водах Юго-Восточного Беломорья*

Компонент	рН	М	F	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	K	Mg	Ca
Все пробы речных и пресных подземных вод*, n = 82										
рН	1									
М	0,57	1								
F	0,65	0,60	1							
Cl	0,40	0,90	0,44	1						
SO ₄	0,36	0,86	0,41	0,72	1					
HCO ₃	0,66	0,74	0,65	0,40	0,60	1				
Na	0,61	0,94	0,58	0,95	0,75	0,55	1			
K	0,64	0,75	0,51	0,57	0,70	0,70	0,66	1		
Mg	−0,30	0,14	−0,19	−0,01	0,21	0,32	−0,16	0,19	1	
Ca	−0,38	0,07	−0,09	−0,14	0,25	0,32	−0,26	0,06	0,87	1
Речные воды, n = 14										
рН	1									
М	0,25	1								
F	0,01	0,92	1							
Cl	0,12	0,95	0,91	1						
SO ₄	0,19	0,97	0,91	0,99	1					
HCO ₃	0,35	0,95	0,83	0,82	0,85	1				
Na	0,18	0,96	0,91	0,99	0,98	0,84	1			
K	0,33	0,99	0,86	0,94	0,95	0,95	0,96	1		
Mg	0,33	0,81	0,66	0,65	0,68	0,91	0,63	0,81	1	
Ca	0,13	0,94	0,92	0,85	0,86	0,94	0,84	0,90	0,88	1
Подземные воды четвертичных водоносных горизонтов, n = 4										
рН	1									
М	0,44	1								
F	−0,54	−0,81	1							
Cl	0,25	0,89	−0,92	1						
SO ₄	0,39	0,98	−0,89	0,96	1					
HCO ₃	0,47	0,41	0,08	−0,05	0,21	1				
Na	0,21	0,86	−0,92	1,00	0,95	−0,11	1			
K	0,04	0,84	−0,83	0,98	0,92	−0,11	0,98	1		
Mg	0,56	0,82	−0,41	0,47	0,68	0,86	0,42	0,40	1	
Ca	0,48	0,59	−0,10	0,16	0,41	0,98	0,10	0,10	0,94	1
Подземные воды каменноугольных водоносных горизонтов, n = 4										
рН	1									
М	0,97	1								
F	0,98	0,98	1							
Cl	0,33	0,10	0,19	1						
SO ₄	0,98	0,93	0,97	0,40	1					
HCO ₃	0,83	0,93	0,87	−0,24	0,74	1				
Na	1,00	0,98	0,97	0,29	0,96	0,86	1			
K	0,99	0,97	0,99	0,32	0,99	0,81	0,98	1		
Mg	1,00	0,98	0,98	0,27	0,97	0,86	1,00	0,99	1	
Ca	0,93	0,99	0,97	−0,04	0,89	0,96	0,94	0,93	0,95	1
Подземные воды вендских водоносных горизонтов*, n = 58										
рН	1									
М	0,45	1								
F	0,51	0,49	1							
Cl	0,34	0,98	0,42	1						
SO ₄	0,40	0,97	0,41	0,96	1					

Компонент	pH	M	F	Cl	SO ₄	HCO ₃	Na	K	Mg	Ca
HCO ₃	0,67	0,76	0,64	0,64	0,67	1				
Na	0,52	0,99	0,51	0,96	0,96	0,79	1			
K	0,46	0,66	0,30	0,63	0,63	0,52	0,67	1		
Mg	-0,76	-0,30	-0,59	-0,17	-0,28	-0,57	-0,40	-0,15	1	
Ca	-0,77	-0,35	-0,32	-0,24	-0,34	-0,52	-0,46	-0,37	0,79	1

Примечание. * За исключением скв. 27.

