

# Вестник Московского университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 1946 г.

Серия 4

ГЕОЛОГИЯ

ТОМ 65 • № 1 • 2026 • ЯНВАРЬ — ФЕВРАЛЬ

Издательство Московского университета

Выходит один раз в два месяца

## СОДЕРЖАНИЕ

- Никишин А.М., Алешина К.Ф., Родина Е.А., Вержбицкий В.Е., Мальшиев Н.А., Петров Е.И., Посаментьер Х.У., Татаринов В.Ю., Фулджер Дж.Р., Черных А.А., Чижова Е.Р.* Геологическая история Арктического океана в мезозое и кайнозое . . . . . 3
- Барабощкин Е.Ю.* Гигантские аммониты из сеноманских отложений Юго-Западного Крыма . . 18
- Габдуллин Р.Р., Копаевич Л.Ф., Бадулина Н.В., Сыромятников К.В.* Геологическая история Воронежской антеклизы в турон-коньякское время по литолого-геохимическим данным . . 23
- Копаевич Л.Ф., Бордунов С.И., Яковишина Е.В., Габдуллин Р.Р., Латыпова М.Р.* О биостратиграфическом расчленении турон-коньякских отложений Восточного Перитетиса . . . . . 29
- Попов П.П., Большакова М.А., Пронина Н.В., Хопта И.С.* Нефтематеринский потенциал пермских отложений Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуралья Краевого прогиба . . . 35
- Харитонова Н.А., Челноков Г.А., Казак Е.С., Асеева А.В., Ермаков А.В., Карабцов А.А., Лаврушин В.Ю.* Изотопные характеристики ( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) свободной и связанной вод глинистой фракции грязевых вулканов южной части Западно-Кубанского прогиба . . . . . 49
- Судакова М.С., Терентьева Е.Б., Серёгин И.А.* Анализ динамических характеристик данных георадарной томографии для скрининга стволов деревьев . . . . . 62
- Сыромятников К.В., Левитан М.А., Ульяновцев А.С., Габдуллин Р.Р.* Литолого-геохимическая зональность донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря . . . . . 73
- Власов Е.А., Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Балыкова И.В., Кузин С.В., Вигасина М.Ф.* Минералогия золото-висмут-теллуридных руд проявления Лосиха, Западная Чукотка . . . . . 86
- Карасева О.Н., Ханин Д.А., Лакишанов Л.З.* Адсорбция кадмия на тальке (Кинетика и равновесие) . . . . . 91
- Трофимов В.Т., Харькина М.А.* Особенности эколого-геологических систем оборонно-промышленных комплексов на территории России . . . . . 97
- Барабощкина Т.А., Трофимов В.Т., Николаева С.К.* Трансформация эколого-геологических систем массивов насыпных грунтов Подмосковного угольного бассейна . . . . . 108
- Гусарова Д.С., Яблонская Д.А., Филатова О.Р., Липатникова О.А., Лубкова Т.Н.* Комплексная оценка качества родниковых вод Щелковского городского округа (Московская область) . . . . . 118
- Георгиевский Б.В., Симаков Я.О., Хамитов А.Т., Анисимович О.С., Ахметгараева А.А., Ситар К.А., Барановская Е.И.* Стратегия работ и минимизация рисков при поиске и разведке геотермальных месторождений (на примере Мутновского месторождения парогидротерм) . . . . . 131
- Самсонов А.А., Коршунов Д.М., Старостин В.И.* Проблемы изучения и классификации твердых полезных ископаемых техногенных образований . . . . . 144

## CONTENTS

<i>Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A., Verzhbitsky V.E., Malyshev N.A., Petrov E.I., Posamentier H.W., Tatarinov V.Yu., Foulger G.R., Chernykh A.A., Chizhova E.R.</i> The geological history of the Arctic Ocean in the Mesozoic and Cenozoic . . . . .	3
<i>Baraboshkin E.Yu.</i> Giant ammonites from the Cenomanian deposits of Southwestern Crimea . . . . .	18
<i>Gabdullin R.R., Kopaevich L.F., Badulina N.V., Syromyatnikov K.V.</i> Geological history of the Voronezh antecline during the Turonian-Coniacian time based on lithological and geochemical data . . . . .	23
<i>Kopaevich L.F., Bordunov S.I., Yakovishina E.V., Gabdullin R.R., Latypova M.P.</i> On biostratigraphic subdivision of the Turonian and Coniacian succession in the Eastern Peritethys . . . . .	29
<i>Popov P.P., Bolshakova M.A., Pronina N.V., Khopta I.S.</i> The oil-bearing potential of the Permian deposits of the Yuryuzano-Sylvenskaya depression of the Pre-Ural edge depression . . . . .	35
<i>Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Kazak E.S., Aseeva A.V., Ermakov A.V., Karabtsov A.A., Lavrushin V.Yu.</i> Isotope characteristics ( $\delta^{17}\text{O}$ , $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ ) of liquid and bound waters of the clay fraction of mud volcanoes in the southern part of the West Kuban trough . . . . .	49
<i>Sudakova M.S., Terentyeva E.B., Seregin I.A.</i> Attribute-based analysis of GPR ray-based tomography data for tree trunks screening . . . . .	62
<i>Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Ulyantsev A.S., Gabdullin R.R.</i> Lithologic and geochemical zonality of bottom sediments of the southeastern part of the East Siberian Sea . . . . .	73
<i>Vlasov E.A., Nikolaev Yu.N., Baksheev I.A., Balykova I.V., Kuzin S.V., Vigasina M.F.</i> Mineralogy of gold-bismuth-telluride ores in Losikha prospect, Western Chukchi Peninsula . . . . .	85
<i>Karaseva O.N., Khanin D.A., Lakshtanov L.Z.</i> Adsorption of cadmium on talc (kinetics and equilibrium) . . . . .	91
<i>Trofimov V.T., Kharkina M.A.</i> Peculiarities of ecological-geological systems of defense-industrial complexes in Russia . . . . .	97
<i>Baraboshkina T.A., Trofimov V.T., Nikolaeva S.K.</i> Transformation of ecological and geological systems of massives of pummed soils in the Moscow coal basin . . . . .	108
<i>Gusarova D.S., Yablonskaya D.A., Filatova O.R., Lipatnikova O.A., Lubkova T.N.</i> Comprehensive assessment of the quality of spring waters in the north-east of the Moscow region . . . . .	118
<i>Georgievskiy B.V., Simakov Ya.O., Khamitov A.T., Anisimovich O.S., Akhmetgaraeva A.A., Sitar K.A., Baranovskaya E.I.</i> Work Strategy and Risk Minimization in Geothermal Prospecting and Exploration (Using the Example of the Mutnovsky Hydrothermal Field) . . . . .	131
<i>Samsonov A.A., Korshunov D.M., Starostin V.I.</i> Problems of studying and classifying of mineral resources in technogenic formations . . . . .	144



УДК 550.8.01. 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-3-17

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ АРКТИЧЕСКОГО ОКЕАНА В МЕЗОЗОЕ И КАЙНОЗОЕ

Анатолий Михайлович Никишин<sup>1</sup>✉, Ксения Федоровна Алёшина<sup>2</sup>,  
Елизавета Андреевна Родина<sup>3</sup>, Владимир Евгеньевич Вержбицкий<sup>4</sup>,  
Николай Александрович Малышев<sup>5</sup>, Евгений Игнатьевич Петров<sup>6</sup>,  
Хенри Уильям Посаментьер<sup>7</sup>, Виктор Юрьевич Татаринов<sup>8</sup>,  
Джиллиан Роуз Фоулджер<sup>9</sup>, Андрей Алексеевич Черных<sup>10</sup>,  
Екатерина Романовна Чижова<sup>11</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; amnikishin@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-5375-6237>

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kfstartseva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6261-4110>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; rodina\_liza@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3381-7326>

<sup>4</sup> ПАО «НК «Роснефть», Москва, Россия; v\_verzhbitskiy@rosneft.ru

<sup>5</sup> ПАО «НК «Роснефть», Москва, Россия; n\_malyshev@rosneft.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ep4813102@gmail.com

<sup>7</sup> Посаментьер Геоссаенс, Бодега Бэй, США; hposamen1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6891-631X>

<sup>8</sup> Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов, Москва, Россия; vtatarinov@rosnedra.gov.ru

<sup>9</sup> Университет Дарема, Дарем, Великобритания; gillian.foulger@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6943-6214>

<sup>10</sup> ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия; a.a.chernykh@vniio.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5370-8593>

<sup>11</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; chizhova\_er@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6289-9042>

**Аннотация.** В геологической истории Арктического океана выделены следующие этапы развития. (1) Баррем (апт)-альб (~125–100 Ма). Формирование вулcano-тектонического поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов типа Подводников, Макарова, Стефанссона и др. Характерны магматические комплексы типа Seaward Dipping Reflectors (SDR) как для поднятия Альфа-Менделеева, так и для бассейнов. Было сильное растяжение континентальной коры, но разрыва ее не произошло. Тектоника была во внутривулканном режиме. Геодинамика объясняется наличием горячего вещества в мантии. (2) Поздний мел (100–70 Ма). Основная фаза раскрытия Канадского бассейна. Бассейн раскрывался как задуговой бассейн для Тихоокеанской зоны субдукции. Для пассивной окраины Канадского бассейна в районе склона хребта Нортвинд по сейсмическим данным выделены магматические комплексы типа SDR с вероятным возрастом около 125–100 Ма. (3) Поздний мел-палеоцен (~70–56 Ма). Внутривулкантный рифтинг, который охватил часть района Канадского бассейна, бассейн Стефанссона, район моря Лаптевых и область будущего Евразийского бассейна. На огромной территории формировалось большое количество сбросов. В Американо-евразийском бассейне мы выделяем рифтовую систему Нортвинд-Север (от Чукотского Бордерленда и до Север Спур на Канадской окраине). (4) Эоцен-квартер (56–0 Ма). Поэтапное раскрытие Евразийского бассейна. При этом, в основном между 45 и 34 Ма формировались многочисленные сбросы в районе поднятия Альфа-Менделеева. Многие сбросы формировались и в неогене.

**Ключевые слова:** Арктика, поднятие Менделеева, хребет Альфа, Канадский бассейн, SDR, Евразийский бассейн, геологическая история, магматизм, рифтинг

**Для цитирования:** Никишин А.М., Алёшина К.Ф., Родина Е.А., Вержбицкий В.Е., Малышев Н.А., Петров Е.И., Посаментьер Х.У., Татаринов В.Ю., Фоулджер Дж.Р., Черных А.А., Чижова Е.Р. Геологическая история Арктического океана в мезозое и кайнозое // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 3–17.

## THE GEOLOGICAL HISTORY OF THE ARCTIC OCEAN IN THE MESOZOIC AND CENOZOIC

Anatoly M. Nikishin<sup>1</sup>✉, Ksenia F. Aleshina<sup>2</sup>, Elizaveta A. Rodina<sup>3</sup>,  
Vladimir E. Verzhbitskiy<sup>4</sup>, Nikolay A. Malyshev<sup>5</sup>, Eugene I. Petrov<sup>6</sup>,  
Henry W. Posamentier<sup>7</sup>, Viktor Yu. Tatarinov<sup>8</sup>, Gillian R. Foulger<sup>9</sup>,  
Andrey A. Chernykh<sup>10</sup>, Ekaterina R. Chizhova<sup>11</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; amnikishin@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0002-5375-6237>

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kfstartseva@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-6261-4110>

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; rodina\_liza@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3381-7326>

<sup>4</sup> Rosneft Oil Company, Moscow, Russia; v\_verzhbitskiy@rosneft.ru

<sup>5</sup> Rosneft Oil Company, Moscow, Russia; n\_malyshv@rosneft.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ep4813102@gmail.com

<sup>7</sup> LLC Geosciences, Bodega Bay, USA; hposamen1@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6891-631X>

<sup>8</sup> Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystallochemistry of Rare Elements, Moscow, Russia; vtatarinov@rosnedra.gov.ru

<sup>9</sup> Durham University, Durham, U.K.; g.r.foulger@durham.ac.uk, <https://orcid.org/0000-0001-6943-6214>

<sup>10</sup> VNIIOkeangeologiya, St. Petersburg, Russia; a.a.chernykh@vniio.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5370-8593>

<sup>11</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; chizhova\_er@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-6289-9042>

**Abstract:** The following stages of development have been identified in the geological history of the Arctic Ocean. (1) Barremian (Aptian)-Albian (~125–100 Ma). Formation of the Alpha-Mendeleev volcanic-tectonic rise and associated basins such as Podvodnikov, Makarov, Stefansson, etc. Magmatic complexes such as Seaward Dipping Reflectors (SDR) are characteristic of both the Alpha-Mendeleev Rise and the basins. There was strong stretching of the continental crust, but no rupture occurred. Tectonics were in an intraplate regime. Geodynamics can be explained by the presence of hot material in the mantle. (2) Late Cretaceous (100–70 Ma). The main phase of the Canada Basin opening. The basin opened as a back-arc basin for the Pacific subduction zone. The passive margin of the Canada Basin for the Northwind Ridge slope is characterized by SDR-type magmatic complexes with a probable age of about 125–100 Ma. (3) Late Cretaceous-Paleocene (~70–56 Ma). Intraplate rifting, which covered part of the Canada Basin, the Stefansson Basin, the Laptev Sea region, and the area of the future Eurasia Basin. A large number of faults formed across this vast territory. In the Amerasia Basin, we distinguish the Northwind-Sever rift system (from the Chukotka Borderland to Sever Spur on the Canada margin). (4) Eocene-Quaternary (56–0 Ma). Gradual opening of the Eurasia Basin. At the same time, between 45 and 34 Ma, numerous faults formed in the area of the Alpha-Mendeleev Rise. Many faults also formed in the Neogene.

**Keywords:** Arctic, Mendeleev Rise, Alpha Ridge, Canada Basin, SDR, Eurasia Basin, geological history, magmatism, rifting

**For citation:** Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A., Verzhbitsky V.E., Malyshv N.A., Petrov E.I., Posamentier H.W., Tatarinov V.Yu., Foulger G.R., Chernykh A.A., Chizhova E.R. The geological history of the Arctic Ocean in the Mesozoic and Cenozoic. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 3–17. (In Russ.).

**Введение.** Геология Северного Ледовитого (Арктического) океана изучается давно специалистами всех приарктических и других государств. Неоценимый вклад в изучение геологии Арктики внесли многие советские исследователи. В 1982 г. была принята Конвенция ООН по морскому праву. С этого времени все прибрежные страны должны были обосновать внешние границы континентального шельфа согласно принятым соглашениям. Интенсивность изучения Арктического океана также существенно возросла. В России с 2005 г. стал официально действовать Арктический Мега-Проект, финансируемый государством. Детали этого проекта описаны в ряде публикаций [Piskarev et al., 2019; Petrov, Smelror, 2021; Nikishin et al., 2021a,b,c; Никишин и др., 2022]. В частности, в его рамках был получен большой объем сейсмических, гравитационных и магнитометрических данных. Сейсморазведка выполнялась в разных модификациях, что позволило изучить детально верхнюю часть осадочного чехла, весь осадочный чехол и глубинные горизонты земной коры. Полученный объем информации до сих пор еще не проанализирован в полной мере. Кроме этого, широко использовались результаты драгирования дна океана и других специальных методов подводного отбора образцов пород [Skolotnev et al., 2019, 2023; Kossouvaia et al., 2018; Petrov, Smelror, 2021]. Огромное значение имело взятие образцов коренных пород на склонах поднятия Менделеева. Эти работы проводились с помощью специальных подводных аппаратов [Skolotnev et al., 2019, 2023; Nikishin et al., 2021a]. В последние годы много новой геолого-геофизической информации для Арктического океана было также получено специалистами

из Германии, США, Канады, Дании, Норвегии, Китая и других стран. Большая часть канадско-американских данных в цифровом виде стали открытыми, и мы их широко используем (например, [Shimeld et al., 2021]).

Систематические исследования Арктического океана проводятся с 1950-х годов. Значительный вклад в изучение бассейна внесли специалисты из России, Германии, Дании, Канады, США, Норвегии, Китая, Швеции и других стран. Общие представления о геологическом строении Арктического океана примерно совпадают среди исследователей из разных стран, однако многие вопросы остаются дискуссионными.

В последние годы нами была опубликована серия статей и монография по геологии района Арктического океана [Nikishin et al., 2014; Nikishin et al., 2018; Nikishin et al., 2021a,b,c; Nikishin et al., 2023, 2024, 2025; Posamentier et al., 2025; Никишин и др., 2022]. В данной статье мы суммируем результаты всех наших работ с целью выделения основных этапов геологической истории Арктического океана в мезозое и кайнозое. Основная аргументация для этого и многочисленные ссылки приведены в наших предыдущих публикациях. Здесь мы ограничимся в количестве ссылок и в детальной аргументации.

**Краткий геологический обзор.** В Арктическом океане традиционно выделяется два основных относительно глубоководных бассейна: Амеразийский и Евразийский (рис. 1). Эти бассейны разделены подводным хребтом Ломоносова. Амеразийский бассейн имеет сложную морфологию. В его южной части располагается Канадский бассейн с относительно плоским дном с глубиной океана более 3 км.

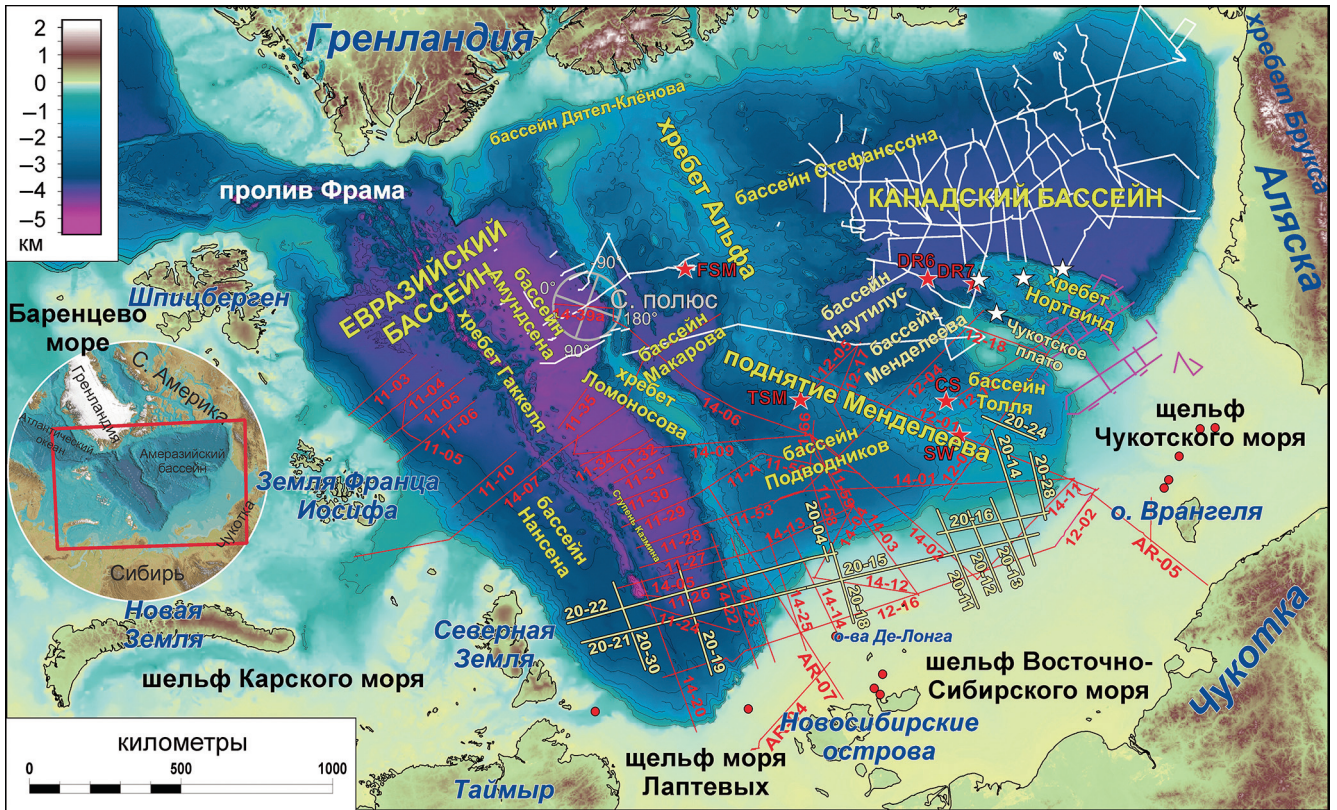


Рис. 1. Батиметрическая карта района Арктического океана [Jakobsson et al., 2020]. На карте линии показывают положение основных сейсмических профилей, которые мы используем в работе. Красные звездочки — точки (сайты), для которых имеются изотопные возрасты магматических пород. FSM — подводная гора Федотов [Funck, Shimeld, 2013], TSM — подводная гора Трукшин, SW — Юго-западная точка, CS — центральная точка [Skolotnev et al., 2023], DR7 и DR6 [Mukasa et al., 2020]. Белые звездочки — точки драгирования на Чукотском Бордерленде [O’Vreil et al., 2016]. Красные кружки — точки стратиграфического бурения на шельфе [Малышев и др., 2024]. По [Nikishin et al., 2025] с изменениями

Северная часть Амеразийского бассейна имеет более сложную морфологию. Эта территория пересекается системой подводных поднятий Альфа-Менделеева, которая сопряжена с относительно более глубоководными бассейнами (бассейны Подводников, Макарова, Толля, Менделеева, Наутилус, Стефанссона).

Евразийский бассейн занимает при-Баренцево-Карскую часть глубоководной области Арктического океана. Он простирается почти от северной окраины Гренландии и ее шельфа и до шельфа моря Лаптевых. Длина бассейна составляет около 1900–2000 км. Бассейн расположен между шельфом Баренцево-Карского морей и подводным хребтом Ломоносова. Ширина бассейна составляет около 900–600 км.

В рельефе Евразийского бассейна отчетливо выделяются бассейны Нансена и Амундсена, разделенные хребтом Гаккеля. Бассейны расположены на разных батиметрических уровнях (котловина Нансена менее 3900 м, котловина Амундсена более 4000 м). Хребет Гаккеля шириной порядка 250–150 км местами поднимается до одного километра ниже уровня моря. В пределах осевой части хребта располагается рифтовая долина глубиной до 3–5 км ниже уровня моря. Хребет Гаккеля, трассирующий осевую зону бассейна, является северным окончанием спрединговой системы Срединно-Атлантического хребта, самой медленно-спрединговой ее частью

с полным затуханием спрединга перед шельфом моря Лаптевых.