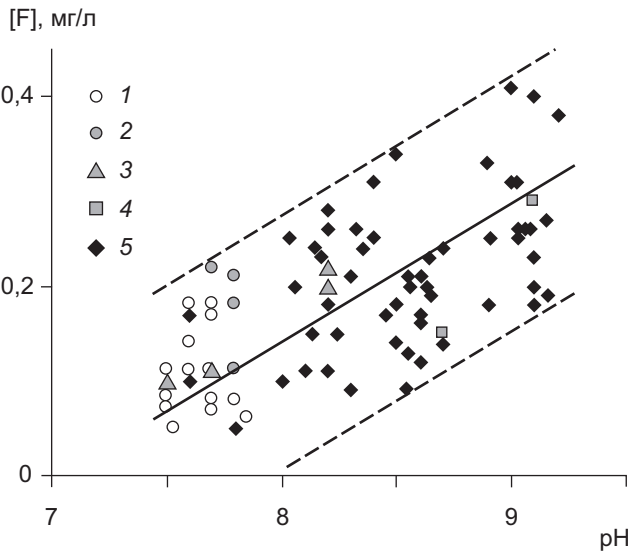


Рис. 2. Зависимость содержания фтора в речных (1) и пресных подземных водах четвертичных (2), каменноугольных (3), кимберлитовых (4) и вендских (5) водоносных горизонтов Юго-Восточного Беломорья от величины pH (за исключением скв. 27). Сплошной линией обозначена линия тренда, $r = 0,65$; пунктиром ограничен доверительный интервал $\pm 1,5\sigma$ от линии тренда

да следует, что Архангельская область относится к биогеохимическим провинциям со значительным дефицитом фтора и определяющую роль в его распространности в поверхностных и пресных подземных водах региона играет не литогенная основа, а климатический фактор.

Заключение. Согласно результатам проведенных исследований, поверхностные и пресные подземные воды Архангельской области в эколого-гигиеническом отношении являются дефицитными по фтору, содержание которого в несколько раз меньше нижнего предела диапазона его оптимальных значений. Это обстоятельство необходимо учитывать при преобразовании старых и разработке новых технологических схем питьевого водоснабжения рассматриваемой территории.

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-00088, <https://rscf.ru/project/24-17-00088/>.

Таблица 3

Сравнение содержания фтора в водах питьевого назначения Юго-Восточного Беломорья и смежных территорий Архангельской области

Объект	Содержание фтора, мг/л	
	среднее	диапазон
Территория Юго-Восточного Беломорья		
Речные воды:		
р. Северная Двина, устьевой участок	0,13	0,08–0,18
р. Золотица	0,09	0,05–0,18
р. Белая	0,07	–
Пресные подземные воды:		
четвертичных водоносных горизонтов	0,18	0,11–0,22
каменноугольных водоносных горизонтов	0,16	0,10–0,22
кимберлитовых водоносных горизонтов	0,22	0,15–0,29
вендских водоносных горизонтов без скв. 27	0,22	0,05–0,41
скв. 27	1,16	0,97–1,35
Юго-Восточное побережье Белого моря [Савенко, 2003; Savenko, Savenko, 2024]		
Р. Онега, устьевой участок	0,16	0,12–0,19
Р. Северная Двина, устьевой участок	0,14	0,09–0,22
Р. Кулой, устьевой участок	0,22	0,20–0,24
Р. Мезень, устьевой участок	0,13	–
Устьянский район Архангельской области [Avessalomova et al., 2016]		
Р. Кокшеньга, среднее течение	0,13	–
Бассейн р. Заячьей:		
верхнее течение	0,04	0,01–0,06
среднее и нижнее течение	0,18	0,10–0,21
грунтовые воды	0,15	0,11–0,22

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Авцын А.П., Жаворонков А.А., Риш М.А., Строчкова Л.С. Микроэлементозы человека (этиология, классификация, органопатология). М.: Медицина, 1991. 496 с.
Агалакова Н.И., Гусев Г.П. Влияние неорганических соединений фтора на живые организмы различного фило-

генетического уровня // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2011. Т. 47, № 5. С. 337–347.
Габович Р.Д., Минх А.А. Гигиенические проблемы фторирования питьевой воды. М.: Медицина, 1979. 200 с.

Горностаева Е.А., Фукс С.Л. Влияние фторсодержащих соединений на живые организмы (обзор) // Теоретическая и прикладная экология. 2017. № 1. С. 14–24.

Жукова А.Г., Михайлова Н.Н., Казицкая А.С., Алехина Д.А. Современные представления о молекулярных механизмах физиологического и токсического действия соединений фтора на организм // Медицина в Кузбассе. 2017. Т. 16, № 3. С. 4–11.

Иорданишвили А.К. Фториды: их значение для здоровья человека в современных условиях и перспективы использования // Курский научно-практический вестник «Человек и его здоровье». 2019. № 2. С. 66–73.

Комарова Н.В., Каменцев Я.С. Практическое руководство по использованию систем капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ». СПб.: Веда, 2006. 212 с.

Малов А.И. Подземные воды Юго-Восточного Беломорья: формирование, роль в геологических процессах. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 234 с.

Савенко А.В. Геохимия стронция, фтора и бора в зоне смешения речных и морских вод. М.: ГЕОС, 2003. 170 с.

Савенко В.С. Введение в ионометрию природных вод. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 77 с.

Сазонов Н.Н. Микроэлементы в мерзлотных экосистемах и их значение в использовании биологических ресурсов Якутии: Дисс. ... докт. биол. наук. М., 2000. 383 с.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М., 2021.