Тектонические схемы для данного региона представлялись нами ранее (например [Никишин и др., 2022; Nikishin et al., 2025]). Поднятие Альфа-Менделеева Амеразийского бассейна является вулcano-тектоническим поднятием с утоненной континентальной корой. Кора не менее чем на 30–50% насыщена базальтовым материалом. Для поднятия типичны сейсмические комплексы типа Seaward Dipping Reflectors (SDRs) (рефлекторы наклоненные в сторону более глубоководной части моря-океана). Их типичная интерпретация — полуграбены заполненные в основном базальтами (и лавами других составов) с каким-то количеством осадочного материала. Имеющиеся данные по изучению магматических пород показывают, что возраст лав и интрузий варьирует в пределах 125–100 млн лет [Skolotnev et al., 2019, 2023; Nikishin et al., 2021a]. Имеются отдельные большие вулканические постройки с доказанным возрастом для одного вулкана около 90 Ma [Funck, Shimeld, 2023].

С поднятием Альфа-Менделеева сопряжены относительно глубоководные бассейны: бассейны Подводников, Макарова, Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона. Эти бассейны характеризуются сильно утоненной континентальной корой. Для них

типичны классические комплексы типа SDRs, сложенные в основном базальтами. Для центральных частей бассейнов типична горизонтальная слоистость в базальтовом чехле. Базальтовые комплексы выделяются по сейсмическим скоростям (например [Funck, Shimeld, 2023]). Только для бассейна Наутилус имеются изотопные возрасты для драгированных базальтов. Это около 118–112, 105–100 и 90–70 Ма (млн лет назад) [Mukasa et al., 2020]. Мы предполагаем, что все названные бассейны имеют возраст примерно такого значения. В целом намечается, что поднятие Альфа-Менделеева формировалось синхронно с сопряженными бассейнами около 125–100 Ма с локальным продолжением магматизма до 90–80 Ма [Nikishin et al., 2023, 2025].

Канадский бассейн является одним из наименее изученных и понятных бассейнов Арктики. Ширина бассейна между континентальными склонами составляет около 1000–600 км, длина вдоль оси около 900 км, а глубина достигает 3,5–3,8 км. Согласно данным по магнитным и гравитационным аномалиям вдоль оси бассейна прослеживается отмерший срединно-океанический рифт мелового возраста. Для центральной части Канадского бассейна обосновано наличие океанической коры. Для более периферических частей бассейна обосновывается наличие сильно утоненной континентальной и переходной (transitional) коры [Chian et al., 2016; Mosher, Hutchinson, 2019; Hutchinson et al., 2025]. Возраст Канадского бассейна остается предметом дискуссий. Обсуждаются варианты от поздней юры до позднего мела.

Со стороны Чукотского моря у края Канадского бассейна находится подводное поднятие Чукотский Бордерленд (Чукотское плато и хребет Нортвинд). Общеизвестно, что это поднятие является относительно погруженной террасой с континентальной корой позднекембрийско-раннепалеозойского возраста.

Евразийский бассейн является относительно хорошо изученной структурой Арктического океана. По его оси проходит спрединговый хребет Гаккеля с четко выраженной осевой рифтовой долиной. Евразийский бассейн является продолжением Атлантического океана. Он имеет океаническую кору с возрастными от примерно 56 Ма до современного. Примерно 45 млн лет назад в пределах бассейна начался ультрамедленный спрединг океанической коры. Для бассейна типичны минимум два типа океанической коры. Кора с возрастными около 56–45 Ма формировалась в условиях «нормального» спрединга и, вероятно, имеет базальтовый состав. Кора с возрастными 45–0 Ма формировалась в условиях ультрамедленного спрединга. Традиционно считается, что кора ультрамедленного спрединга формировалась в условиях эксгумации мантийного вещества и представлена в основном серпентинитами с разной долей базальтового материала. По этой тематике в последние годы проводятся специальные

экспедиции, и данная проблема активно обсуждается и заслуживает отдельных публикаций.

Хребет Ломоносова всеми считается блоком с континентальной корой позднекембрийско-раннепалеозойского возраста.

Для Арктического океана типичен полистадийный магматизм. Наиболее крупная эпоха магматизма была в мелу. Область этого магматизма принято называть High Arctic Large Igneous Province (HALIP) (Большая магматическая провинция Высокой Арктики). Точные датировки магматизма не совсем многочисленные, обычно считается что около 125–100 Ма была главная эпоха, дополнительные фазы магматизма были около 100–80 Ма.

**Данные и методы.** В основу работы положены по возможности все геолого-геофизические данные для Арктического океана. Нами создана компьютерная база данных в цифровом виде. В нее входят почти все федеральные российские сейсмические профили для Арктического региона, данные по батиметрии, гравитационным и магнитным аномалиям. В базу данных также включены канадско-американские сейсмические профили в цифровом виде. Частично мы имеем немецкие профили. Данные исследователей из других организаций и стран мы брали по публикациям. Мы также старались обобщать данные всех многочисленных публикаций по всему Арктическому региону. Основной метод работы — интерпретация сейсмических профилей совместно с анализом всех других данных.

**Результаты. Сейсмостратиграфия и тектоностратиграфия.** Нами разработана сейсмическая стратиграфия для Арктического океана. В глубоководной части Арктического океана в разрезе мелкайнозойских отложений нами выделено 8 ключевых сейсмических горизонтов [Nikishin et al., 2014; 2021b; Никишин и др., 2022].

1. *Горизонт с возрастом  $\pm 125$  Ма* отвечает времени начала рифтинга в Чукотском и Восточно-Сибирском морях, проявления магматизма (HALIP) в районе поднятия Альфа-Менделеева и на шельфах Арктического океана (плато Де-Лонга, Земля Франца Иосифа, Шпицберген, южный борт Северо-Чукотского бассейна, острова Арктического Архипелага Канады и др.).

2. *Горизонт  $\pm 100$  Ма* маркирует границу типа рифт-пострифт в Северо-Чукотском бассейне и бассейнах Восточно-Сибирского и Лаптевых морей. Эта граница соответствует примерно кровле сейсмического комплекса SDR (Seaward Dipping Reflectors) с рефлекторами, наклоненными в направлении более глубокой части моря) для поднятия Менделеева и бассейнов Подводников и Толля. Она может быть диахронной (в диапазоне возрастов 100–90 Ма).

3. *Поверхность с возрастом  $\pm 80$  Ма* проводится по кровле высокоамплитудных отражений (high-amplitude reflection sequence–2, HARS–2; высокоамплитудная секвенция рефлекторов–2) и соответствует началу регионального униформного

погружения бассейна Подводников. Она соответствует, вероятно, началу периода похолодания в Арктике [Nikishin et al., 2021b] и времени завершения вулканизма на поднятии Альфа-Менделеева [Mukasa et al., 2020].

4. *Граница ±66 Ma*. Она соответствует примерно среднебрукскому несогласию на Аляске (mid-Brookian, MBU) или несогласию на рубеже мела и палеогена. Она также может быть диахронной (от маастрихта и до зеландия). Эта граница обоснована малоглубинным стратиграфическим бурением и палеонтологическим обоснованием в Чукотском море. Данные этого бурения увязаны с сетью региональных сейсмических профилей [Малышев и др., 2024].

5. *Граница ±56 Ma* соответствует поверхности раздела рифт-пострифтовых отложений в районе хребта Ломоносова. Она отвечает началу спрединга в Евразийском бассейне (breakup unconformity, несогласие раскола литосферы). Эта граница прослеживается в разрезах на большей части Арктического океана как подошва высокоамплитудных отражений (high-amplitude reflection sequence-1, HARS-1; высокоамплитудная секвенция рефлекторов-1). Эта граница соответствует началу климатического палеоцен-эоценового температурного максимума (Paleocene-Eocene Thermal Maximum, (PETM)) и началу формирования вероятных карбонатных платформ и построек на поднятии Менделеева [Posamentier et al., 2025]. Эта граница обоснована малоглубинным стратиграфическим бурением и палеонтологическим обоснованием в море Лаптевых. Данные этого бурения увязаны с сетью региональных сейсмических профилей [Malyshev et al., 2025].

6. *Граница ±45 Ma* выделяется в кровле высокоамплитудных отражений (high-amplitude reflection sequence-1, HARS-1; высокоамплитудная секвенция рефлекторов-1). Она соответствует подошве верхнего клиноформного комплекса (upper clinofom complex) Северо-Чукотского бассейна. Эта граница проявлена, по нашим данным, вблизи кровли карбонатных построек и фиксирует начало похолодания в Арктике. В Евразийском бассейне данная граница хорошо коррелируется с возрастными датировками пород океанической коры, оцененных по данным линейных магнитных аномалий. Она упирается в образования океанической коры с возрастом около 45 Ma.

7. *Граница ±34 Ma* трассируется в кровле хаотического горизонта (chaotic horizon) на шельфах Восточно-Сибирского и Чукотского морей и совпадает со временем палеогеографической перестройки в Американо-Евразийском бассейне. Возраст ее увязан с возрастными датировками линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне.

8. *Граница ±20 Ma* интерпретируется как поверхность, связанная с региональным эрозионным событием с проявлением многочисленных оползневых процессов на склонах подводных гор. Она соответствует времени начала общеокеанических

морских течений (ventilated circulation regime) в связи с открытием глубоководного пролива Фрама и началом единых морских донных течений в Северной Атлантике и в Арктическом океане. Граница проходит вблизи основания миоценовых отложений на хребте Ломоносова согласно проекту бурения АСЕХ по данным [Backman et al., 2008]. Возраст ее увязан с датировками линейных магнитных аномалий в Евразийском бассейне.

Для многих бассейнов и поднятий Арктического океана нами предлагались схемы хроностратиграфии и тектоностратиграфии (например, [Никишин и др., 2022; Nikishin et al., 2021b; 2025]). В данной работе мы представляем обновленные версии тектоностратиграфии для поднятия Менделеева, Канадского и Евразийского бассейнов (рис. 2).

**История геологического развития.** Триасово-юрская палеогеография и палеотектоника была нами охарактеризована ранее [Nikishin et al., 2021c; 2024; Никишин и др., 2022]. Арктического океана еще не было, были шельфовые моря и области суши. В районе Канадского бассейна с юры начались фазы рифтинга, которые, возможно, были связаны с будущим формированием океана.

В истории Арктического океана мы выделяем следующие стадии развития [Nikishin et al., 2021c; 2023; 2024; 2025; Никишин и др., 2022] (рис. 3, 4).

1. Юра-готерив. Возможный континентальный рифтинг. Вероятно, было влияние Верхояно-Чукотской орогении перед аптом раннего мела.

2. Баррем (апт)-альб (~125–100 Ma). Формирование вулканотектонического поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов типа Подводников, Макарова, Стефанссона и др. Характерны магматические комплексы типа Seaward Dipping Reflectors (SDR) как для поднятия Альфа-Менделеева, так и для бассейнов. Было сильное растяжение континентальной коры, но разрыва ее не произошло. Тектоника была во внутриплитном режиме. Геодинамика объясняется наличием горячего вещества в мантии (плюм, горячее пятно, мантийное течение; есть разные варианты объяснения).

3. Поздний мел (100–70 Ma). Основная фаза раскрытия Канадского бассейна. Бассейн раскрывался как задуговой бассейн для Тихоокеанской зоны субдукции. Для пассивной окраины Канадского бассейна для склона хребта Нортвинд (Чукотский Бордерленд) характерны магматические комплексы типа SDR с вероятным возрастом около 125–100 Ma. Из этого следует, что сам бассейн моложе континентальной окраины и моложе SDRs.

4. Поздний мел-палеоцен (~70–56 Ma). Внутриплитный рифтинг, который охватил часть района Канадского бассейна, бассейн Стефанссона, район моря Лаптевых и область будущего Евразийского бассейна. На огромной территории формировалось большое количество сбросов. В Американо-Евразийском бассейне мы выделяем рифтовую систему Нортвинд-Север (от Чукотского Бордерленда и до Север Спур на

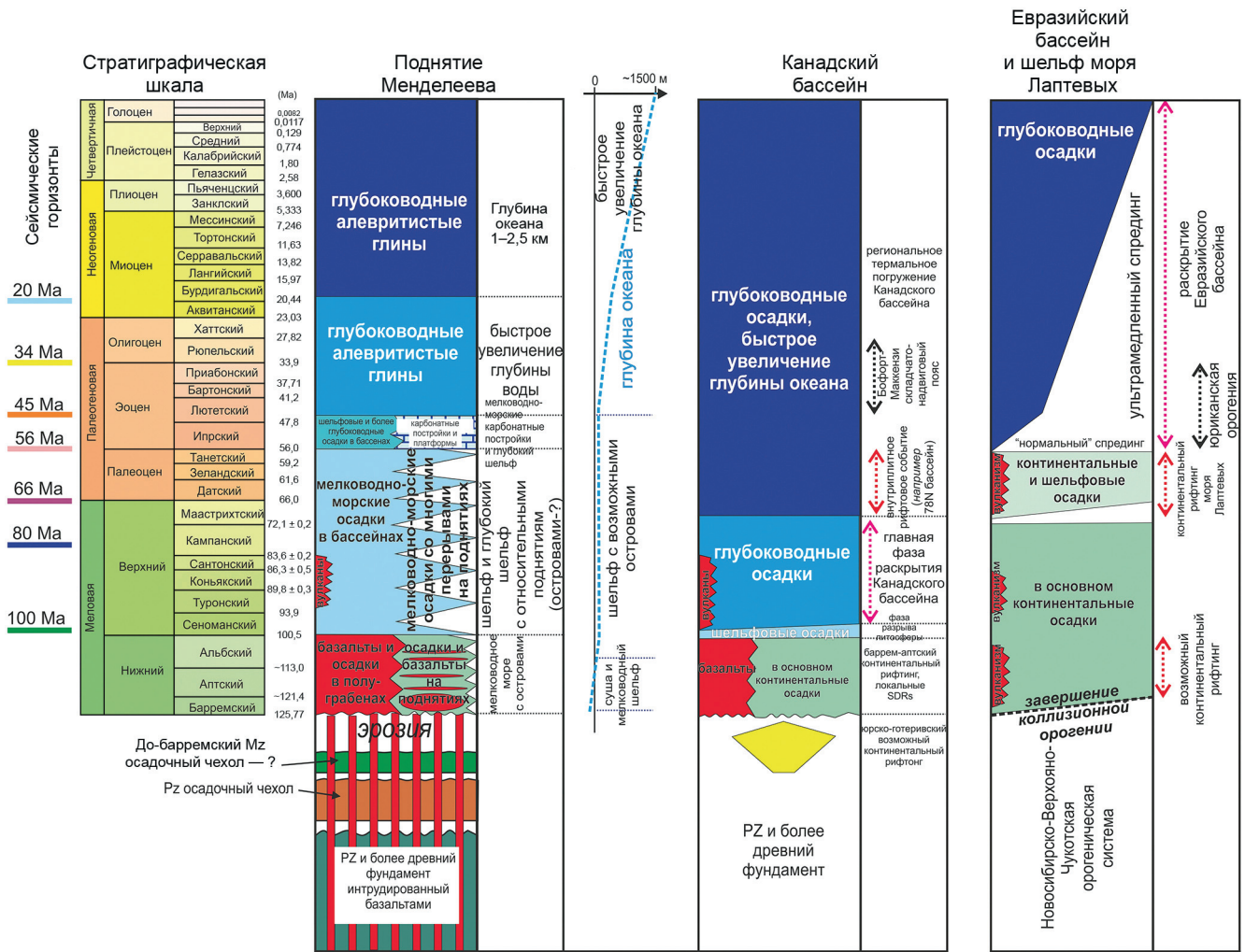


Рис. 2. Схемы хроностратиграфии и тектоностратиграфии для трех районов Арктического океана. По [Nikishin et al., 2025] с изменениями

Канадской окраине), которая далее уходит в сторону залива Баффина. Это рифтовое событие связано уже с геодинамикой Атлантической системы.

5. Эоцен-квартер (56–0 Ma). Поэтапное раскрытие Евразийского бассейна. При этом, в основном между 45 и 34 Ma формировались многочисленные сбросы в районе поднятия Альфа-Менделеева. Многие сбросы формировались и в неогене. Было влияние юриканской орогенеза, которая была на Канадских островах, на севере Гренландии и на Шпицбергене.

Для баррем-альбского этапа развития главными данными являются изотопные возраста магматических пород [Skolotnev et al., 2019, 2023; Mukasa et al., 2020]. Основные датировки имеют возраст около 125–100 Ma, дополнительный магматизм имеет вероятный возраст около 100–80 Ma. Имеющиеся геофизические, геохимические и изотопные данные показывают, что все тектонические и магматические процессы проходили без разрыва сплошности континентальной коры во внутриплитной тектонической обстановке (например [Kashubin et al., 2018; Skolotnev et al., 2019, 2023; Mukasa et al., 2020; Nikishin et al., 2023]).

Поздне меловое время раскрытия Канадского бассейна является дискуссионной проблемой. В большинстве современных публикаций считается, что Канадский бассейн раскрывался в раннем мелу до апта или даже в поздней юре (например [Соколов и др., 2022; Chernykh et al., 2023a; Hutchinson et al., 2025]). Мы также придерживались этой традиционной модели [Nikishin et al., 2021c; Никишин и др., 2022]. Поздне меловое раскрытие Канадского бассейна предлагалось ранее разными исследователями, но не было четких аргументов в пользу такой концепции. Анализ новых канадско-американских сейсмических профилей показывает, что на склоне хребта Нортвинд (Чукотский Бордерленд) выделяется пассивная вулканическая континентальная окраина с типичными комплексами типа SDRs (рис. 5) [Chian et al., 2016; Nikishin et al., 2023, 2024, 2025]. Эти и другие комплексы района Канадского бассейна нами были специально изучены [Nikishin et al., 2025]. Рядом с комплексами SDRs имеется проба базальтов с возрастом около 118–112 Ma [Mukasa et al., 2020; Nikishin et al., 2025]. Из этого следует, что вероятный возраст базальтов SDRs в районе 125–100 Ma, и этот возраст близок к возрастам магматических пород

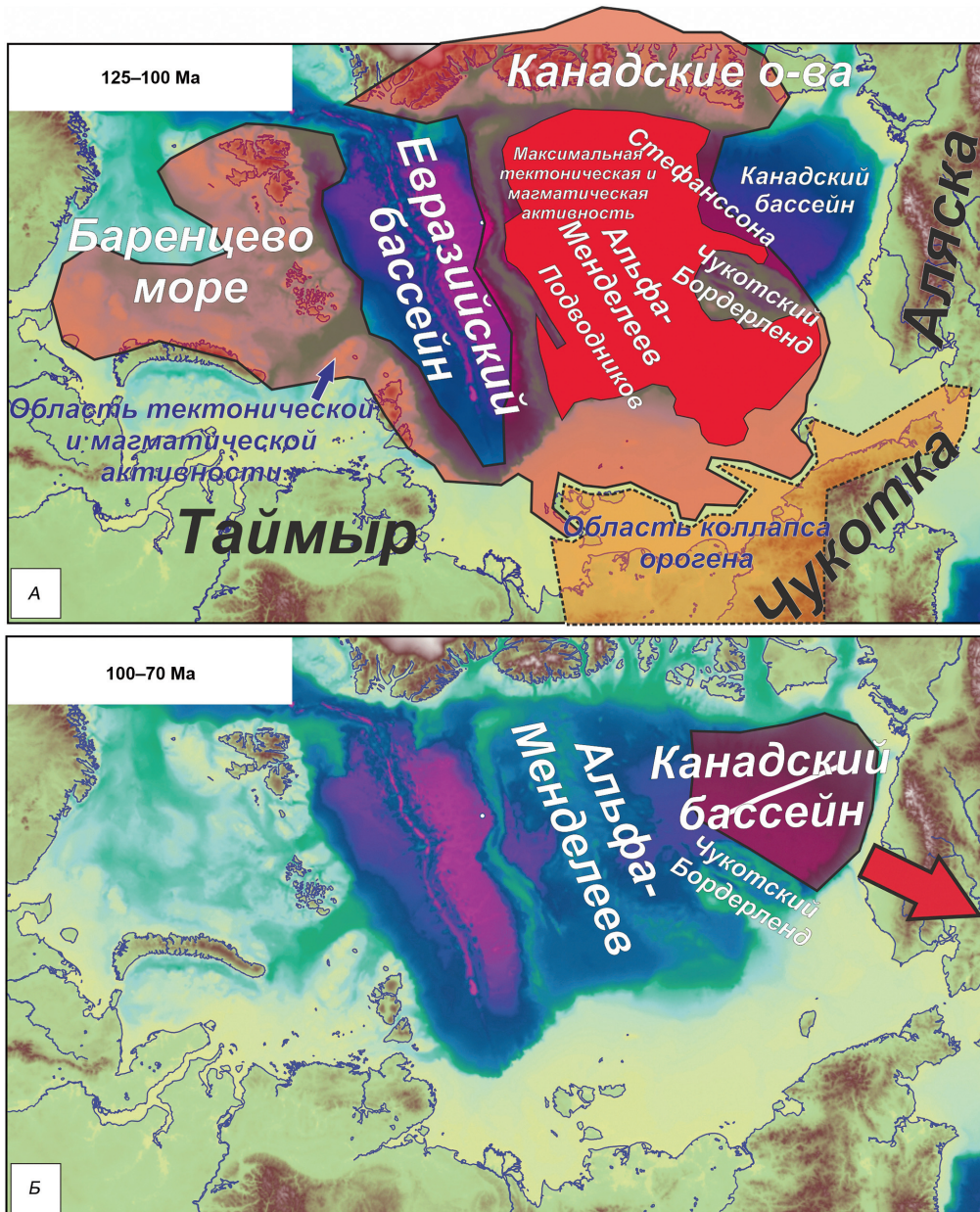


Рис. 3. На современной географической основе показаны главные тектонические и магматические структуры, сформированные за 125–70 Ма (А и Б). Основные новообразования показаны цветом. 125–100 Ма (А): формирование структур области Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов; трапповый магматизм во многих местах; коллапс орогена в районе Чукотки. 100–70 Ма (Б): раскрытие Канадского бассейна. Белая жирная линия — ось спрединга океанической коры. Красная стрелка — направление отодвигания Аляски. Составлена на основе [Nikishin et al., 2021c; 2025]

поднятия Менделеева и HALIP в целом. В пользу того, что базальты SDRs подводного склона хребта Нортвинд имеют возраст HALIP (125–100 Ма) свидетельствует то, что этот район входит в единый регион с крупной общей магнитной аномалией.

Естественно считать, что сам Канадский бассейн моложе времени рифтинга на его континентальных окраинах. Поэтому мы считаем, что Канадский бассейн начал раскрываться около 100 Ма после окончания формирования комплексов SDRs. На рис. 6 показана наша модель геометрического раскрытия Канадского бассейна. Мы выделяем две фазы раскрытия бассейна. Во время первой фазы ось раскрытия была параллельна хребту Нортвинд.

Это следует из того, что комплексы SDRs, вероятно, наклонены ортогонально оси максимального растяжения. Во время этой фазы в основном формировалась сильно растянутая континентальная кора и переходная кора (transitional crust), если следовать широко известной модели строения коры Канадского бассейна [Chian et al., 2016]. Во время второй фазы несколько поменялась ориентировка раздвижения и стала формироваться «нормальная» океаническая кора. Для геометрического раскрытия Канадского бассейна нужно иметь какую-то сдвиговую зону. Мы допускаем наличие Аме́разийского сдвига, который обычно всеми допускается для восточного склона хребта Нортвинд. Но мы допускаем, что этот сдвиг

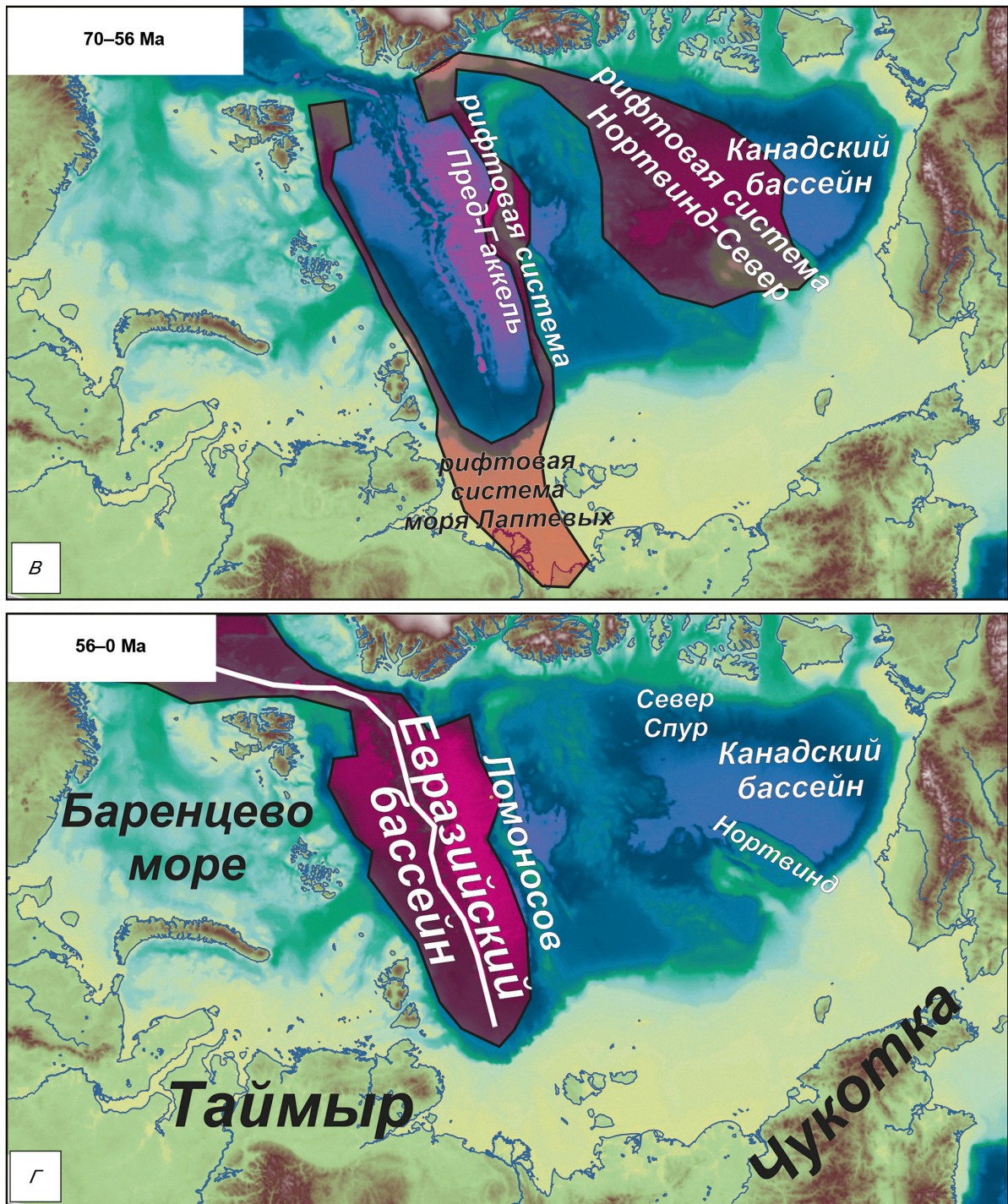


Рис. 4. На современной географической основе показаны главные тектонические и магматические структуры, сформированные за 70–0 Ма (В и Г). Основные новообразования показаны цветом. 70–56 Ма (В): внутриплитный рифтинг и магматизм. 56–0 Ма (Г): раскрытие Евразийского бассейна. Белая жирная линия — ось спрединга океанической коры. Составлено на основе [Nikishin et al., 2021c; 2025]

(или широкая сдвиговая зона) доходил до Тихоокеанской зоны субдукции [Nikishin et al., 2014; Nikishin et al., 2025].

Канадский бассейн, вероятно, формировался как задуговой бассейн Тихоокеанской зоны субдукции, направленной под Аляску [Nikishin et al., 2025]. Поздне меловая субдукция под Аляску принята во многих публикациях (например, [Akinin et al., 2020]).

Мы предполагаем, что раскрытие Канадского бассейна закончилось в маастрихте около 70 Ма. В это время в Канадском бассейне в районе бассейна Бофорт-Маккензи была существенная палеогеографическая перестройка [Chen et al., 2025].

В Канадском бассейне между осевым меловым рифтом и Канадскими островами был выделен бассейн 78°N (78 градуса северной широты) [Hutchinson et al., 2017] (рис. 6, 7). Бассейн наложен на силь-

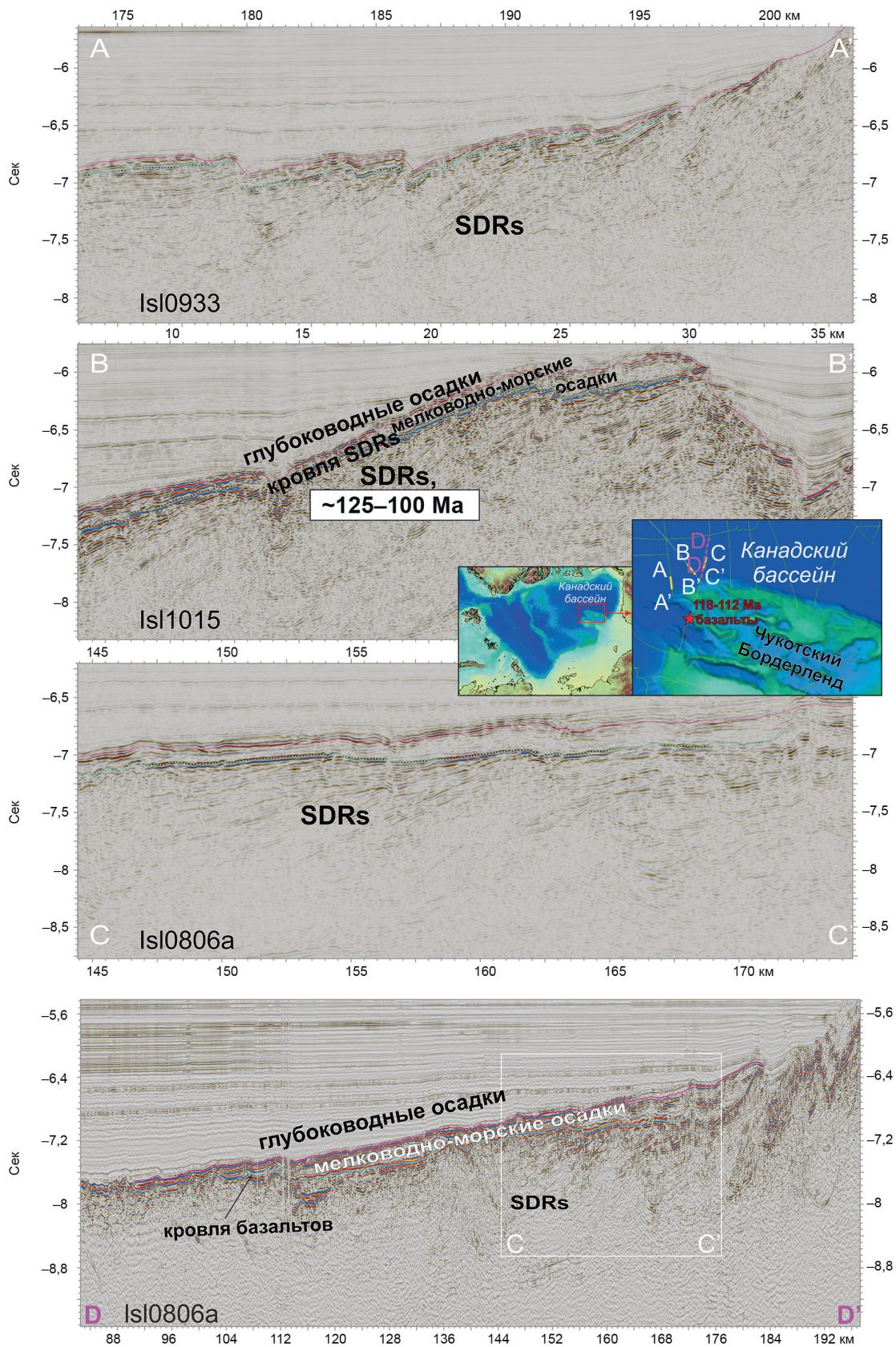


Рис. 5. На сейсмических профилях на склоне Чукотского Бордерленда в сторону Канадского бассейна видны комплексы типа SDR. Хорошо видна кровля SDRs. Вероятно, это граница типа break-up (раскола литосферы). Рядом находится точка с изотопными возрастными 118–112 Ma [Mukasa et al., 2020]. Вероятно, SDR комплексы имеют сходный возраст в интервале 125–100 Ma. Горизонтально слоистая толща с яркими рефлекторами лежит сразу на SDRs. Вероятно, это мелководные осадки с возможными карбонатами. Выше залегают более глубоководные осадки. Сейсмические данные по [Shimeld et al., 2021]. Интерпретация по [Nikishin et al., 2025]

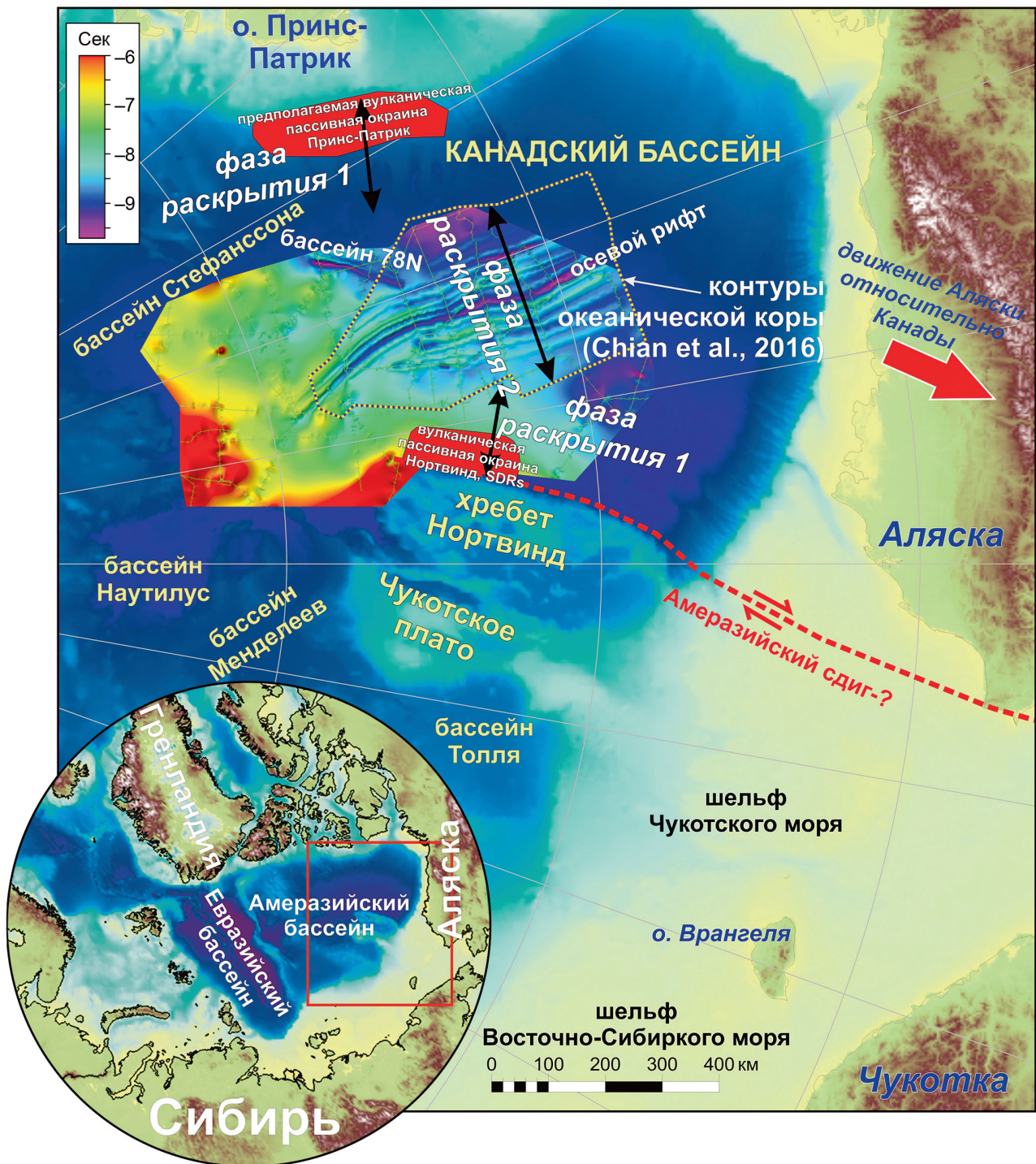


Рис. 6. Элементы геологического строения и истории формирования Канадского бассейна на карте батиметрии Арктического океана. Показана карта рельефа акустического фундамента (более синие цвета — глубже, более желтые и красные — выше). Показаны контуры области с океанической корой, для остальной территории Канадского бассейна предполагается наличие сильно утоненной континентальной или переходной коры (по [Chian et al., 2016]). Красным цветом показаны обоснованная и предполагаемая пассивные вулканические окраины. Черными стрелками показаны вероятные ориентировки растяжения-раздвижения коры во время двух фаз раскрытия Канадского бассейна. Составлено на основе [Nikishin et al., 2025]

но утоненную континентальную кору, имеет четко выраженный синрифтовый комплекс и однозначно интерпретируемую границу типа рифт-пострифт [Hutchinson et al., 2017; Nikishin et al., 2023; 2025]. Наши корреляции сейсмических профилей показали, что этот бассейн формировался уже после образования Канадского бассейна и наложен на кору Канадского бассейна [Nikishin et al., 2023;

2025]. Аналогичные рифтовые бассейны с четкими сбросами нами выделены в бассейне Стефанссона и в районе Север Спур [Nikishin et al., 2023; 2025]. Многочисленные сбросы того же возраста были выделены восточнее Чукотского Бордерленда [Nikishin et al., 2025]. Между хребтом Ломоносова и Гренландией выделяется грабенообразный бассейн Клёновой (или разломная зона Моря Лин-

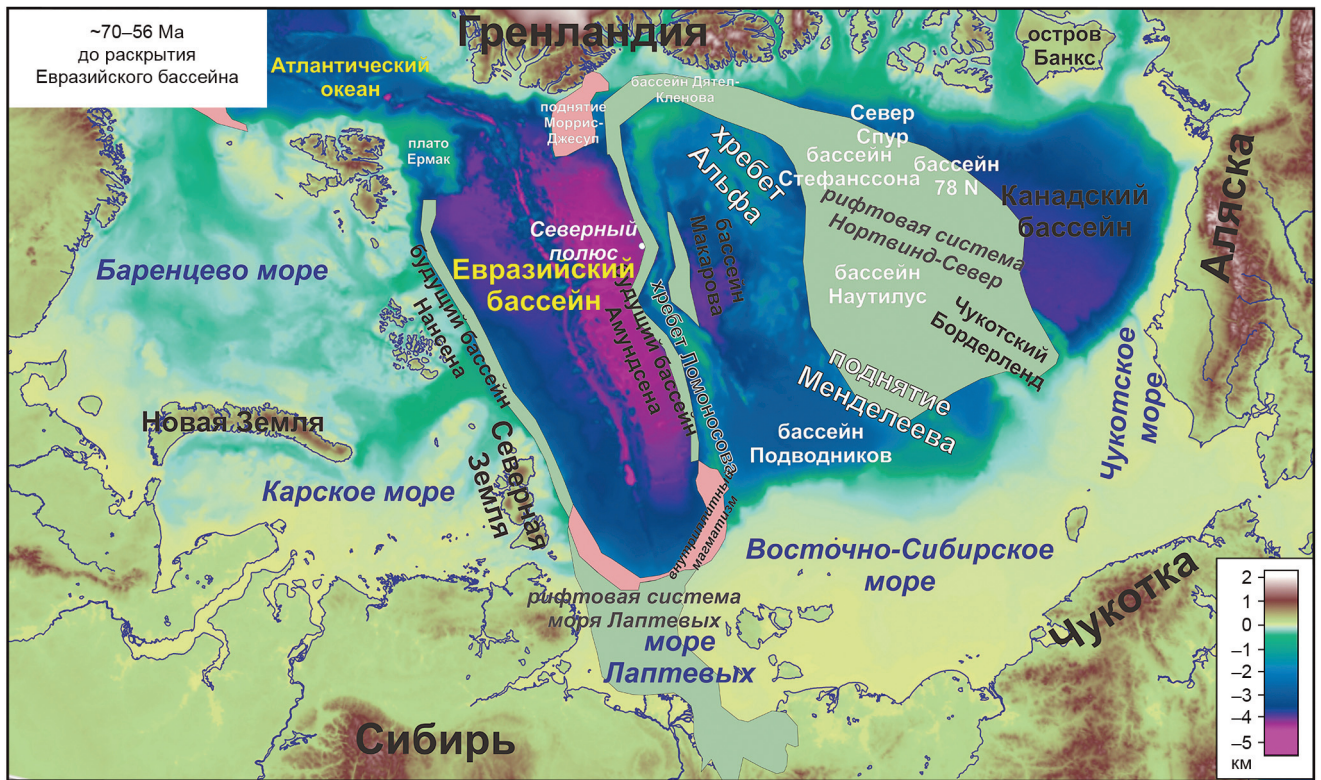


Рис. 7. На современной географической основе показаны главные тектонические и магматические структуры, сформированные за 70–56 Ма. Зеленый цвет — области вероятного внутриплитного рифтинга, розовый цвет — области вероятного магматизма. Составлена на основе [Nikishin et al., 2025]

кольна-долины Клёновой) [Døssing et al., 2014]. На его продолжении в сторону Канадских островов севернее острова Элсмир географически имеется Терраса Николай Дятел. Поэтому весь бассейн мы называем бассейн Дятел-Клёнова. Согласно корреляциям сейсмических профилей, все названные бассейны имеют примерно одинаковый возраст. Они моложе времени образования собственно Канадского бассейна и древнее времени раскрытия Евразийского бассейна. Поэтому их вероятный возраст около 70–56 Ма. Эту систему бассейнов мы назвали рифтовой системой Нортвинд-Север [Nikishin et al., 2025]. Эта рифтовая система формировалась примерно синхронно с континентальным рифтингом в пределах современной Северной Атлантики и залива Баффина, а также синхронно с рифтовой системой моря Лаптевых. Вероятно, геодинамика образования данной рифтовой системы была связана с развитием Северной Атлантики [Nikishin et al., 2023, 2025].

Евразийский бассейн относительно хорошо изучен и интерпретируется разными исследователями примерно одинаково (например [Glebovsky et al., 2006; Nikishin et al., 2018, 2021b; Chernykh et al., 2023b; Aleshina et al., 2024; Faleide et al., 2025]).

В истории формирования Евразийского бассейна можно выделить следующие стадии, которые примерно одинаково были сформулированы многими исследователями (например [Glebovsky et al., 2006; Nikishin et al., 2018, 2021b, 2021c; Chernykh et al., 2023b; Faleide et al., 2025]):

1. Палеоцен (66–56 Ма). Формирование континентальной рифтовой системы в зоне будущего Евразийского бассейна. Рифтовые системы в районе моря Лаптевых являются наиболее изученными. В разных районах вероятно проходил вулканизм. По данным сейсморазведки магматизм обоснован для поднятия Моррис-Джесуп (севернее Гренландии) и района границы моря Лаптевых и современного Евразийского бассейна (например, [Nikishin et al., 2021b; Brotzer et al., 2022; Aleshina et al., 2024]).

2. 56–45 Ма. Первая фаза раскрытия Евразийского бассейна с формированием «нормальной» океанической коры. Вначале раскрытия, возможно, имело место экзумация вещества мантии.

3. 45–34 Ма. Ультрамедленный спрединг океанической коры. В интервале времени 56–34 Ма Евразийский бассейн был изолирован от Северо-Атлантического бассейна и был отдельным глубоководным бассейном. Евразийский и Северо-Атлантический бассейны, как считается, были связаны сдвиговой системой.

4. 34–20 Ма. Продолжение ультрамедленного спрединга. Пропагация спрединга в бассейн Моррис-Ермак. Отсутствие непрерывной связи с Северо-Атлантическим бассейном.

5. 20–0 Ма. Продолжение ультрамедленного спрединга. Пропагация ультрамедленного спрединга в бассейн Пролив Фрама. Полное соединение с Северо-Атлантическим бассейном.

В истории формирования Евразийского бассейна есть несколько важных явлений. На рис. 7 показано,

что до раскрытия Евразийского бассейна широко проявился внутриплитный рифтинг: формировалась рифтовая система моря Лаптевых, рифтовая система в полосе будущего Евразийского бассейна и рифтовая система Нортвинд-Север в Амеразийском бассейне. Магматизм также, вероятно, предшествовал раскрытию Евразийского бассейна.