Янин Е.П. Фтор в окружающей среде (распространенность, поведение, техногенное загрязнение) // Экологическая экспертиза. 2007. № 4. С. 2–98.

Ali S., Thakur S.K., Sarkar A., Shekhar S. Worldwide contamination of water by fluoride // Environ. Chem. Lett. 2016. Vol. 14, N 3. P. 291–315.

Avessalomova I.A., Khoroshev A.V., Savenko A.V. Barrier function of floodplain landscapes in runoff formation // Riparian Zones: Characteristics, Management Practices and Ecological Impacts. Ch. 8. N.Y.: Nova Science Publ., 2016. P. 181–210.

Edmunds W.M., Smedley P.L. Fluoride in natural waters // Essentials of Medical Geology. Dordrecht et al.: Springer, 2013. P. 311–336.

Fuge R. Fluorine in the environment, a review of its sources and geochemistry // Appl. Geochem. 2019. Vol. 100. P. 393–406.

Malov A.I. Assessment of water supply to the East European Arctic agglomeration from groundwater, taking into account their quality and health risks // Environ. Pollut. 2024. Vol. 360. P. 124636.

Malov A.I. Evolution of groundwater chemistry in coastal aquifers of the south-eastern White Sea area (NW Russia) using ^{14}C and ^{234}U – ^{238}U dating // Sci. Total Environ. 2018. Vol. 616–617. P. 1208–1223.

Savenko A.V., Savenko V.S. Trace element composition of the dissolved matter runoff of the Russian Arctic rivers // Water. 2024. Vol. 16, N 4. P. 565.

Weinstein L.H., Davison A.W. Fluorides in the Environment: Effects on Plants and Animals. Wallingford, Cambridge: CABI Publ., 2004. 296 p.

Статья поступила в редакцию 08.02.2025,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 23.05.2025

УЧРЕДИТЕЛИ

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;
геологический факультет МГУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Н. ЕРЕМИН — **главный редактор**, доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН
Р.Р. ГАБДУЛЛИН — **ответственный секретарь**, доктор геолого-минералогических наук, доцент
И.М. АРТЕМЬЕВА — профессор Университета Копенгагена, Дания
А.Б. БЕЛОНОЖКО — профессор Университета Стокгольма, Швеция
А.В. БОБРОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
М.В. БОРИСОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. БРУШКОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.А. БУЛЫЧЕВ — доктор физико-математических наук, профессор
Р.В. ВЕСЕЛОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
М.Л. ВЛАДОВ — доктор физико-математических наук, профессор
Е.А. ВОЗНЕСЕНСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Т.В. ГЕРЯ — профессор Швейцарской высшей технической школы Цюриха
Д.Г. КОЩУТ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. КУВШИНОВ — доктор физико-математических наук, профессор Швейцарской высшей технической школы Цюриха
А.В. ЛОПАТИН — доктор биологических наук, профессор
А.М. НИКИШИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.Р. ОГАНОВ — профессор Университета Стони-Брук, США
ПЕНДА ЧЖАО — академик Китайской академии наук, почетный академик Московского университета, профессор Китайского университета наук о Земле
А.Л. ПЕРЧУК — доктор геолого-минералогических наук
С.П. ПОЗДНЯКОВ — доктор геолого-минералогических наук
Д.Ю. ПУЩАРОВСКИЙ — доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик РАН
Ю.В. РОСТОВЦЕВА — доктор геолого-минералогических наук, профессор
В.И. СТАРОСТИН — доктор геолого-минералогических наук, профессор
А.В. СТУПАКОВА — доктор геолого-минералогических наук, доцент
СЭНЖЕНГ ЛИ — профессор Университета океанологии Китая
В.Т. ТРОФИМОВ — доктор геолого-минералогических наук, профессор
Д.Р. ФОГЛЕР — профессор Даремского университета
И.В. ШПУРОВ — доктор технических наук

Адрес редакции:

e-mail: vmu_red@mail.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.

Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.

Подписано в печать 15.05.2025. Формат 60 × 90¹/₈.

Бумага офсетная. Гарнитура Minion Pro.

Усл. печ. л. 19,0. Уч.-изд. л. 10,2. Тираж экз.

Изд. № 13011. Заказ

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 15
(ул. Академика Хохлова, 11)
Тел.: (495) 939-32-91; *e-mail:* secretary@msupublishing.ru

ISSN 0201-7385
ISSN 0579-9406

ИНДЕКС 70995 (каталог «Роспечать»)
ИНДЕКС 34114 (каталог «Пресса России»)