Если мы посмотрим на карту батиметрии Арктического океана (рис. 1), то увидим, что рельеф хребта Ломоносова и поднятие Альфа-Менделеева имеет горст-грабеновый характер типа бассейнов и хребтов. Интерпретация имеющихся сейсмических профилей показывает, что горсты и грабены рельефа дна образованы молодыми сбросовыми системами [Bruvold et al., 2012; Brumley, 2014; Nikishin et al., 2014; 2018; 2021b; Weigelt et al., 2020]. Для поднятия Менделеева был предложен возраст сбросообразования около 22–14 Ма [Bruvold et al., 2012]. По данным корреляции сейсмических профилей мы обосновывали возраст сбросообразования около 45–34 Ма с дополнительными фазами моложе 20 Ма. Для района Чукотского Бордерленда по изотопному анализу рудного вещества обоснован возраст сбросообразования около 8–5 Ма [Hein et al., 2024; Nikishin et al., 2025]. Для хребта Ломоносова типичны молодые сбросы, смещающие вероятные неоген-четвертичные отложения [Weigelt et al., 2020; Nikishin et al., 2014, 2021b]. Области сбросообразования с возрастом моложе 45 Ма в районе хребта Ломоносова, поднятия Альфа-Менделеева и Чукотского Бордерленда ориентированы параллельно хребту Гаккеля (рис. 8). Для склона хребта Гаккеля в сторону хребта Ломоносова характерна молодая активизация более древних разломов в фундаменте. Типичным примером является тектоническая ступень Казмина, которая хорошо выражена в современном рельефе [Nikishin et al., 2021b] (см. рис. 1). Из всего этого следует, что синхронно с ультрамедленным спредингом в хребте Гаккеля область растяжения и сбросообразования эпизодически распространялась на регион шириной не менее 1300 км. Наиболее обоснованными эпохами сбросообразования являются интервалы времени около 45–34 Ма [Nikishin et al., 2021c] и 20–0 Ма. В пределах Восточно-Сибирского и Чукотского морей нами выделена правосторонняя сдвиговая зона Умки с вероятным возрастом около 45–34 Ма [Никишин и др., 2022] (рис. 8). Длина зоны около 1300 км, ширина — до 500 км. Возможно, формирование этой сдвиговой зоны как-то связано с началом ультрамедленного спрединга хребта Гаккеля.

**Дискуссия.** Вулкано-тектоническое поднятие Альфа-Менделеева и сопряженные бассейны Подводников, Макарова, Толля, Менделеева, Наутилус и Стефанссона формировались, вероятно, примерно одновременно 125–100 Ма с вероятным продолжением магматизма до 90–80 Ма. Синхронно с магматизмом HALIP произошел коллапс Верхояно-Чукотского орогена, который сопровождался растяжением и магматизмом [Nikishin et al., 2024].

Все исследователи объясняют магматизм HALIP с наличием горячего вещества в верхней мантии (например [Dobretsov et al., 2013; Лобковский и др., 2013; Nikishin et al., 2014; Соколов и др., 2022; Metelkin et al., 2021]). Это горячее вещество поступало по разным моделям либо в виде мантийных плюмов или суперплюма, либо в связи с мантийными течениями во всей мантии или в верхней мантии. Нам надо объяснить примерную синхронность начала магматизма HALIP и коллапса Верхояно-Чукотского орогена. Самое простое объяснение состоит в том, что до 125 Ма за какое-то длительное время горячее вещество поступало в верхнюю мантию Арктики. Около 125 Ма произошло региональное стрессовое событие растяжения, которое привело к выводу огромного количества магмы на поверхность и в земную кору. Затем процессы растяжения и магматизма сфокусировались в районе поднятия Альфа-Менделеева и в сопряженных бассейнах. Началом стрессового события и причиной растяжения, вероятно, были изменения и перестройки в глобальной кинематике литосферных плит. Важно отметить, что в рамках точности изотопных датировок магматических пород область магматизма HALIP формировалась примерно синхронно с известными областями магматизма Кергелен и Онтонг-Джава [Ernst et al., 2021]. Это означает, что были некие глобальные геодинамические причины для синхронного магматического события в разных частях Земли.

Позднемеловой возраст главной фазы раскрытия Канадского бассейна логично вытекает из известных моделей геодинамики, обоснованных на примере истории раскрытия Атлантического океана. Сначала магматизм типа траппового и крупномасштабный рифтинг (в нашем случае магматизм HALIP), а затем раскрытие бассейна с океанической корой. Все «настоящие» океаны современной Земли образуют единую систему срединно-океанических хребтов. Современные задуговые бассейны типа Японского моря не входят в мировую систему океанов (срединно-океанических хребтов). По реконструкциям разных авторов Канадский бассейн не входил в мировую систему со срединно-океаническими хребтами. Это дополнительный аргумент в пользу задугового происхождения Канадского бассейна с Тихоокеанской зоной субдукции под Аляску.

Раскрытию Евразийского бассейна предшествовала фаза крупномасштабного внутриплитного рифтинга. Формировалось, вероятно, две основных полосы рифтинга. Первая, от рифтовой системы моря Лаптевых и далее вдоль будущей зоны Евразийского бассейна. Вторая, в Амеразийском бассейне от Чукотского Бордерленда до бассейнов Стефанссона и Дятел-Клёнова. Обе полосы рифтинга уходили в зоны рифтинга Северной Атлантики и залива Баффина. Раскрытию Евразийского бассейна, вероятно, предшествовали фазы магматизма. Это соответствует тому, что было перед раскрытием Северной Атлантики (например, [Gernigon et al., 2020]).

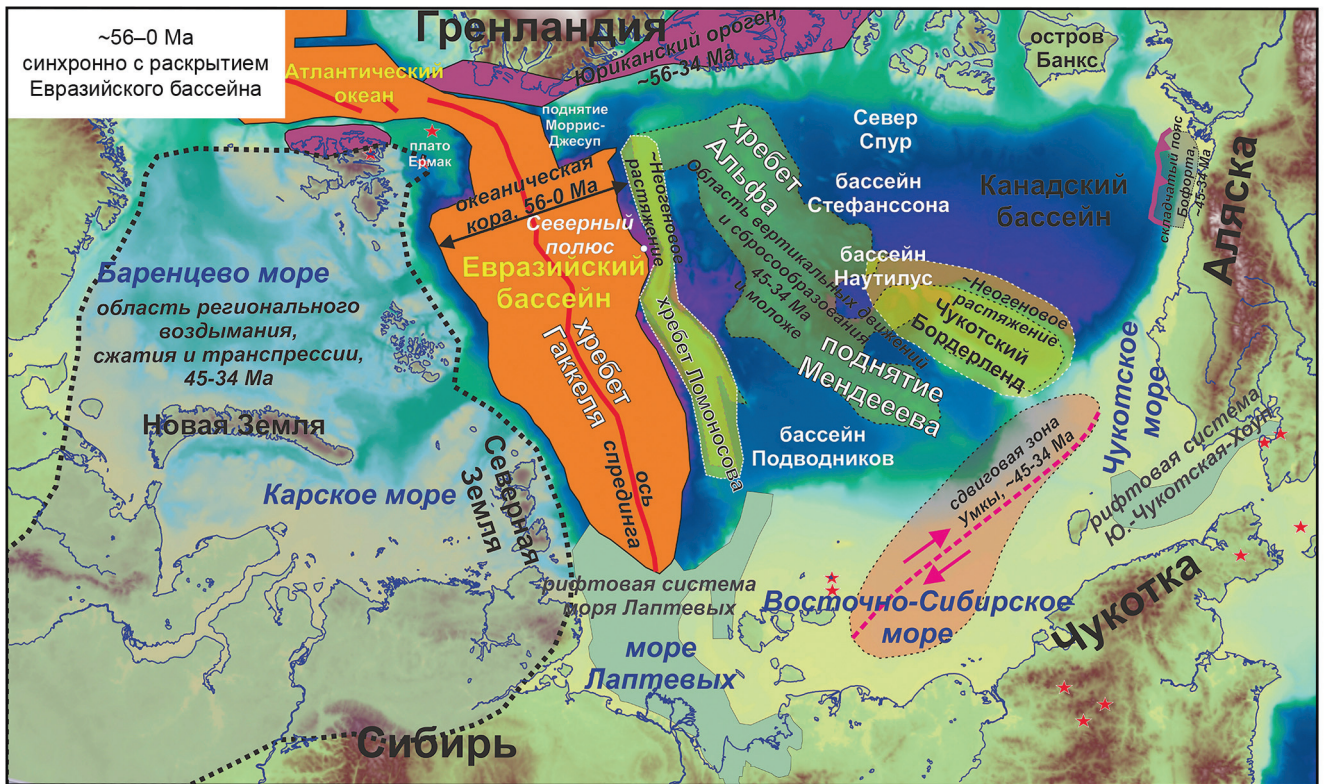


Рис. 8. На современной географической основе показаны основные тектонические и магматические структуры, сформированные за 56–0 Ма. Цветами показаны основные новообразованные структурные области. Звездочки — области вулканизма. Составлена на основе [Nikishin et al., 2025]

Северная и Южная Атлантика раскрывались не с синхронным раздвижением вдоль будущего океана, а по сегментам. Каждый сегмент в плане имел клиновидную форму, при этом сегменты только с одной стороны были ограничены трансформными разломами [Franke, 2013; Gernigon et al., 2020; Chauvet et al., 2021]. Вероятно, Евразийский бассейн раскрывался по аналогичной модели. В интервале времени 56–34 Ма со стороны плато Ермак и поднятия Моррис-Джесуп был активный трансформный разлом. Океанический бассейн раскрывался в виде клина в плане, при это, вероятно, трансформного разлома в зоне перехода к рифтовой системе моря Лаптевых не было, как нет его и сейчас. Вполне вероятно, что время начала раскрытия Евразийского бассейна несколько омолаживалось в сторону моря Лаптевых.

Примерно 45 Ма начался ультрамедленный спрединг хребта Гаккеля. Согласно с нашими моделями сейсмостратиграфии, примерно 45–34 Ма и 20–0 Ма на поднятии Альфа-Менделеева, на хребте Ломоносова и на Чукотском Бордерленде были фазы сбросообразования. Синхронность растяжения и сбросообразования в полосе шириной порядка 1300 км и ультрамедленного спрединга в хребте Гаккеля указывает, вероятно, на то, что причиной спрединга было региональное тектоническое растяжение. Вероятно, ультрамедленный спединг на хребте Гаккеля носил пассивный характер. То есть, не некие геодинамические процессы под срединно-океаническим

хребтом, а региональные тектонические силы были причиной раздвижения литосферных плит.

Состав и строение океанической коры Евразийского бассейна — это особая тема исследований, которой в последние годы посвящено много работ. Есть минимум два типа коры: кора «нормального» спрединга и кора ультрамедленного спрединга. Обычно считается, что кора «нормального» спрединга имеет магматический базальтовый состав. Кора ультрамедленного спрединга в значительной мере представлена эксгумированным мантийным веществом (серпентинитами) с добавками в разной степени базальтового (габброидного) вещества.

**Заключение.** В мезозое и кайнозое мы выделяем четыре основных этапа развития Арктического океана.

1. Баррем (апт)-альб (~125–100 Ма). Формирование вулcano-тектонического поднятия Альфа-Менделеева и сопряженных бассейнов типа Подводников, Макарова, Стефанссона и др. Тектоника была во внутриплитном режиме. Геодинамика объясняется наличием горячего вещества в мантии.

2. Поздний мел (100–70 Ма). Основная фаза раскрытия Канадского бассейна. Бассейн раскрывался как задуговой бассейн для Тихоокеанской зоны субдукции.

3. Поздний поздний мел-палеоцен (~70–56 Ма). Внутриплитный рифтинг, который охватил часть Амеразийского бассейна, район моря Лаптевых и область будущего Евразийского бассейна. На огромной

территории формировалось большое количество сбросов. Это рифтовое событие связано уже с геодинамикой Атлантической системы.

4. Эоцен-квартер (56–0 Ма). Поэтапное раскрытие Евразийского бассейна. При этом, в основном между 45 и 34 Ма формировались многочисленные сбросы в районе поднятия Альфа-Менделеева. Многие сбросы формировались и в неогене.

**Благодарности.** Авторы благодарны многим коллегам из ВНИИОкеангеология, ГИН РАН, ИО РАН,

института им. А.П. Карпинского, ИМГРЭ, ПАО «НК Роснефть», Московского, Новосибирского и Санкт-Петербургского университетов, а также из Магадана и Якутска за дискуссии по геологии Арктики. Мы благодарны многим зарубежным исследователям из Германии, США, Канады, Норвегии, Дании, Китая, Франции, Англии за многолетние плодотворные обсуждения.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 24-17-00020).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лобковский Л.И., Шитлов Э.В., Кононов М.В. Геодинамическая модель верхнемантийной конвекции и преобразования литосферы Арктики в мезозое и кайнозое // Физика Земли. 2013. № 6. С. 20–38.

Мальшиев Н.А., Вержбицкий В.Е., Колюбакин А.А. и др. Технологические аспекты и опыт стратиграфического бурения в морях российской Арктики // Геология нефти и газа. 2024. № 3. С. 19–30.

Никишин А.М., Петров Е.И., Старцева К.Ф. и др. Сейсмостратиграфия, палеогеография и палеотектоника Арктического глубоководного бассейна и его российский шельфов // Труды Геологического института РАН. Вып. 632. 2022. 156 с.

Соколов С.Д., Лобковский Л.И., Верниковский В.А. и др. Тектоника и геодинамика Восточной Арктики в мезозое // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 4. С. 389–409.

Akinin V.V., Miller E.L., Toro J., et al. Episodicity and the dance of Late Mesozoic magmatism and deformation along the Northern Circum-Pacific margin: NE Russia to the Cordillera // Earth-Science Reviews. 2020, 208. P. 103272.

Aleshina K.F., Nikishin A.M., Rodina E.A., et al. Structure of the basement of the near-Laptev part of the Eurasian basin according to geological and geophysical data // Moscow University Geol. Bull. 2024. № 4. P. 102–115.

Backman J., Jakobsson M., Frank M., et al. Age model and core-seismic integration for the Cenozoic Arctic Coring Expedition sediments from the Lomonosov Ridge // Paleooceanography. 2008. 23 (1). <https://doi.org/10.1029/2007PA001476>.

Brotzer A., Funck T., Geissler W.H., et al. Geophysical insights on the crustal structure of Greenland's northern continental margin towards the Morris Jesup Spur // Tectonophysics. 2022. Vol. 843. P. 229588.

Brumley K. Geologic history of the Chukchi Borderland, Arctic Ocean // Stanford University. 2014. <http://purl.stanford.edu/hz857zk1405>

Bruvold V., Kristoffersen Y., Coakley B.J., et al. The nature of the acoustic basement on Mendeleev and northwestern Alpha ridges, Arctic Ocean // Tectonophysics. 2012, 514–517. P. 123–145.

Chauvet F., Sapin F., Geoffroy L., Ringenbach J.-C. Conjugate volcanic passive margins in the austral segment of the South Atlantic — Architecture and development // Earth-Sci. Rev. 2021. 212. P. 103461.

Chen Z., Dietrich J., Lane L.S., Li M., Dixon J. Beaufort-Mackenzie Tectono-Sedimentary Element // Drachev S.S., Brekke H., Henriksen E., Moore T. (eds) Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity // Geological Society. London, Memoirs. 2025. 57. <https://doi.org/10.1144/M57-2016-3>

Chernykh A.A., Yakovenko I.V., Kaminskiy V.D., et al. A Tectonic Scheme for the Amerasia Basin of the Arctic

Ocean // Doklady Earth Sciences. 2023a. Vol. 510, Part 2. P. 387–393.

Chernykh A.A., Yakovenko I.Y., Korneva M.S., Glebovsky V.u. Digital Models of the Deep Structure of the Earth's Crust in the Eurasian Basin of the Arctic Ocean // Geotectonics. 2023b. Vol. 57, Suppl. 1. P. S34–S52.

Chian D., Jackson H.R., Hutchinson D.R., et al. Distribution of crustal types in Canada Basin, Arctic Ocean // Tectonophysics. 2016. 691. P. 8–30.

Dobretsov N.L., Vernikovskiy V.A., Karyakin Y.V., et al. Mesozoic-Cenozoic volcanism and geodynamic events in the Central and Eastern Arctic // Russ. Geol. Geophys. 2013. 54. P. 874–887.

Døssing A., Hansen T.M., Olesen A.V., et al. Gravity inversion predicts the nature of the Amundsen Basin and its continental borderlands near Greenland // Earth and Planetary Science Letters. 2014. 408. P. 132–145.

Ernst R.E. Large Igneous Provinces // Encyclopedia of Geology (Second Edition). 2021. P. 60–68. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12528-X>

Faleide J.I., Abdelmalak M.M., Minakov A., et al. Eurasia Basin Composite Tectono-Sedimentary Element // Geological Society. London, Memoirs. 2025. Vol. 57.

Franke D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: Comparison of magma-poor and volcanic rifted margins // Mar. Petrol. Geol. 2013. 43. P. 63–87.

Funck T., Shimeld J. Crustal structure and magmatism of the Marvin Spur and northern Alpha Ridge, Arctic Ocean // Geophysical Journal International. 2023. Vol. 233. Iss. 1. April 2023. P. 740–768.

Gernigon L., Franke D., Geoffroy L., et al. Crustal fragmentation, magmatism, and the diachronous opening of the Norwegian-Greenland Sea // Earth-Science Reviews. 2020. 206. P. 102839.

Glebovsky V.Yu., Kaminsky V.D., Minakov A.N., et al. Formation of the Eurasia Basin in the Arctic Ocean as Inferred from Geohistorical Analysis of the Anomalous Magnetic Field // Geotectonics. 2006. Vol. 40. No. 4. P. 263–281.

Hein J.R., Mizell K., Gartman A. Neogene hydrothermal Fe- and Mn-oxide mineralization of Paleozoic continental rocks, Amerasia Basin, Arctic Ocean // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. 2024. 25. P. e2023GC010996.

Hutchinson D.R., Houseknecht D.W., Mosher D.C. Canada Basin Tectono-Sedimentary Element, Arctic Ocean // Drachev S.S., Brekke H., Henriksen E. and Moore T. (eds) Sedimentary Successions of the Arctic Region and their Hydrocarbon Prospectivity // Geological Society. London. 2025. Memoirs. 57. <https://doi.org/10.1144/M57-2022-49>

Hutchinson D.R., Jackson H.R., Houseknecht D.W., et al. Significance of Northeast-Trending Features in Canada Basin,

- Arctic Ocean // *Geochemistry, Geophys. Geosystems*. 2017. 18. P. 4156–4178.
- Jakobsson M., Mayer L.A., Bringsenparr C., et al. The international bathymetric chart of the Arctic Ocean Version 4.0 // *Sci. Data*. 2020. 7. P. 176.
- Kashubin S.N., Petrov O.V., Artemieva I.M., et al. Crustal structure of the Mendeleev Rise and the Chukchi Plateau (Arctic Ocean) along the Russian wide-angle and multichannel seismic reflection experiment “Arctic-2012” // *J. Geodyn.* 2018. 119. P. 107–122.
- Kossovaya O.L., Tolmacheva T.Yu., Petrov O.V., et al. Palaeozoic carbonates and fossils of the Mendeleev Rise (Eastern Arctic): study of sea bottom dredged material // *J. Geodyn.* 2018. 120. P. 23–44.
- Malyshev N.A., Verzhbitskii V.E., Danilkin S.M., et al. Stratigraphic drilling in the northeastern Laptev Sea: main results and further development // *Russian Geology and Geophysics*. 2025. Vol. 66. № 2. P. 142–159.
- Metelkin D.V., Abashev V.V., Vernikovskiy V.A., Mikhailtsov N.E. Paleomagnetic Evidence for the Iceland Plume Paleogeographic Stationarity and Early Cretaceous Manifestation in the High Arctic // *Doklady Earth Sciences*. 2021. Vol. 501. Part 2. P. 1015–1019.
- Mosher D.C., Hutchinson D.R. Canada Basin Geologic Structures of the Arctic Basin / Eds. A. Piskarev, V. Poselov, V. Kaminsky // Springer. Cham. Switzerland, 2019. P. 295–325.
- Mukasa S.B., Andronikov A., Brumley K., et al. Basalts from the Chukchi Borderland: <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar Ages and Geochemistry of submarine intraplate lavas dredged from the western Arctic Ocean // *American Geophysical Union*. 2020. <https://doi.org/10.1029/2019JB017604>
- Nikishin A.M., Aleshina K.F., Rodina E.A., et al. Tectonic evolution of the Amerasia Basin, Arctic Ocean // *Gondwana Research*. 2025. 146. P. 173–199.
- Nikishin A.M., Foulger G.R., Akinin V.V., et al. Arctic Cretaceous tectonic and igneous mega-province (TIMP): regional domains and geodynamics // *Journal of Geodynamics*. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2024.102031>
- Nikishin A.M., Gaina C., Petrov E.I., et al. Eurasia Basin and Gakkel Ridge, Arctic Ocean: Crustal asymmetry, ultra-slow spreading and continental rifting revealed by new seismic data // *Tectonophysics*. 2018. 746. P. 64–82.
- Nikishin A.M., Malyshev N.A., Petrov E.I. Geological Structure and History of the Arctic Ocean // EAGE Publications bv. 2014. <https://doi.org/10.3997/9789462821880>
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 2 — Arctic stratigraphy and regional tectonic structure // *Earth-Sci. Rev.* 2021b. 217. P. 103581.
- Nikishin A.M., Petrov, E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 3 — Mesozoic to Cenozoic geological evolution // *Earth-Sci. Rev.* 2021c. 217. P. 103034.
- Nikishin A.M., Petrov E.I., Cloetingh S., et al. Arctic Ocean Mega Project: Paper 1 — Data collection // *Earth-Sci. Rev.* 2021a. 217. P. 103559.
- Nikishin A.M., Rodina E.A., Startseva K.F., et al. Alpha-Mendeleev Rise, Arctic Ocean: A double volcanic passive margin // *Gondwana Res.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.10.010>
- O’Brein T.V., Miller E.L., Benowitz J.P., et al. Dredge samples from the Chukchi Borderland: Implications for paleogeographic reconstruction and tectonic evolution of the Amerasia Basin of the Arctic // *American Journal of Science*. 2016. Vol. 316. P. 873–924.
- Petrov O.V., Smelror M. (eds.). *Tectonics of the Arctic* // Springer Geology. 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46862-0>
- Piskarev A., Poselov V., Kaminsky V. (Eds.). *Geologic Structures of the Arctic Basin* // Springer International Publishing, Cham. 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-77742-9>
- Posamentier H.W., Nikishin A.M., Aleshina K.F., et al. Carbonate deposition in the Arctic during the Paleocene Eocene Thermal Maximum (PETM) and Early Eocene Climatic Optimum (EECO) // *Gondwana Research*. 2025. 139. P. 136–146.
- Shimeld J., Boggild K., Mosher D.C., Jackson H.R. Reprocessed multi-channel seismic-reflection data set from the Arctic Ocean, collected using icebreakers between 2007–2011 and 2014–2016 for the Canadian Extended Continental Shelf program // Geological Survey of Canada, Open File 8850. 2021, 1. <https://doi.org/10.4095/329248>
- Skolotnev S., Aleksandrova G., Isakova T., et al. Fossils from seabed bedrocks: Implications for the nature of the acoustic basement of the Mendeleev Rise (Arctic Ocean) // *Mar. Geol.* 2019. 407. P. 148–163.
- Skolotnev S.G., Fedonkin M.A., Korniychuk A. V. New Data on the Age of Magmatic Rocks in the Alpha–Mendeleev Rise (Arctic Ocean) Based on the Results of Isotope U/Pb Dating of Zircons // *Doklady Earth Sciences*. 2023. <https://doi.org/10.1134/S1028334X23601736>
- Weigelt E., Jokat W., Eisermann H. Deposition history and paleo-current activity on the southeastern Lomonosov Ridge and its Eurasian flank based on seismic data // *Geochemistry, Geophysics. Geosystems*. 2020. 21. P. e2020GC009133.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 551.763.1:550.384(477.9)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-18-22

## ГИГАНТСКИЕ АММОНИТЫ ИЗ СЕНОМАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО КРЫМА

**Евгений Юрьевич Барабошкин** ✉Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; EJBaraboshkin@mail.ru ✉,  
<https://orcid.org/0000-0003-4373-1543>

**Аннотация.** В сеноманских отложениях горы Кременная в бассейне р. Бодрак в Юго-Западном Крыму найден огромный аммонит *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* (Sharpe, 1855). Кроме того, еще один фрагмент крупного аммонита, обнаруженный в старых коллекциях, и определенный как *Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni* (Sharpe, 1855), был встречен в породах нижнего сеномана вблизи геологической базы МГУ в 1980-х годах. Это второе сообщение о находках подобных аммонитов в Крыму.

**Ключевые слова:** аммонит, *Parapuzosia (Austiniceras) austeni*, верхний мел, сеноман, биостратиграфия, Юго-Западный Крым

**Для цитирования:** Барабошкин Е.Ю. Гигантские аммониты из сеноманских отложений Юго-Западного Крыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 18–22.

## GIANT AMMONITES FROM THE CENOMANIAN DEPOSITS OF SOUTHWESTERN CRIMEA

**Evgeniy Yu. Baraboshkin** ✉Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; EJBaraboshkin@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4373-1543>

**Abstract.** A huge ammonite *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* (Sharpe, 1855) was found in the Cenomanian deposits of Kremennaya Mountain in the Bodrak River basin in southwestern Crimea. In addition, another fragment of a large ammonite, discovered in old collections and identified as *Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni* (Sharpe, 1855), was encountered in the Lower Cenomanian rocks near the Moscow State University geological base in the 1980s. This is the second report of such ammonites being found in Crimea.

**Keywords:** ammonite, *Parapuzosia (Austiniceras) austeni*, Upper Cretaceous, Cenomanian, biostratigraphy, South-Western Crimea

**For citation:** Baraboshkin E. Yu. Giant ammonites from the Cenomanian deposits of Southwestern Crimea. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 18–22. (In Russ.).

**Введение.** Остатки гигантских аммонитов встречаются в меловых отложениях Крыма сравнительно редко. Наиболее известными находками являются *Puzosia (Anapuzosia) grandis* Marcinowski и *P. (A.) naidini* Marcinowski, описанные Р. Марциновским [Marcinowski, 1977] (обе около 60 см в диаметре) из мелководных отложений верхнего альба. Голотипы этих аммонитов хранятся в музее Крымского учебно-научного центра МГУ имени профессора А.А. Богданова. В отложениях кампана-маастрихта также встречаются крупные (до 30–40 см в диаметре) раковины *Eurachydiscus* и *Pachydiscus*, изображенные в [Найдин, Шиманский, 1959; Атлас..., 1997]. Недавно был описан еще один крупный (диаметр фрагмента 33 см) аммонит *Parapuzosia (Parapuzosia) cf. leptophylla* (Sharpe) из сантонских отложений бассейна р. Кача [Барабошкин, Фокин, 2019].

В запаснике музея Крымского учебно-научного центра МГУ был обнаружен еще один гигантский аммонит, также относящийся к роду *Parapuzosia*, но происходящий из сеноманских отложений г. Кре-

менная (рис. 1) — *P. (A.) austeni* (Sharpe). Это неполный фрагмент диаметром 37 см (рис. 2). Находка сделана студентами геологического факультета МГУ группы Т.Ю. Тверитиновой несколько лет назад (точная дата и положение находки в разрезе на этикетке отсутствуют). Предположительно аммонит происходит из верхней части нижнего сеномана.

Еще один обломок фрагмента *Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni* (Sharpe) с высотой оборота 15 см (рис. 3) встречен в коллекции Д.П. Найдина. Находка была сделана В.А. Красиловым в июне 1981 г. в шоссейной выемке у базы МГУ. Фрагмент найден в нижнем сеномане (пачка II по [Алексеев, 1989]) над бентонитовым прослоем и происходит из карбонатной конкреции, с чем связано наличие на нем остатков перламутра.

Ранее три фрагмента *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* из данного района были описаны Р. Марциновским [Marcinowski, 1980]. Один из фрагментов изображен, его реконструированный диаметр составляет около 25 см, а размеры двух остальных неизвестны. Аммониты были найдены в разрезе

нижнего сеномана (пачка IV-1) в районе базы МГУ и с. Трудолюбовки.

**Палеонтологическое описание.** Таксономическое положение найденных аммонитов принято в соответствии с работой [Kennedy et al., 2024]. При описании использованы стандартные терминология и замеры раковин, приведенные в [Атлас..., 1997]. Образцы хранятся в Музее Землеведения МГУ имени М.В. Ломоносова (МЗ МГУ), коллекция № 165, и в Музее Крымского учебно-научного центра имени проф. А.А. Богданова, экз. См-129.

- Отряд Ammonoidea Zittel, 1884
- Подотряд Ammonitina Hyatt, 1889
- Надсемейство Desmoserataceae Zittel, 1895
- Семейство Desmoserataceae Zittel, 1895
- Подсемейство Puzosiinae Spath, 1922
- Род *Parapuzosia* Nowak, 1913
- Подрод *Austiniceras* Spath, 1922

**Типовой вид:** *Ammonites austeni* Sharpe, 1855 (р. 28, pl. 12, fig. 1), по оригинальному определению [Spath, 1922, p. 127].

Прежде чем перейти к описанию находок, следует сказать несколько слов о самостоятельности таксона *Parapuzosia* (*Austiniceras*). Дело в том, что, как было отмечено К. Райтом и У. Кеннеди [Wright, Kennedy, 1984], этот подрод мог бы являться макроконхом альб-сеноманского рода *Puzosia*, поскольку он известен только по крупным экземплярам. Сами авторы рассматривали данный подрод как самостоятельный таксон. Позже точку зрения о том, что *Parapuzosia* (*Austiniceras*) и *Puzosia mayoriana* (d'Orbigny) являются диморфами, принял Й. Леман [Lehmann, 1998] и, со ссылкой на эту работу, другие авторы [Kin, Niedźwiedzki, 2012]. В 2007 г. У. Кеннеди и Ж.-Л. Латиль [Kennedy, Latil, 2007] описали крупный фрагмент *Puzosia mayoriana* и показали его отличия от *Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*, подтвердив самостоятельность подрода *Parapuzosia* (*Austiniceras*). Дополнительные сведения, подтверждающие эти отличия, были опубликованы в статье [Gale et al., 2011]. Таким образом, *Parapuzosia* (*Austiniceras*) следует считать самостоятельным подродом.

Диагноз подрода и отличия от *Puzosia* (*Puzosia*) наиболее четко были сформулированы в работе М. Купера [Cooper, 1978]: раковина *Parapuzosia* (*Austiniceras*) крупная, с плоскими сходящимися боковыми сторонами и узкой вентральной стороной. Пережимы, как правило, прямые, рельефные, переходят на вентральную сторону; жилая камера покрыта частыми рельефными ребрами, доходящими до пупочного края.

*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni* (Sharpe, 1855)

Рис. 2

- Ammonites austeni*: Sharpe, 1855, p. 28, pl. 12, fig. 1a, b (не fig. 2 = *Anapuzosia dibleyi* Spath)
- Austiniceras* sp. Szász, Lâcâtușu, 1974, p. 211, pl. III
- Austiniceras austeni*: Kennedy, 1971, p. 38, pl. 11, fig. 1; pl. 12, fig. 1a, b (синонимика)

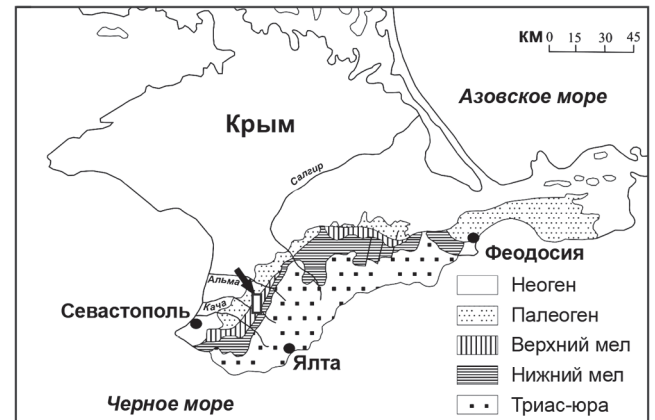
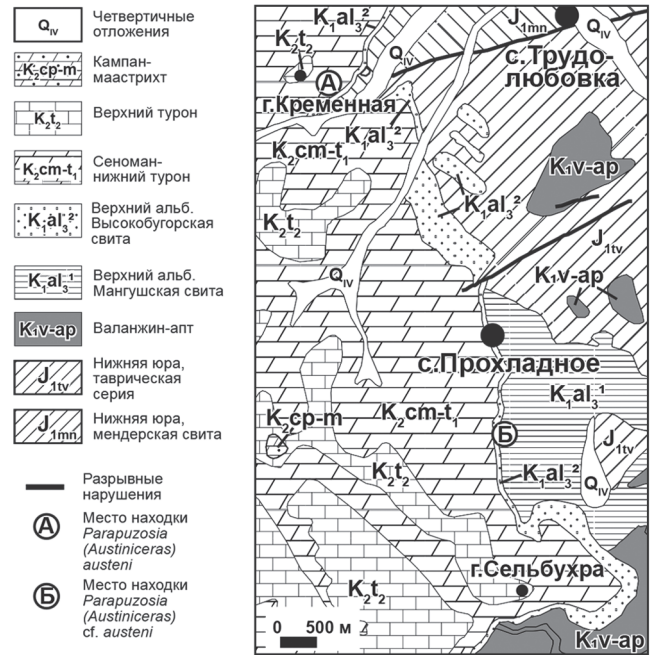


Рис. 1. Место нахождения *Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni* (Sharpe) и *Parapuzosia* (*Austiniceras*) cf. *austeni* (Sharpe)

*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Wright, Kennedy, 1981, p. 20 (синонимика)  
*Austiniceras austeni*: Kaplan, 1982, S. 11, Abb. 15  
 не *Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Цанков, 1982, с. 27, табл. VIII, фиг. 1, 1а, 2, 2а  
 ? *Parapuzosia* (*Austiniceras*) sp.: Chancellor et al., 1994, p. 20  
*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Wright, Kennedy, 1996, p. 398, pl. 121  
*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Wright et al., 1996, p. 78, fig. 58 (переизображен голотип из [Kennedy, 1971])  
*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Mortimore et al., 2001, p. 152, pl. 8, fig. 1–5  
*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Wright, Kennedy, 2002, p. 178, Text-fig. 9.1  
*Austiniceras* cf. *austeni*: Мар'яш, Курепа, 2013, с. 10, Табл. I–IV.  
*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*?: Wilmsen, Nagm, 2014, p. 203, Abb. 2a  
*Parapuzosia* (*Austiniceras*) *austeni*: Wilmsen, Nagm, 2014, p. 203, Abb. 2b (синонимика)

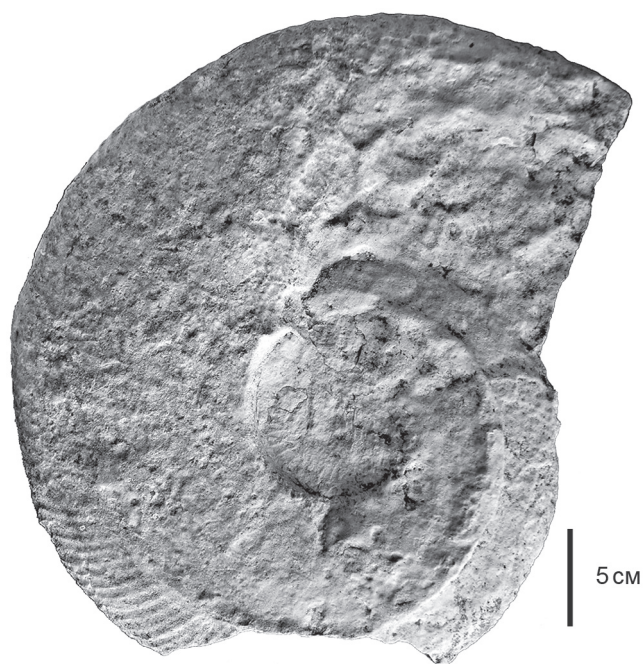


Рис. 2. *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* (Sharpe), экз. № См-129, Музей Крымского учебно-научного центра имени проф. А.А. Богданова, ? нижний сеноман, южный склон г. Кременная в районе пос. Трудолюбовка, Бахчисарайский район, Республика Крым. Сборы студентов МГУ, 2010–2020 гг.

*Parapuzosia (Austiniceras) austeni*: Kennedy, 2015, p. 134, Fig. 97

не *Parapuzosia (Austiniceras) austeni*: Kohout, 2016, p. 11, Tab. VI, obr. A, B

*Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni*: Kennedy, Gale, 2017, p. 86

*Parapuzosia (Austiniceras) austeni*: Kennedy et al., 2024, p. 22, Fig. 17A–E, 18A–D, 19A, B, 20 (синонимика)

**Лектотип** — экземпляр BMNH С3382, хранящийся в Музее Естественной Истории, Лондон, выбран Л.Ф. Спэтом [Spath, 1922, p. 127] из оригиналов Д. Шарпа [Sharpe, 1855, tab. 12, fig. 1a, b] Нижнего Писчего Мела [Lower Chalk] Гилфорда, графство Суррей; переизображен в работах [Kennedy, 1971, pl. 11, fig. 1; pl. 12, fig. 1 a-b; Wright, Kennedy, 1984, text-fig. 5; Wright et al., 1996, p. 78, fig. 58].

**Описание.** Раковина крупная (максимальный известный диаметр достигает 1,5 м), полуэволютная. Наш образец представляет собой расплющенный фрагмент диаметром  $D = 37$  см со следами последующего оборота, так что полный диаметр раковины составлял не менее 60 см. Поперечное сечение овальное, но у нашего экземпляра оно сильно искажено за счет сплющивания раковины параллельно плоскости симметрии. Высота последнего оборота  $B = 160$  мм. На обломке *Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni* (рис. 3) форма поперечного сечения видна гораздо лучше и отвечает лектотипу вида; высота оборота этого фрагмента  $B = 140$  мм. Пупок мелкий, а пупочная стенка вертикальная, узкая с достаточно резким умбиликальным перегибом,  $D_u = 100$  мм.

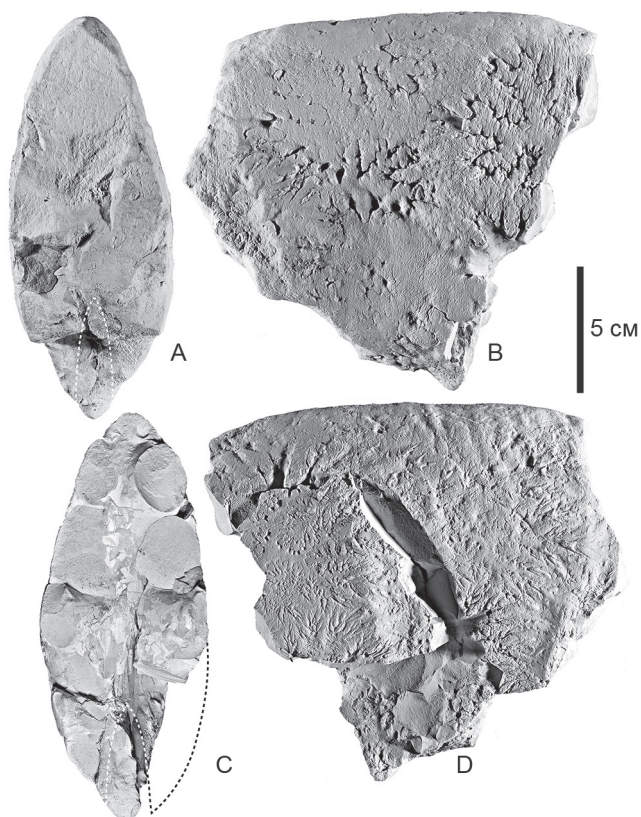


Рис. 3. *Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni* (Sharpe), экз. № 165/1, Музей Земледелия МГУ, нижний сеноман, пачка II, над бентонитовым прослоем. Шоссейная выемка у базы МГУ в районе пос. Прохладное, Бахчисарайский район, Республика Крым. Сборы В.А. Красиловой, 1981 г. А, С — поперечное сечение; В, D — сбоку

Главные ребра сохранились плохо, их количество невозможно подсчитать. Количество вторичных ребер достигает 45 на 1/3 оборота; они видны только в верхней трети боковой стороны и пересекают вентральную сторону существенно понижаясь. На обороте присутствует до 3 пережимов. Лопастная линия фрагментарно видна на образце *Parapuzosia (Austiniceras) cf. austeni* (рис. 3) и характеризуется значительной рассеченностью.

**Сравнение.** Из наиболее близких форм можно назвать *Austiniceras antsohense* Collignon из верхнего сантона Мадагаскара [Collignon, 1961], отличающийся большей involucre, более редкими вторичными ребрами, и сглаживанием ребристости на поздних оборотах. Еще одна весьма близкая форма — *Parapuzosia (Austiniceras) transsilvanicum* (Simionescu), голотип которой переизображен в работе [Szász, 1983]. Вполне возможно, что этот вид является синонимом *Parapuzosia (Austiniceras) austeni*, поскольку основные отличия заключаются в более широком сечении и отсутствии рельефных ребер.

**Замечания.** Список синонимики *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* достаточно большой, поэтому здесь приведены ссылки на работы, в которых отражена предыдущая синонимика, а также на работы, не отмеченные предыдущими исследователями. В большинстве случаев аммониты, определенные

как *P. (A.) austeni*, отвечают данному виду, поэтому мы здесь их не комментируем.

*Austiniceras* sp. [Szász, Lâcâtușu, 1974, p. 211, pl. III] не имеет существенных отличий от *Parapuzosia (Austiniceras) austeni*, но также может быть отнесен и к *P. (A.) transilvanicum*.

«*Parapuzosia (Austiniceras) austeni*» [Цанков, 1982, с. 27, табл. VIII]: фиг. 1 — это небольшой экземпляр с сильно вздутыми оборотами и глубоким пережимом, напоминающий позднегуронский *Tongoboryseras* (и, кстати, происходящий из верхнего турона); фиг. 2 — это груборебристая форма с широким сечением, возможно относящаяся к роду *Eopachydiscus*.

Для ? *Parapuzosia (Austiniceras)* sp. фрагментарной сохранности [Chancellor et al., 1994, p. 20], описание которого не сопровождалось изображением, авторы предполагали, что он относится к виду *P. (A.) austeni*.

«*Parapuzosia (Austiniceras) austeni*» из нижнего турона Чехии, изображенный в квалификационной работе [Kohout, 2016, p. 11, Tab. VI, obr. A, B] представляет собой крупную инволютную не орнаментированную форму, относящуюся, вероятнее всего, к роду *Placenticeras*.

**Распространение** (рис. 4). Сеноман-турон Англии, Франции, Германии, Испании, Чехии, Польши, Южной Африки, ? Туниса, нижний сеноман Восточной Гренландии, Крыма, верхний сеноман Вольно-Подоллии; средний-верхний сеноман Японии. Вид *austeni* указывается без изображения из верхней части нижнего сеномана Копет-Дага, зона *Euomphaloceras euomphalum*, подзона *Placenticeras grossouvrei* [Мания, 1974], а также из сеномана Абхазии и Грузии [Гамбашидзе, 1979].

**Материал.** Почти целый фрагмокон Ст-129 (рис. 2) находится в Музее Крымского учебно-научного центра имени проф. А.А. Богданова. Обломок фрагмокона *Parapuzosia (Austiniceras)* cf. *austeni* хранится в Музее Землеведения МГУ имени М.В. Ломоносова, № 165/1.

**Обсуждение и заключение.** Находки *Parapuzosia (Austiniceras)* в разрезах Юго-Западного Крыма приурочены к нижнему сеноману (пачки II — IV-1 согласно схеме [Алексеев, 1989]). В этом же нижне-сеноманском интервале широко распространены остатки *Puzosia mayoriana*, изображенные в [Найдин, Шиманский, 1959 и Marcinowski, 1980] как *Puzosia planulata* (J. de C. Sowerby). Поэтому, возвращаясь к дискуссии о самостоятельности подрода *Para-*



Рис. 4. Схема географического распространения *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* (Sharpe) на палеотектонической основе (на основе реконструкций R. Blakey, с изменениями)

*puzosia (Austiniceras)*, полученные нами данные не противоречат концепции макроконхов, но и не подтверждают ее.

Любопытным фактом остается то, что в средне-верхнесеноманских и туронских отложениях Крыма *Parapuzosia (Austiniceras) austeni* не встречены, тогда как в хорошо изученных разрезах Великобритании этот вид наиболее широко распространен в среднем-верхнем сеномане [Kennedy, 1971; Wright, Kennedy, 1984].

Хотя остатки найденных в Крыму гигантских аммонитов сравнительно редки, их стратиграфическое положение в разрезе не противоречит основным закономерностям, выявленным для подобных гигантов [Stevens, 1988]. В этой работе была намечена связь максимумов встречаемости гигантских аммонитов с трансгрессивными событиями позднего мела, приходящимися на сеноман-турон и кампан. Представители *Parapuzosia (Austiniceras)* в Крыму как раз встречены в трансгрессивных отложениях нижнего сеномана, предшествовавших среднесеноманскому перерыву, связанному с секвентной границей [Gale et al., 1999] и приходящихся на один из этапов глобального эвстатического события.

**Благодарности.** Автор признателен Е.Л. Зайцевой (МГУ) за помощь в работе с запасниками Крымского учебно-научного центра МГУ имени профессора А.А. Богданова. Я благодарю А.Ю. Гужикова и В.Б. Сельцера за редакционную правку статьи.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алексеев А.С. Верхний мел // Геологическое строение Качинского поднятия Горного Крыма. Стратиграфия мезозоя / Ред. О.А. Мазарович, В.С. Милеев. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. С. 123–157.  
 Атлас меловой фауны Юго-Западного Крыма / Ред. В.В. Аркадьев, Т.Н. Богданова. СПб.: Пангея, 1997. 357 с.  
 Барабощкин Е.Ю., Фокин П.А. Находки головоногих моллюсков из пограничного сантон-кампанского интервала разреза Аксудере (Горный Крым) // Бюлл. МОИП. Отдел геологический. 2019. Т. 94, вып. 4. С. 77–84.

Гамбашидзе Р.А. Стратиграфия верхнемеловых отложений Грузии и смежных с ней областей Азербайджана и Армении // Тр. Геол. ин-та АН ГССР. Нов. сер. 1979. Вып. 61. 266 с.  
 Мания А.А. Стратиграфия и аммониты сеноманских отложений Южной Туркмении // Стратиграфия и фауна моллюсков верхнемеловых и палеоценовых отложений южной и восточной Туркмении. Ашхабад: Ылым, 1974. С. 81–160.  
 Мар'яш І., Курена Я. Знахідки великих амонітів підродини Puzosinae у верхньосеноманських відкладах

північно-східної частини Волино-Поділля // Палеонт. Збірн. 2013. № 45. С. 9–14.

Найдин Д.П., Шиманский В.Н. Головоногие моллюски // Атлас верхнемеловой фауны Северного Кавказа и Крыма / Ред. М.М. Москвин. М.: Гостоптехиздат, 1959. С. 166–220.

Цанков В. Горна креда. Cephalopoda (Nautiloidea, Ammonoidea) и Echinodermata (Echinoidea). Фосилите на България, т. Va. София: Изд-во на Българската Академия на Науките, 1982. 136 с. (На болг.).

Chancellor G.R., Kennedy W.J., Hancock J.M. Turonian ammonite faunas from central Tunisia // Palaeontol. Assoc. Spec. Pap. in Palaeontology 50. 1994. 118 p.

Collignon M. Ammonites néocrétaçées du Menabe (Madagascar). VII. Les Desmocerotidae // Ann. Géol. Serv. Mines Madagascar. 1961. Fasc. XXXI. 115 p.

Cooper M.R. Uppermost Cenomanian — basal Turonian Ammonites from Salinas, Angola // Ann. South African Museum. 1978. Vol. 75. Pt. 5. P. 51–152.

Gale A.S., Bown P., Caron M., et al. The uppermost Middle and Upper Albian succession at the Col de Palluel, Hautes-Alpes, France: An integrated study (ammonites, inoceramid bivalves, planktonic foraminifera, nannofossils, geochemistry, stable oxygen and carbon isotopes, cyclostratigraphy) // Cretaceous Res. 2011. Vol. 32. Iss. 2. P. 59–130.

Gale A., Hancock J.M., Kennedy W.J. Biostratigraphical and sequence correlation of the Cenomanian successions in Mangyshlak (W. Kazakhstan) and Crimea (Ukraine) with those in southern England // Bull. Inst. Roy. Sci. Nat. Belgique. Sci. de la Terre. 1999. Vol. 69. P. 67–86.

Kaplan U. Die Ammoniten des nordwestdeutschen Turon und Unterconiac // Arbeit. Paläont. Hannover. 1982. № 1. S. 1–19.

Kennedy W.J. Cenomanian ammonites from southern England // Palaeontol. Assoc. Spec. Pap. in Palaeontology 8. 1971. 133 p.

Kennedy W.J. Les ammonites // Stratotype Cénomanien / Ed. N. Morel. Mus. Nat. Hist. Nat. Paris & Biotope, Mèze, 2015. P. 120–159.

Kennedy W.J., Gale A.S. Trans-Tethyan correlation of the Lower–Middle Cenomanian boundary interval, southern England (Southernham, near Lewes, Sussex) and Douar el Khiana, northeastern Algeria // Acta Geol. Polon. 2017. Vol. 67. № 1. P. 75–108.

Kennedy W.J., Kelly S.R.A., Schneider S. Early Cenomanian ammonites from East and North-East Greenland // GEUS Bulletin 57. 2024. 8366.

Kennedy W.J., Latil J.-L. The Upper Albian ammonite succession in the Montloux section, Hautes-Alpes, France // Acta Geol. Polon. 2007. Vol. 57. № 4. P. 453–478.

Kin A., Niedźwiedzki R. First record of the puzosiine ammonite genus *Pachydesmoceras* from the Middle and Upper

Turonian of Poland // Cretaceous Res. 2012. Vol. 33. № 1. P. 15–20.

Kohout O. Amoniti spodního turonu české křídové pánve: taxonomický přehled, stratigrafie a paleoekologie. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav geol. Paleont. Praha, 2016. 25 p.

Lehmann J. Taxonomy and nomenclature of large desmocerotids (Ammonoidea) from the Cenomanian and Turonian (Upper Cretaceous) of Western Europe // N. Jahrb. Geol. Paläont. 1998. Bd. 207. Hf. 3. P. 405–418.

Marcinowski R. Cenomanian ammonites from German Democratic Republic, Poland, and the Soviet Union // Acta Geol. Polon. 1980. Vol. 30. № 3. P. 215–325.

Marcinowski R. Giant ammonites of the subgenus *Anapuzosia* Matsumoto, 1954, from the Upper Albian of Crimea, Soviet Union // Acta Geol. Polon. 1977. Vol. 27. № 3. P. 409–416.

Mortimore R.N., Wood C.J., Gallois R.W. British Upper Cretaceous Stratigraphy // Geol. Conservat. Review Series. 2001. Vol. 23. P. xx+558.

Sharpe D. Description of the fossil remains of Mollusca found in the Chalk of England. Cephalopoda. Part 2 // Palaeontogr. Soc. Monographs, No. 31. 1855. P. 27–36.

Spath L.F. On the Senonian ammonite fauna of Pondoland // Trans. Roy. Soc. South Africa. 1922. Vol. 10. № 3. P. 113–147.

Stevens G.R. Giant Ammonites: a review / Wiedmann J., Kullmann J. (Eds.). Cephalopods — Present and Past. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1988. P. 141–166.

Szász L. Contribution à l'étude des Ammonites cénomaniennes de la Roumanie // Mem. Inst. Géol. Geofiz. 1983. Vol. 31. P. 237–260.

Szász L., Lăcătușu A. Contribuții la studiul amonitilor din Neocretacicul bazinului Babadag (Dobrogea de Nord) // Dări de seamă ale ședințelor — Inst. Geol. Geofiz. 1974. Vol. 60. P. 205–215.

Wilmsen M., Nagm E. Ammoniten // Geol. Saxonica. 2014. Vol. 60. № 1. P. 201–240.

Wright C.W., Callomon J.H., Howarth M.K. Cretaceous Ammonoidea. Treatise on Invertebrate Paleontology. Pt. L. Mollusca, revised. Vol. 4. GSA: University of Kansas, 1996. 362 p.

Wright C.W., Kennedy W.J. A Monograph of the Ammonoidea of the Lower Chalk. Part 5 // Palaeontogr. Soc. Monograph 601. 1996. P. 320–403.

Wright C.W., Kennedy W.J. Ammonites // Smith A.B., Batten D.J. (Eds.). Fossils of the Chalk. Palaeontological Association Field Guide to Fossils. № 2 (revised) / Palaeont. Assoc. London, 2002. P. 76–218.

Wright C.W., Kennedy W.J. The Ammonoidea of the Lower Chalk, part 1 // Palaeontogr. Soc. Monograph 567. 1984. P. 1–126.

Статья поступила в редакцию 10.09.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 551.86

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-23-28

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ ВОРОНЕЖСКОЙ АНТЕКЛИЗЫ В ТУРОН-КОНЬЯКСКОЕ ВРЕМЯ ПО ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Руслан Рустемович Габдуллин<sup>1✉</sup>, Людмила Федоровна Копаевич<sup>2</sup>,  
Наталья Викторовна Бадулина<sup>3</sup>, Кирилл Владимирович Сыромятников<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; gabdullin@geokhi.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lfkoepavich@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nvbadulina@mail.ru, IstinaResearcherID (IRID): 427730

<sup>4</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

**Аннотация.** В результате обобщения большого массива данных предложена палеогеографическая модель и уточнена геологическая история развития района Воронежской антеклизы в туронское и коньякское время. Сильная фациальная изменчивость, как и изменчивость мощностей осадков объясняется вертикальными тектоническими движениями на общем фоне поднятия Лавразии. Относительно небольшая глубина эпиконтинентального бассейна (30–50 м) очень чувствительна к вертикальным тектоническим движениям. При их амплитуде около 10 м береговая линия смещается на десятки — сотни километров, а мелководный бассейн быстро сменяется крайне мелководным, распадающимся на серию изолированных бассейнов, окруженных палеоподнятиями, с которых начинается транспорт обломочного материала. В туронское время в условиях аридного типа климата трансгрессия приходит из океана Тетис с юга, и накапливаются в основном карбонатные отложения. В коньякское время трансгрессии приходят с юга (теплые воды, формируются карбонатные осадки) и с севера (холодные воды, аккумулируются кремнистые осадки), в условиях гумидного типа климата объем терригенного сноса возрастает.

**Ключевые слова:** Воронежская антеклиза, геологическая история, модель седиментации, палеогеография, туронский век, коньякский век

**Для цитирования:** Габдуллин Р.Р., Копаевич Л.Ф., Бадулина Н.В., Сыромятников К.В. Геологическая история Воронежской антеклизы в турон-коньякское время по литолого-геохимическим данным // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 23–28.

## GEOLOGICAL HISTORY OF THE VORONEZH ANTECLISE DURING THE TURONIAN-CONIACIAN TIME BASED ON LITHOLOGICAL AND GEOCHEMICAL DATA

Ruslan R. Gabdullin<sup>1✉</sup>, Lyudmila F. Kopaeich<sup>2</sup>, Natalya V. Badulina<sup>3</sup>,  
Kirill V. Syromyatnikov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lfkoepavich@mail.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nvbadulina@mail.ru

<sup>4</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of RAS, Moscow, Russia; sykirv@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8798-4425>

**Abstract.** As a result of summarizing a large amount of data, a paleogeographic model has been proposed and the geological history of the development of the Voronezh anteclise in the Tithonian and Cognacian periods has been clarified. The strong facies variability, as well as the variability of sedimentary thicknesses, is explained by vertical tectonic movements against the backdrop of the uplift of Laurasia. The relatively shallow depth of the epicontinental basin, which is around 30–50 meters, is highly sensitive to vertical tectonic movements. With an amplitude of about 10 meters, the coastline shifts by tens or hundreds of kilometers, and the shallow basin is quickly replaced by an extremely shallow basin that splits into a series of isolated basins surrounded by paleo-uplifts, from which the transport of clastic material begins. During the Tournasian period, in an arid climate, transgressions occur from the Tethys Ocean, coming from the south, and carbonate deposits are primarily accumulated. During the Cognacian time, transgressions came from the south (warm waters, carbonate sediments formed) and from the north (cold waters, siliceous sediments accumulated), and the volume of terrigenous denudation increased in a humid climate.

**Keywords:** Voronezh anteclise, geological history, sedimentation model, paleogeography, Turonian age, Coniacian age

**For citation:** Gabdullin R.R., Kopaevich L.F., Badulina N.V., Syromyatnikov K.V. Geological history of the Voronezh antecline during the Turonian-Coniacian time based on lithological and geochemical data. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 23–28. (In Russ.).

**Введение.** Сильная фациальная изменчивость и вариации мощностей турон-коньякских отложений Воронежской антеклизы, видимые на относительно небольшом расстоянии, сформированные во время глобального относительно высокого стояния уровня Мирового океана (рис. 1) традиционно объясняются сменой палеогеографических обстановок, а точнее — условий седиментации. Однако, как на таком небольшом расстоянии эти условия могли меняться и что было этому причиной до сих пор вызывает дискуссии. Авторами статьи была предпринята попытка обобщения большого массива данных с целью предложить модель условий осадконакопления, вызвавшую формирование таких осадочных последовательностей. Естественно, что такую модель невозможно рассматривать в отрыве от геологической истории развития Воронежской антеклизы.

**Методика и материал исследований.** Данная обобщающая статья подводит итог многолетнему исследованию коллектива авторов данного района. Ранее коллективом авторов в разрезах Воронежской антеклизы по смене литологического состава и палеонтологической характеристики стратонев были установлены эвстатические циклы [Габдуллин, 2002; Олферьев и др., 2005; Габдуллин и др., 2021]. Для изученных разрезов были выделены системные тракты секвенций (трансгрессивный и высокого стояния), привязанные к ранее установленным пачкам [Габдуллин, 2007]. По литолого-геохимическим критериям были определены ключевые индикаторы условий осадконакопления — палеосоленость, палеоглубины и палеотемпературы [Габдуллин, 2002; Олферьев и др., 2005; Габдуллин и др., 2021]. Расчетные данные были скоррелированы с палеонтологической характеристикой, чтобы данные по геохимии не оказались «в отрыве от жизни», в чем помогли так называемые «живые ископаемые» — организмы, дожившие до наших дней и условия обитания которых известны. Сюда, безусловно, относятся фораминиферы, в первую очередь планктонные, систематический состав которых изменился, но типы жизненной стратегии сохранились [Копеевич, 2011].

**Геологическая история Воронежской антеклизы в турон-коньякское время.** Дадим комплексную характеристику самих отложений и условий их формирования для разработки модели седиментации.

**Литолого-фациальная характеристика осадков.** В туронское время карбонатное осадконакопление происходило в мелководно-морских условиях эпиконтинентального бассейна (рис. 1, А). Доминировали чистые карбонатные осадки без примесей (писчий мел), местами в разрезе и по площади накапливались терригенно-карбонатные осадки (песчаный мел в основании, прослой глинистого мела в толще мела; мергели).

В коньякское время состав осадков становится более разнообразным и включает в себя карбонатные, терригенно-карбонатные и терригенно-карбонатно-кремнистые образования, которые аккумуляровались в различных палеогеографических обстановках от глубоководно- до мелководно-морских с различным гидродинамическим режимом (рис. 1, В). Такая фациальная изменчивость могла быть связана с неровностями рельефа морского дна и сменой расположения источников сноса [Савко, Иванова, 2009].

Причины сильной фациальной изменчивости состава осадков Воронежской синеклизы в коньякское время могли включать миграцию положения береговой линии и как следствие увеличение или уменьшения терригенного привноса с суши; нестабильность гидродинамического режима, вызванную расчлененным палеорельефом морского дна. Последнее обстоятельство влияло на состав биоценоза и как следствие долю и характер биогенного компонента седиментации [Савко, Иванова, 2009].

**Палеотемпературная характеристика.** Для условий накопления турон-коньякских отложений Воронежской антеклизы эпиконтинентального бассейна Русской плиты характерны вариации температуры пределах 23,5–26,5 °С, снижение температуры поверхностных вод на 1,5–2 °С на турон-коньякском рубеже (рис. 1, В). Можно выделить относительно более теплые эпохи — конец раннего турона (19–22 °С, рис. 1, А), поздний турон–ранний коньяк (19–20 °С). К относительно более холодным эпохам относятся конец раннего турона и средний турон (18,5–19,5 °С) и средний коньяк–ранний сантон (18,5–19 °С, рис. 1, В) [Габдуллин и др., 2021].

**Палеоклиматическая характеристика.** Турон-ранний коньяк — это относительно аридный тип климата (рис. 1, А-В), а средний-поздний коньяк — более гумидный (рис. 1, В) [Габдуллин и др., 2021].

**Палеогалинометрическая характеристика.** Присутствие иглокожих (помимо ракообразных и пелеципод, включая иноцерам) и находки глауконита свидетельствуют о нормальной солёности эпиконтинентального морского бассейна, покрывавшего район Воронежской антеклизы в турон-коньякское время [Габдуллин и др., 2021; Савко, Иванова, 2009].

**Палеобатиметрическая характеристика.** Вариации глубины эпиконтинентального бассейна составляли от 30 до 80 м (рис. 1, А, В) и до нуля — во время формирования перерывов — в середине раннего турона, на турон-коньякском рубеже (рис. 1, В) и в середине раннего коньяка [Габдуллин и др., 2021]. Эвстатические флуктуации контролировались астрономо-климатическими циклами Милютин–Миланковича, в частности циклами эксцентриситета орбиты Земли и тектоническим фактором. Карбонатные отложения туронского, коньякского и сантонского ярусов Воронежской антеклизы отвечают

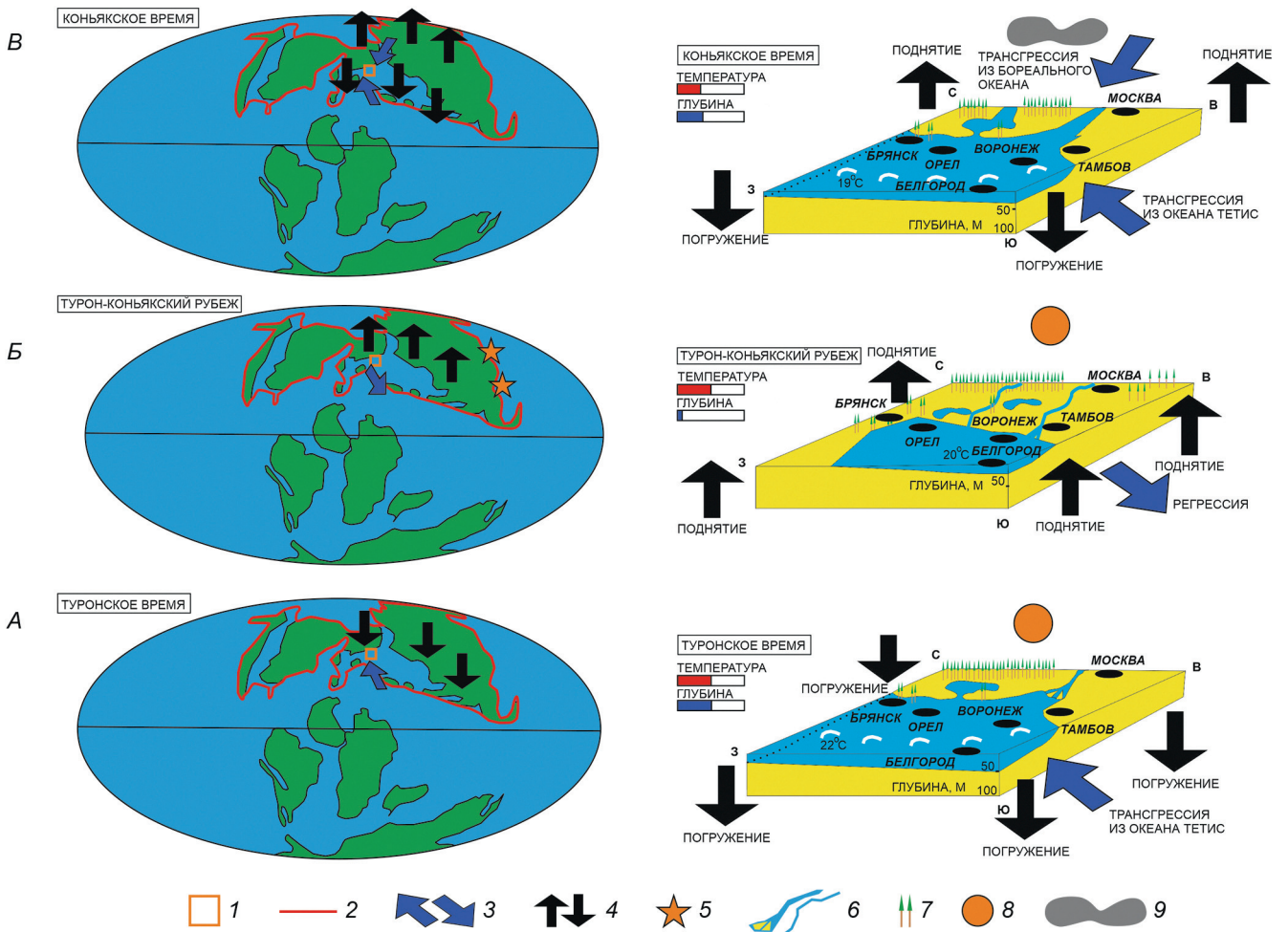


Рис. 1. Палеогеографические схемы для турон-коньякского времени, по [Averianov, 2014; Scotise, 2003]: А — туронское время, Б — турон-коньякский рубеж, В — коньякское время); 1 — район Воронежской антеклизы, 2 — граница Лавразии, 3 — направления трансгрессий и регрессий, 4 — направления вертикальных тектонических движений, 5 — места тектоно-магматической активизации, 6 — реки (терригенный снос), 7 — наземная растительность, 8 — аридный тип климата, 9 — гумидный тип климата

максимуму трансгрессии. Регрессия фиксируется в кампанском веке [Объяснительная..., 2022].

**Фазы корообразования.** В указанном интервале геологического времени формирования кор выветривания на Воронежской антеклизе не происходило. До турон-коньякского интервала времени имела место раннемеловая эпоха корообразования, приуроченная к доаптскому перерыву, а после — раннепалеогеновая эпоха корообразования (ранний-средний палеоцен). Мощность последней — латеритной коры выветривания может достигать 12 м, она представлена бурыми железняками, кремнисто-глинистыми породами хоперского горизонта. Ее развитие протекало на закарстованной поверхности меловых карбонатных пород. Вещественно она представлена выветрелой частью кровли массивов карбонатных пород мелового возраста и покровами делювиально-пролювиальных отложений, состоящих из продуктов ее переноса и последующего переотложения [Савко, 1979].

**Фазы карстообразования** [Трегуб, Трегуб, 2002]. Для мел-мергельного карста ключевыми временами его проявления являются новейшая эпоха, охватывающая неоген и четверть и предпалеогеновая.

Каждая из них неоднородна по внутренней структуре и характеризуется наличием более кратковременных периодов активизации карста, связанных с геоморфологическими циклами континентального развития территории и климатическими изменениями. Для предпалеогеновой поверхности несогласия характерны формы тропического карста, специфика которого заключается в преимущественном интенсивном развитии поверхностного выщелачивания с образованием крупных котловин при весьма ограниченном распространении глубинных и провальных образований, свойственных карсту влажного умеренного климата. Такие формы с размерами в плане, измеряющимися сотнями метров и первыми километрами установлены в кровле мела в области Острогжского и Калачского поднятий [Трегуб, Трегуб, 2002].

**Тектонические события и модель условий осадконакопления на Воронежской антеклизе.** Рассматриваемая область Воронежской антеклизы в турон-коньякское время располагалась на теле суперматерика Лавразия. Лавразия местами была покрыта эпиконтинентальными морями (рис. 1, А-В).

В туронско-коньякское время в Тихом океане произошла крупная перестройка плит, которая привела к синхронной кульминации сжатия в Восточной Азии, на восточной окраине Лавразии (рис. 1, Б). Максимум растяжения океанической коры в Тихом океане вызвал одновременное сжатие в западном направлении как вдоль границ субдукции, так и во внутриплитной части Восточной Азии (восточной части Лавразии), что произошло  $\approx 89$ –87 млн лет назад (в коньякском веке) [Song et al., 2015]. На глобальной кривой эвстатических вариаций турон–коньякскому интервалу отвечает локальный пик (максимум, +10 м), который согласно [van der Meer et al., 2025] вызван тектоноэвстазией, а не гляциоэвстазией. Для равнинных частей Лавразии изменение уровня моря на 10 м приводило к смещению береговой линии на весьма значительное расстояние.

На границе раннего и позднего мела происходит верхоянская, или австрийская фаза складчатости. Тектоно-магматическая активизация проявилась в Восточной Азии (Верхоянский мегаантиклинорий, Иньяли-Дебинский синклинорий) и Кордильерах (на восточной и западной окраинах Лавразии), а также на ее южной окраине — в современном Альпийско-Гималайском поясе (Восточные Альпы, Карпаты, Кавказ, Памир). Поднятие осевой части Альпийской области вызывает трансгрессии, распространявшиеся на южную часть Лавразии (рис. 1, А).

Таким образом, мы предполагаем общее поднятие Лавразии на рубеже турона и коньяка, которое вызвало в большей степени относительное обмеление (рис. 1, Б), а в разрезах осадочных последовательностей Воронежской антеклизы привело к появлению новых источников сноса, относительно большему опесчаниванию разреза, увеличению фациальной изменчивости (с ростом числа фаций) и формированию частых перерывов. Базис действия волн может варьировать в интервале 0–200 м, оказываясь в шельфовых морях более близким ко второй цифре, а платформенные осадки эпиконтинентальных морей в подавляющей своей части отлагались на глубинах порядка 50–100 м и менее [Нейман, 1962], по нашим данным (для изученных разрезов) — в интервале 30–80 м.

В туронское время выделяется 7 фациальных зон (или скорее — подзон, на наш взгляд), отвечающих мелководно-морскому бассейну нормальной солености с активностью гидродинамического режима [Савко, Иванова, 2009]. В коньякское время выделено 8 фациальных зон, причем исследователи отмечают, что «в отличие от туронских отложений коньякские отличаются значительной фациальной изменчивостью как в латеральном, так и в вертикальном направлениях... выделяется ряд зон, имеющих чрезвычайно сложную конфигурацию, обусловленную неровностями рельефа морского дна и расположением источников сноса» [Савко, Иванова, 2009].

Появление в разрезах кремнистых пород объясняется активизацией тектонических движений во второй половине коньякского века и проникно-

вении холодных течений из Московской синеклизы (рис. 1, В), приносящих с собой растворенный кремнезем и алевритистый материал [Савко, Иванова, 2009], что подтверждается нашими палеотемпературными оценками (18,5–19 °С) для среднего коньяка–раннего сантона, против относительно более теплых интервалов (19–22 °С) в рассматриваемом временном диапазоне [Габдуллин и др., 2021].

Трансгрессии и теплые воды в основном проникали «с юга, со стороны Тетиса», из Днепровско-Донецкой впадины (Украинской синеклизы в меловое время), а также холодные воды приходили «с севера» из Московской синеклизы [Савко, Иванова, 2009].

Наиболее глубоководные зоны бассейна располагались на юге, по направлению на северо-восток они сменялись сначала мелководными, а затем прибрежно-морскими обстановками. В наиболее глубоководных зонах формировался преимущественно писчий мел, в мелководно-морских — мергельно-меловые породы, а в прибрежно-морских — кремнисто-карбонатные и терригенные образования. Наибольшее разнообразие палеогеографических обстановок и как следствие фациальных областей характерно для коньякского века [Савко, Иванова, 2009].

Мощности турон-коньякских отложений уменьшаются с запада на восток и с юга на север. Большие значения мощностей и более глубоководный характер осадков в южной части объясняется близостью океана Тетис, откуда приходили трансгрессии. Этим можно объяснить парадокс, когда в разрезах Ульяновско-Саратовского прогиба мощности турон-коньякских отложений меньше или равны таковым на Воронежской антеклизе (рассматриваются разрезы, в которых коньякские отложения перекрыты сантонскими, не затронутые ледниковой экзарацией) [Габдуллин, 2007]. В неоген-четвертичное время на неотектоническом этапе Евразия испытывает подъем, движущиеся ледники эродировать верхнюю часть верхнемеловых отложений на Воронежской антеклизе.

*Импактные события* для туронского и коньякского веков неизвестны [Габдуллин, 2023]. Рассмотрим корреляционную схему сопоставления астрохронологических и геохимических реперов для позднемелового фрагмента геологической истории для Тетического региона, откуда приходили трансгрессии на Русскую плиту (рис. 2). В частности, в левой части рис. 2 (А) изображены импактные события этого интервала времени. Синим цветом показаны структуры, возраст которых определен не точно, например кратер Санта-Мария из Бразилии диаметром 10 км, возрастом менее 100 млн лет (№ 1) и Зеленогайский кратер из Украины диаметром 3,5 км и возрастом  $80 \pm 20$  млн лет (№ 3). Красным цветом показаны ударные кратеры, возраст которых датирован максимально точно: № 2 — Ветумпка, США (диаметр 7,6 км, возраст 83,5 млн лет); № 4 — Карский кратер, Россия (диаметр 19 км, возраст  $70,3 \pm 2,2$  млн лет) и Мэнсон, США (диаметр 50 км, возраст 73,8 млн лет); № 5 — Чиксулуб, Мексика (диаметр 150 км,

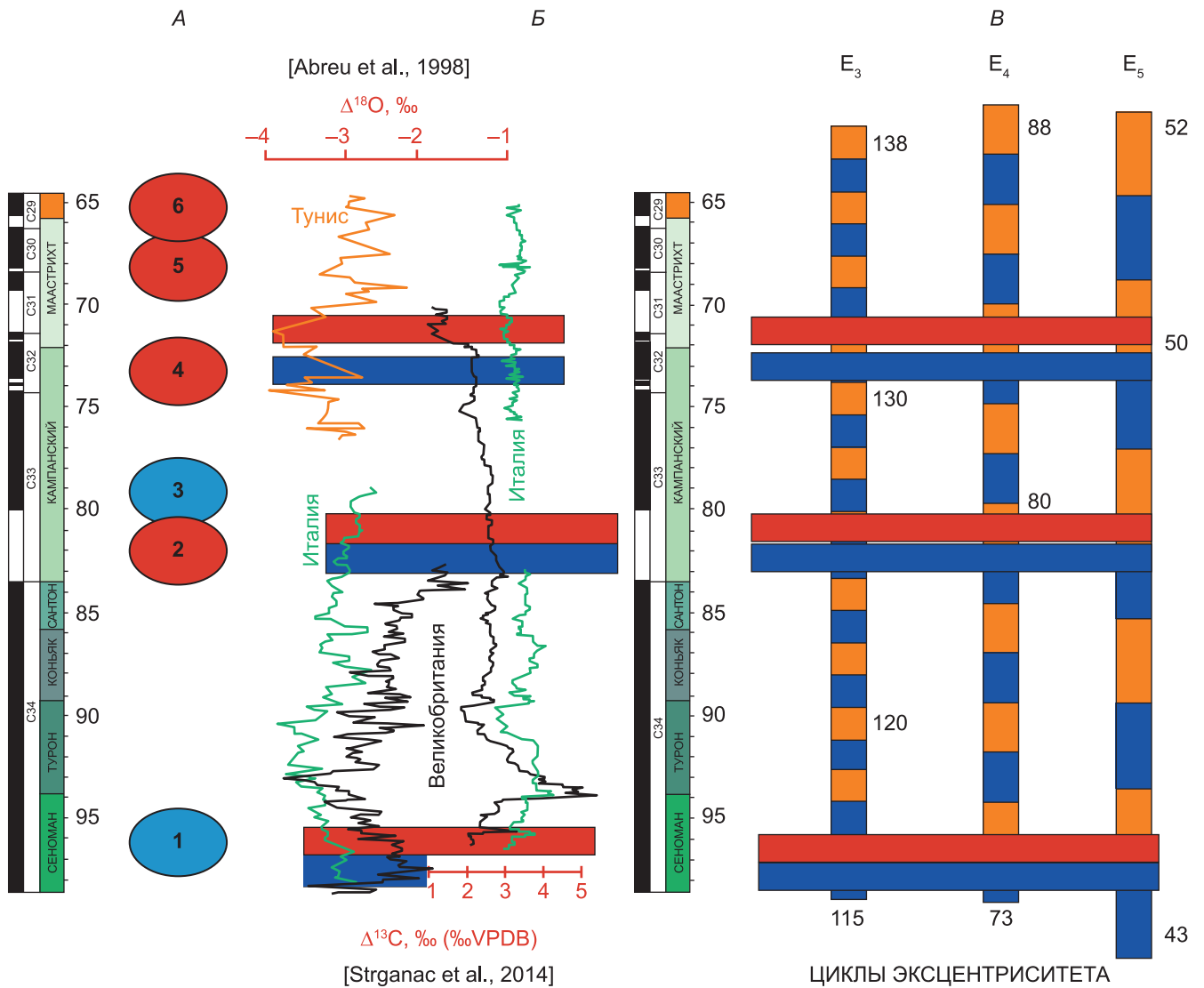


Рис. 2. Корреляционная схема сопоставления астрохронологических (импактных событий) и фрагмента циклостратиграфической шкалы — циклов эксцентриситета 3–5 порядков) и геохимических реперов для позднемелового фрагмента геологической истории Тетического региона. А — импактные события по [Габдуллин, 2023]; Б — сводные кривые изотопов кислорода [Abreu et al., 2014] и углерода [Strganac et al., 2014] для разрезов Италии, Великобритании и Туниса; В — фрагмент циклостратиграфической шкалы. Условные обозначения: 1 — кратер Санта-Мария, Бразилия (диаметр 10 км, возраст менее 100 млн лет); 2 — Ветумпка, США (диаметр 7,6 км, возраст 83,5 млн лет); 3 — Зеленогайский кратер, Украина (диаметр 3,5 км, возраст 80±20 млн лет); 4 — Карский кратер, Россия (диаметр 19 км, возраст 70,3±2,2 млн лет) и Мэнсон, США (диаметр 50 км, возраст 73,8 млн лет); 5 — Чиксулуб, Мексика (диаметр 150 км, возраст 66 млн лет); 6 — Болтышский кратер, Украина (диаметр 24 км, возраст 65,17±0,64 млн лет)

возраст 66 млн лет) и № 6 — Болтышский кратер, Украина (диаметр 24 км, возраст 65,17±0,64 млн лет). Датировки возраста ударных кратеров приведены согласно диссертации [Габдуллин, 2023]. Возраст кратера Ветумпка коррелирует с рубежом сантона и кампана, время образования Карского кратера близко к кампан-маастрихтскому рубежу, импактные события, генерировавшие кратеры Чиксулуб и Болтышский — к мел-палеогеновой границе.

**Геохимическая характеристика.** В средней части рис. 2 (Б) приведены сводные кривые изотопов кислорода [Abreu et al., 1998] и углерода [Strganac et al., 2014] для разрезов Италии, Великобритании и Туниса. Виден циклический характер вариаций этих кривых и подобность кривых, построенных по разрезам различных регионов (например, для Вели-

кобритании и Италии). Рубежи веков позднемеловой эпохи охарактеризованы положительными экскурсами кривой изотопа углерода и отрицательными экскурсами кривой изотопа кислорода.

**Циклостратиграфическая характеристика.** В правой части рис. 2 (Б) приведен фрагмент циклостратиграфической шкалы [Габдуллин, 2023] для мезо-кайнозойского интервала, на которой указаны номера циклов эксцентриситета орбиты Земли 3–5 порядка, причем циклы, отвечающие фазе относительного потепления климата показаны оранжевым, а относительного похолодания — синим. Моменты совмещения разнопорядковых циклов эксцентриситета показаны горизонтальными линиями красного цвета (в моменты совмещения циклов разных порядков, отвечающих фазе относительного

потепления климата) и синего цвета (в моменты совмещения циклов разных порядков, отвечающих фазе относительного похолодания климата). Видно, что первый уровень совпадения разнопорядковых циклов приходится на ранний и средний сеноман, второй — на ранний кампан, третий тяготеет к кампан-маастрихтскому рубежу.

Моменты совмещения разнопорядковых циклов эксцентриситета в раннем-среднем сеномане, раннем кампане и на кампан-маастрихтском рубеже коррелируют с заметными экскурсами на кривых содержания  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ . Каких-то других четких закономерностей в характере вариации этих кривых пока установить не удалось.

**Заключение.** Условия относительного тектонического погружения района Воронежской антеклизы в туронское время с небольшим числом фаций сменяются условиями относительного воздымания на турон-коньякском рубеже, что фиксируется в виде перерывов в разрезах на ее периферии — в Брянской области (Фокино, Бетово, Чернетово и других). Береговая линия эпиконтинентального моря отступает на юго-запад. Помимо перерывов из-за общего воздымания территории растет число областей дену-

дации и увеличивается снос с суши — появляются опесчаненные карбонатные и кремнистые разности пород, растет фациальная изменчивость осадков. В коньякское время трансгрессии приходят с юга (теплые воды, формируются карбонатные осадки) и с севера (холодные воды, аккумулируются кремнистые осадки), в условиях гумидного типа климата объем терригенного сноса возрастает. Относительно небольшая глубина бассейна — около 30–50 м — очень чувствительна к вертикальным тектоническим движениям. При их амплитуде около 10 м мелководный бассейн быстро сменяется крайне мелководным, распадающимся на серию изолированных бассейнов, окруженных палеоподнятиями, с которых начинается транспорт обломочного материала. Береговая линия отступает на десятки — сотни километров и так до новой трансгрессии.

Рубежи веков поздне меловой эпохи охарактеризованы положительными экскурсами кривой изотопа углерода и отрицательными экскурсами кривой изотопа кислорода.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ № 24-27-00139).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Габдуллин Р.Р. Верхнемеловые отложения Русской плиты: секвентная стратиграфия и циклы Миланковича // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2007. № 5. С. 16–25.

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. Ритмичность верхнемеловых отложений Русской плиты, Северо-Западного Кавказа и Юго-Западного Крыма (строение, классификация, модели формирования). М.: Изд-во МГУ, 2002. 304 с.

Габдуллин Р.Р., Пузик А.Ю., Меренкова С.И. и др. Литолого-геохимическая характеристика и палеоклиматические условия формирования турон-сантонских отложений эпиконтинентального бассейна Русской плиты в районе Воронежской антеклизы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 3. С. 26–34.

Копачевич Л.Ф. Планктонные фораминиферы позднего мела Восточно-Европейской платформе и ее южного обрамления: зональная био-стратиграфия, смена на главных рубежах, палеоокеанологические реконструкции: Дисс. в виде научного доклада ... докт. геол.-минер. наук. М., 2011.

Нейман В.Б. Вопросы методики палеотектонического анализа в платформенных условиях. Л.: Госгеолтехиздат, 1962. 88 с.

Объяснительная записка. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. 2-е изд. Серия Воронежская. Лист М-37-II (Кшенский). СПб.: Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2022. 152 с. (МПР России, Роснедра, Центрнедра, ФГБОУ ВО «ВГУ»).

Олферьев А.Г., Копачевич Л.Ф., Валащик И. и др. Новые данные о строении сеноман-коньякских отложений западного склона Воронежской антеклизы (Брянская об-

ласть) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2005. № 4. С. 3–16.

Савко А.Д. Эпохи корообразования в истории Воронежской антеклизы. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1979. 120 с.

Савко А.Д., Иванова Е.О. Фациальная характеристика верхнемеловых отложений Юго-Западной части Воронежской антеклизы // Вестн. ВГУ. Сер: Геология. 2009. № 2. С. 61–78.

Трегуб С.А., Трегуб А.И. Геологические условия развития карста на территории Воронежской области // Вестн. ВГУ. Сер: Геология. 2002. № 1. С. 254–258.

Abreu V. S., Hardenbol J., Haddad G. A. Oxygen isotope synthesis: a Cretaceous ice-house // SEPM Spec. Publ. 1998. Vol. 60. eP. 10.2110/pec.98.02.0075.

Averianov A. Review of taxonomy, geographic distribution, and paleoenvironments of Azhdarchidae (Pterosauria). Zook-eys. 2014 Aug 11;(432):1–107. doi: 10.3897/zookeys.432.7913. PMID: 25152671; PMCID: PMC4141157.

Scotese Ch. R. Paleomap project. <http://www.scotese.com> (дата обращения: 01.10.2025).

Song Y., Stepashko A., Ren J. The Cretaceous climax of compression in Eastern Asia: Age 87–89 Ma (Late Turonian/Coniacian), Pacific cause, continental consequences // Cretaceous Research. 2015. Vol. 55. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.01.002>.

Strganac C., Salminen J., Jacobs L.L., et al. Carbon isotope stratigraphy, magnetostratigraphy, and  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  age of the Cretaceous South Atlantic coast, Namibe Basin, Angola // Journal of African Earth Sciences. 2014. Vol. 99. P. 452–462.

van der Meer D.G., Star L.B., Scotese Ch.R., et al. Phanerozoic orbital-scale glacio-eustatic variability // Earth and Planetary Science Letters. 2025. Vol. 667, <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2025.119526>.

Статья поступила в редакцию 26.10.2025, одобрена после рецензирования 12.11.2025, принята к публикации 27.02.2026

УДК 551.7633:551.86 (234.86/9)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-29-34

## О БИОСТРАТИГРАФИЧЕСКОМ РАСЧЛЕНЕНИИ ТУРОН–КОНЬЯКСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ПЕРИТЕТИСА

Людмила Федоровна Копаяевич<sup>1</sup>✉, Сергей Иванович Бордунов<sup>2</sup>,  
Елена Васильевна Яковичина<sup>3</sup>, Руслан Рустемович Габдуллин<sup>4</sup>,  
Маргарита Рубеновна Латыпова<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lfkopaevich@mail.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геологический институт РАН, Москва, Россия; sib-msu@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yakovishina@mail.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Московский Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; gabdullin@geokhi.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; margarita.r.latypova@gmail.com

**Аннотация.** Приведены результаты биостратиграфических исследований турон-коньякских отложений, имеющих широкое распространение в восточном Перитетисе. Несмотря на хорошую изученность этих отложений, вопросы стратиграфического расчленения остаются до сих пор недостаточно проработанными. Рассмотрены вопросы смены сообществ фораминифер в этом интервале и их значение в зональном расчленении.

**Ключевые слова:** Перитетис, мел, турон, коньяк, фораминиферы

**Для цитирования:** Копаяевич Л.Ф., Бордунов С.И., Яковичина Е.В., Габдуллин Р.Р., Латыпова М.Р. О биостратиграфическом расчленении турон-коньякских отложений Восточного Перитетиса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 29–34.

## ON STRATIGRAPHIC SUBDIVISION OF THE TURONIAN AND CONIACIAN SUCCESSION IN THE EASTERN PERITHETYS

Ludmila F. Kopaevich<sup>1</sup>✉, Sergey I. Bordunov<sup>2</sup>, Elena V. Yakovishina<sup>3</sup>,  
Ruslan R. Gabdullin<sup>4</sup>, Margarita R. Latypova<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lfkopaevich@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-3622-8253>

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University; Geological Institute RAS, Moscow, Russia; sib-msu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1156-0496>

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; yakovishina@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1021-565X>

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; margarita.r.latypova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8258-9012>

**Abstract.** The results of biostratigraphic investigations of the Turonian-Coniacian deposits, which are widespread in the eastern Peritethys, are presented. Despite the well-studied nature of these deposits, the issues of stratigraphic subdivision remain insufficiently understood. The issues of changing foraminifera assemblages in this interval and their significance in the zonal subdivision are considered.

**Keywords:** Peritethys, Cretaceous, Turonian, Coniacian, foraminifera

**For citation:** Kopaevich L.F., Bordunov S.I., Yakovishina E.V., Gabdullin R.R., Latypova M.P. On biostratigraphic subdivision of the Turonian and Coniacian succession in the Eastern Peritethys. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 29–34. (In Russ.).

**Введение.** Вопросы стратиграфического расчленения туронских и коньякских отложений, расположенных на территории Восточного Перитетиса, вызывают значительный интерес по ряду причин. Во-первых — это время широкого распространения в регионе пелагических и гемипелагических карбонатных илов, похожих на современный глубоководный известковый ил. Однако, его накопление в меловом периоде происходило в относительно более мелководных эпиконтинентальных бассейнах океана Тетис, которые отличались огромными площадями. Фронт резкой границы между водной

толщей шельфа и континентального склона, который находится в современных океанах, отсутствовал из-за более высокого уровня Мирового океана [Браун, 1978].

Вторая особенность изученного интервала — теплый климат. Это была эпоха глобального температурного оптимума, так называемая эпоха «greenhouse». Турон-коньякский интервал был одним из самых теплых эпизодов фанерозойского зона, который был установлен на основании соотношений изотопов кислорода и Mg/Ca в раковинах фораминифер [Wilson et al., 2002; Vice et al., 2003]. Полученные



Рис. 1. Палеогеографическая карта для позднетуронского времени с расположением лимитотипов нижней границы коньякского яруса и изученных разрезов (по [Walaszczyk, et al., 2022] с изменениями)

значения температур достигали своего максимума в туронском веке [Vice et al., 2003; O'Brien et al., 2017].

Третья причина особого интереса к этому интервалу связана с тем, что в вопросе его стратиграфического расчленения остаются некоторые проблемы, которые пока не получили окончательного решения. Им посвящена предлагаемая публикация.

#### **Вопросы биостратиграфического расчленения разрезов туронских и коньякских отложений.**

Нижние границы туронского и коньякского ярусов к настоящему времени утверждены Международной комиссией по стратиграфии после соответствующих обобщающих публикаций [Kennedy et al., 2005; Walaszczyk et al., 2022]. Однако, при практической работе приходится сталкиваться с определенными трудностями. Существуют они и для территории Восточного Перитетиса (ВП), в состав которого входят Восточно-Европейская платформа (ВЕП) — преимущественно южная и центральная части, Крым, Северный Кавказ и Предкавказье, а также территория Прикаспия и Закаспия (рис. 1) [Корпаевич и др., 2024; Корпаевич et al., 2024]. Заключаются эти трудности в следующем.

**Нижняя граница туронского яруса.** Биостратиграфическое положение этой границы утверждено

в соответствии со следующими событиями. Первый этап — появление аммонитов *Watinoceras devonense* Wright et Kennedy и иноцерамов *Mytilodes pueblonensis* Walaszczyk et Cobban [Kennedy et al., 2005; Kennedy, Walaszczyk, 2023]. Оба таксона описаны с территории Северной Америки, при этом их географическое распространение ограничено практически этим континентом. Второй — распространение планктонных фораминифер (ПФ) показывает, что граница между ярусами попадает в среднюю часть зоны *Whiteinella archaeocretacea*, а зональный вид нижнего турона *Helvetoglobotruncana helvetica* (Bolli) появляется выше утвержденной границы [Kennedy et al., 2005; Kennedy, Walaszczyk, 2023]. Следует отметить весьма ограниченное территориальное распространение и этого вида, в том числе на изучаемой территории. Здесь он отмечен только в разрезах Кавказа [Маслакова, 1978; Tur et al., 2001], зафиксирован в одном разрезе в овраге Аксудере Юго-Западного Крыма [Корпаевич, Walaszczyk, 1990; Fisher et al., 2005], однако его изображение в двух последних публикациях отсутствует. В разрезах ВЕП и Закаспия этот вид не встречен [Алексеев и др., 2005а, 2005б; Walaszczyk et al., 2013; 2022; Корпаевич, Vishnevskaya, 2016]. Следует отметить и благоприятный фактор, так

Млн лет	Ярус	Маслакова, 1967, юг СССР	Маслакова, 1978, юг СССР	Caron, 1985	Robaszynski, Caron, 1995	Premoli Silva, Sliter, 1995, 1999	Копаяевич, 2010	Coccioni, Premoli Silva, 2015
86,3	Коньякский	G. primitiva	G. primitiva	D. concavata	D. concavata	D. concavata	C. concavata— C. primitiva	D. concavata
89,8		G. coronata	G. angusticarinata	D. primitiva			M. coronata	
93,9	Туронский	G. lapparenti	G. lapparenti	M. coronata	M. schneegansi	D. primitiva— M. sigali	M. pseudolinneiana	D. primitiva— M. sigali
		H. helvetica— P. imbricata	H. helvetica	H. helvetica	H. helvetica	H. helvetica	H. helvetica— P. oraviensis	H. helvetica

Рис. 2. Сопоставление зональных шкал по планктонным фораминиферам для туронско-коньякского интервала [Копаяевич, 2010]. C. — *Concavatotruncana* Korchagin, 1982; D. — *Dicarinella* Porthault, 1970; G. — *Globotruncana* Cushman, 1927; H. — *Helvetoglobotruncana* Reiss, 1957; M. — *Marginotruncana* Hofker, 1956; P. — *Praeglobotruncana* Bermudez, 1952

как в ряде участков Восточного Перитетиса только к турон-коньякскому интервалу постоянно приурочены карбонатные отложения. Такая ситуация существует, к примеру, в Западном Заволжье [Александрова и др., 2012]. Это сказалось на комплексах микрофоссилий, которые именно здесь приобретают наибольшее сходство с западными и южными районами Перитетиса, что позволяет в значительной мере уточнять корреляционные уровни.

**Нижняя граница коньякского яруса.** С установлением границы туронского и коньякского ярусов также связаны определенные трудности. Она была утверждена Международной стратиграфической комиссией после многолетней работы коллектива авторов, результаты которой были опубликованы в статье [Walaszczyk et al., 2022]. В качестве стратотипа нижней границы коньякского яруса был утвержден разрез в стенке карьера Salzgitter-Salder (Зальцгиттер-Зальдер), расположенного на территории Северной Германии в Нижней Саксонии. Однако, в связи с содержащимися в этом разрезе незначительными перерывами, расположенными как раз на уровне границы, были дополнительно включены еще три разреза. Один разрез Słupia Nadbrzeźna расположен на территории Центральной Польши, а второй разрез Střeleč (Стрелок) — на территории Чехии. Еще один дополнительный разрез El Rosario (Эль-Росарио) расположен в Мексике на территории Национального парка Сьерра-дель-Кармен, Коауила. В этих разрезах практически единственным биостратиграфическим маркером границы является таксон двустворчатых моллюсков иноцерамов *Cremnoceramus deformis erectus* (Meek). Его находки зафиксированы на территории Юго-Западного Крыма в разрезе Аксудере, где он был описан как *Inoceramus rotundatus* [Копаяевич, Walaszczyk, 1990], признанный в настоящее время синонимом *Cremnoceramus deformis erectus*. Позднее присутствие этого вида зафиксировано в нескольких разрезах Восточно-Европейской платформы: на Воронежской антеклизе [Walaszczyk et al., 2004], в пределах

Ульяновско-Саратовской синеклизы [Pervushov et al., 2019], на территории Закаспия в разрезах п-ва Мангышлак [Walaszczyk et al., 2013].

В разрезах Восточного Перитетиса остатки макрофауны, как правило, достаточно редки, поэтому определение возраста вмещающих пород основано на распределении раковин планктонных (ПФ) и бентосных фораминифер (БФ), среди которых значительную часть составляют именно ПФ. Основную часть ПФ в наиболее представительных образцах составляют крупные раковины с килеватым периферическим краем и широким умбиликальным отверстием. Детали строения устья, к сожалению, неразличимы, так как сохранность раковин средняя. В эту группу входят представители родов *Marginotruncana*, а также весьма редких умбиликально-выпуклых *Dicarinella* (в современной классификации некоторых исследователей *Concavatotruncana*). Именно они лежат в основе зональной стратиграфии пограничного турон-коньякского интервала (рис. 2; 3). Оставшуюся часть комплекса составляют более мелкие раковины с относительно простой морфологией, состоящие из глобулярных камер, не имеющие кия, с простым умбиликально-внутрикраевым или внутрикраевым устьем.

Распределение фораминифер в утвержденных стратотипических разрезах не уточняет положения границы туронских и коньякских отложений [Walaszczyk et al., 2022]. Таксономическое разнообразие ПФ невелико, зарегистрировано немногим более 20 видов, которые типичны для умеренной климатической зоны и обладают относительно продолжительным временным распространением. Тетические, морфологически продвинутые таксоны либо очень редки, либо отсутствуют. В составе комплексов преобладают многочисленные представители рода *Marginotruncana*, в число которых входят: *M. pseudolinneiana* Pessagno, *M. coronata* (Bolli), *M. marginata* (Reuss), *M. sinuosa* Porthault, *M. renzi* (Gandolfi), *M. paraconcavata* Porthault. Представители рода *Dicarinella* встречаются реже, они представле-

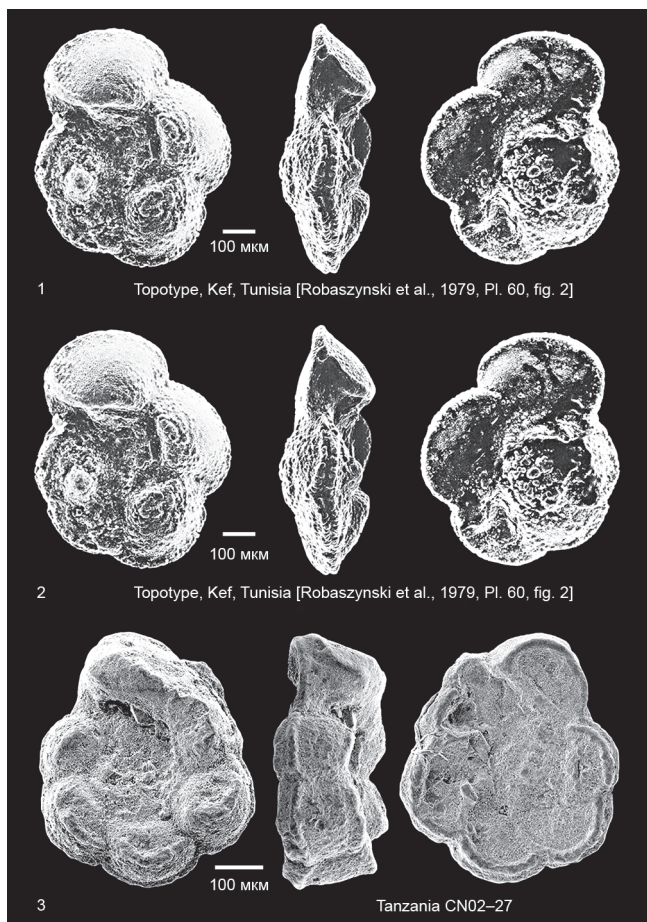


Рис. 3. Раковины р. *Dicarinnella*, распространение которых лежит в основе стратиграфии туронского и коньякского интервалов (изображения раковин с сайта pf@mictotax.org). 1 — *Dicarinnella primitiva* (Dalbiez) —  $K_2$  t<sub>2</sub>-st, 2 — *Dicarinnella concavata* (Brotzen) —  $K_2$  t/cn-st, 3 — *Dicarinnella asymetrica* (Sigal) —  $K_2$ st

ны видами *Dicarinnella imbricata* (Mornod) и *D. hagni* (Sheibnerova), характерными как для туронских, так и для коньякских отложений. Вид *Dicarinnella primitiva* (Dalbiez) встречается в единичных экземплярах в самых верхних образцах из туронских отложений. *D. concavata* (Brotzen), индекс-вид одноименной зоны, приуроченный к подошве коньяка, а также *Heterohelix huberi* Georgescu, исчезновение которого было признано показателем этой границы либо отсутствуют, либо их распространение расходится с представлениями других исследователей. Не дают ясной картины фораминиферы из дополнительного разреза Эль-Розарио. Аналогичные сложности с распространением ПФ встречены на территории всего ВП [Яковишина и др., 2022; Кораевич, Vishnevskaya, 2016; Vishnevskaya, Кораевич, 2020].

БФ менее активно задействованы для биостратиграфической характеристики рассматриваемого интервала, хотя их комплексы весьма представительны и характеризуются активным развитием видов рода *Stensioeina* Brotzen. Эволюционные изменения и таксономическое разнообразие этого таксона привлекает к себе внимание уже давно, в том числе и для изучаемой территории [Беньямовский, 2008;

Вишневская и др., 2018; Рябов, 2018; Pervushov et al., 2019; Walaszczyk et al., 2013]. Однако общего взгляда на таксономию и однозначно понимаемую стратиграфическую значимость видового состава этой группы пока не появилось. Его наиболее современная и подробная характеристика дана в кратких публикациях и сообщениях И.П. Рябова, однако, по его мнению, она далека от завершения. Связано это с несколькими причинами, одной из самых главных является неустоявшаяся систематическая характеристика этого таксона.

**Микростратиграфическая характеристика турон-коньякских отложений Восточного Перитетиса.** Туронский и коньякский ярусы имеют широкое распространение в южной и центральной части Восточно-Европейской платформы (Брянская область, Поволжье, Прикаспий) и в некоторых структурах Закаспия. Так породы данных ярусов прекрасно обнажены на территории п-ва Мангышлак, где они представлены преимущественно карбонатами. С ними вместе обычно рассматриваются и структуры Крымского полуострова и Северного Кавказа, главным образом его западной части, с которыми они имеют много общего. В изученных разрезах Юго-Западного и Центрального Крыма, Северного Кавказа (Шапсугский карьер), Прикаспийский бассейн выделены микрофашии микритовых мадстоунов и мад-вакстоунов, фораминиферо-кокколитовых и питонелло-кокколитовых известняков. Близкие по своему строению карбонатные породы известны в составе разрезов Воронежской антеклизы. Присутствие характерных комплексов известковых диноцист *Pithonella ovalis* (Kaufmann), а также ПФ родов *Heterohelix*, *Whiteinella*, *Marginotruncana*, *Globigerinelloides*, кокколитов *Watznaueria barnesiae*, *Prediscosphaera cretacea*, *Manivitella pemmatoidea* является характерной особенностью всех разрезов данного возраста на изучаемой территории.

Комплекс фораминифер Восточного Перитетиса по своему составу близок к ассоциациям центральных частей Тетической области, но отличается меньшим разнообразием [Caron, 1985]. Отличие состоит в преобладании двукилевых спирально-конических форм маргинотрунканид, а также вайтенеллид. В Тетической фауне более существенная роль принадлежит умбиликально выпуклым дикаринеллидам (рис. 3) и однокилевым маргинотрунканидам [Ogg et al., 2004; Tur et al., 2001; Coccioni, Premoli Silva, 2015; Walaszczyk et al., 2022]. Распространение ПФ с различной морфологией раковины в современных морских акваториях тесно связано с характеристикой водных масс: температурой, соленостью, глубиной, первичной продуктивностью поверхностных вод как источника питания, положением по отношению к береговой линии. Такая же зависимость существовала и в меловом периоде. Анализ состава комплексов фораминифер из турон-коньякских отложений показал, что они формировались в условиях открытого морского бассейна с относительно

высоким таксономическим разнообразием ПФ, с периодическим преобладанием «глубоководных» таксонов или обитателями «термоклина», к которым можно отнести представителей родов *Marginotruncana* и *Dicarinella* [Petruzzo, 2002; Pervushov et al., 2019; Petruzzo et al., 2020]. Виды этих родов также переносят относительно холодноводные обстановки в более мелководных условиях высоких широт, так они спорадически встречаются в единичных экземплярах в более высоких широтах. Таким образом их появление в высоких широтах указывает на экспансию теплых водных масс в этот промежуток времени. Виды этих родов также переносят относительно холодноводные обстановки в более мелководных условиях высоких широт [Pervushov et al., 2019; Petruzzo et al., 2020]. Для осуществления полного жизненного цикла им необходимы главным образом глубины, превышающие глубины внешнего шельфа. К «мелководным таксонам» принадлежат представители родов *Whiteinella*, *Heterohelix*, *Laeviheterohelix*. Этим вопросам посвящен большой объем публикаций [Premoli Silva, Sliter, 1995; Petruzzo, 2000, 2002]. Теоретические представления подтверждены большим объемом наблюдений над поведением меловых ПФ в эпохи смены климатических обстановок, а также в моменты заметных изменений глубины бассейна в самых разных акваториях земного шара [Dubicka, Peryt, 2014; Falzoni et al., 2016; Кораевич, Vishnevskaya, 2016].

**Выводы.** 1. В биостратиграфическом расчленении турон-коньякских отложений ВП основная роль принадлежит фораминиферам, как планктонным, так и бентосным, в виду редких находок в этих отложениях руководящих таксонов макрофауны и сложности диагностирования видовой принадлежности раковин иноцерамов. Именно они являются

ведущей группой в биостратиграфическом расчленении отложений туронского и коньякского ярусов международной стратиграфической шкалы.

2. В комплексах ПФ изучаемого региона преобладают двукилевые спирально-конические формы маргинотрунканид, а также бескилевых вайтенеллид. В Тетической же фауне более существенная роль принадлежит умбиликально выпуклым дикаринеллидам и однокилевым маргинотрунканидам, находки которых в ВП, как правило, немногочисленны или отсутствуют.

3. Появление и увеличение таксономического разнообразия морфологически продвинутых представителей родов *Marginotruncana* и *Dicarinella* в более северных разрезах указывают на экспансию теплых водных масс в определенные промежутки времени.

4. Для биостратиграфической характеристики турон-коньякского интервала менее активно задействованы БФ. В то же время эволюционные изменения и таксономическое разнообразие этой группы предполагает их стратиграфическую значимость для расчленения изучаемого интервала. Это в первую очередь касается представителей р. *Stensioeina* s.l., которые достигают в этом интервале высокого таксономического разнообразия. На тему систематической характеристики этого рода, выделенных из его состава новых родов и видов появилось много публикаций, в том числе и российских исследователей, например, [Dubicka, Peryt, 2014; Рябов, 2018]. Однако однозначного понимания таксономии этой группы пока еще нет.

**Благодарности.** Авторы искренне благодарны рецензентам за ценные критические замечания, которые помогли улучшить текст.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-27-00139.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александрова Г.Н., Беньямовский В.Н., Вишневецкая В.С., Застрожных А.С. Новые данные по биостратиграфии верхнего мела Нижнего Поволжья // Стратигр., Геол. коррел. 2012. Т. 20, № 5. С. 25–64.

Алексеев А.С., Кораевич Л.Ф., Барабошкин Е.Ю. и др. Палеогеография юга Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления в позднем мелу. Введение и стратиграфическая основа // Бюл. Моск. О-ва Испытателей природы. Отд. геол. 2005а. Т. 80, вып. 2. С. 80–92.

Алексеев А.С., Кораевич Л.Ф., Барабошкин Е.Ю. и др. Палеогеография юга Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления в позднем мелу. Палеогеографическая обстановка // Бюл. Моск. О-ва Испытателей природы. Отд. геол. 2005б. Т. 80, вып. 4. С. 30–44.

Беньямовский В.Н. Схема инфразонального биостратиграфического расчленения верхнего мела Восточно-Европейской провинции по бентосным фораминиферам. Статья 1. Сенонан–коньяк // Стратигр., Геол. корреляция. 2008. Т. 16. № 3. С. 36–46.

Кораевич Л.Ф. Зональная схема для верхнемеловых отложений Крымско-Кавказского региона по глоботрунканидам (планктонные фораминиферы) // Бюлл. МОИП. Отд. геол. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2010. Т. 85, № 5. С. 40–52.

Кораевич Л.Ф., Бордунов С.И., Яковичина Е.В. и др. Туронский и коньякский ярусы на территории Восточного Перитетиса — биостратиграфия и палеогеография // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 72–81.

Маслакова Н.И. Глоботрунканиды юга Европейской части СССР. М.: Наука, 1978. 168 с.

Рябов И.П. Новые данные по филогении *Protostensioeina* Dubicka & Peryt, 2014 (FORAMINIFERA) // Эволюция жизни на Земле: Материалы V Международного Симпозиума 12–16 ноября. 2018 г. Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2019. С. 42–44.

Яковичина Е.В., Бордунов С.И., Кораевич Л.Ф. и др. Климатические флуктуации и условия седиментации турон-коньякских отложений Северо-Западного Кавказа // Страт. Геол. Корреляция. 2022. Т. 30, № 3. С. 41–61.

Bice K.L., Huber B.T., Norris R.D. Extreme polar warmth during the Cretaceous greenhouse? Paradox of the late Turonian  $\delta^{18}\text{O}$  record at Deep Sea Drilling Project Site 511 // Paleogeography. 2003. Vol. 18. P. 91–97.

Caron M. Cretaceous planktonic foraminifera // Plankton Stratigraphy. Cambridge: University Press, 1985. P. 17–86.

Coccioni R., Luciani V. Planktonic foraminifera and environmental changes across the Bonarelli Event (OAE2, latest

Cenomanian) in its type area: a high-resolution study from the Tethyan reference Bottaccione section (Gubbio, central Italy) // *J. Foram. Res.* 2004. Vol. 34. P. 109–129.

*Coccioni R., Premoli Silva I.* Revised Upper Albian Maastrichtian planktonic foraminiferal biostratigraphy and magnetostratigraphy of the classical Tethyan Gubbio section (Italy) // *Newsletters on Stratigraphy.* 2015. Vol. 48. No 1. P. 47–90.

*Dubicka Z., Peryt D.* Classification and evolutionary interpretation of late Turonian–early Campanian *Gavelinella* and *Stensioeina* (Gavelinellidae, bentic foraminifera) western Ukraine // *Journal of Foraminiferal Research.* 2014. Vol. 44. P. 151–176.

*Dubicka Z., Peryt D.* Foraminifers and stable isotope record of the Dubivtsi chalk (upper Turonian, West Ukraine): palaeoenvironmental implications // *Geological Quarterly.* 2012. Vol. 56. P. 199–214.

*Falzone F., Petrizzo M.R., Clarke L.C., et al.* Long-term Late Cretaceous carbon- and oxygen-isotope trends and planktonic foraminiferal turnover: a new record from the southern mid-latitudes // *GSA Bulletin.* 2016. Vol. 128. P. 1725–1735.

*Fisher J.K., Price G.D., Hart M.B., Leng M.* Analysis of the Cenomanian–Turonian (Late Cretaceous) oceanic anoxic event in the Crimea // *Cretaceous Research.* 2005. Vol. 26. No 6. P. 853–863.

*Flügel E.* Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. Second Edition. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. 929 p.

*Hay W.W.* Evolving ideas about the Cretaceous climate and ocean circulation // *Cretaceous Research.* 2008. Vol. 29. No 5–6. P. 725–753.

*Huber B.T., Hodell D.A., Hamilton C.P.* Middle — Late Cretaceous climate of the southern high latitudes: stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1995. Vol. 107. P. 1164–1191.

*Huber B.T., O'Brien C.L.* Cretaceous climate // *Encyclopedia of Geology.* 2nd Edition. Elsevier Inc., 2020. P. 1–7.

*Jarvis I., Gale A.S., Jenkyns H.C., Pearce M.* Secular variation in Late Cretaceous carbon isotopes: a new  $\delta^{13}\text{C}$  carbonate reference curve for the Cenomanian–Campanian (99.6–70.6 Ma) // *Geol. Mag.* 2006. Vol. 143. P. 561–608.

*Kennedy W.J., Walaszczuk I.* The Upper Turonian–Lower Coniacian (Upper Cretaceous) ammonites from the condensed phosphate beds of Mangyshlak, NW Kazakhstan // *Acta Geologica Polonica.* 2023. Vol. 73, No. 4. P. 635–660.

*Kennedy W.J., Walaszczuk I., Cobban W.A.* The Global Boundary Stratotype Section and Point for the base of the Turonian Stage of the Cretaceous: Pueblo, Colorado, U.S.A. // *Episodes.* 2005. Vol. 28, No. 2. P. 93–104.

*Kopaevich L., Kuzmicheva T.A.* The Cenomanian–Turonian boundary in southwestern Crimea, Ukraine: foraminifera and palaeogeographic implications // *Wagreich M. (ed): Aspects of Cretaceous Stratigraphy. Proceed. the 6th International Cretaceous Symposium.* 2002. Vol. 15. P. 129–149.

*Kopaevich L.F., Vishnevskaya V.* Cenomanian–Campanian (Late Cretaceous) planktonic assemblages of the Crimea-Caucasus area: palaeoceanography, palaeoclimate and sea level changes // *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.* 2016. Vol. 441. P. 493–515.

*Kopaevich L.F., Walaszczuk I.* An integrated inoceramid-foraminiferal biostratigraphy of the Turonian and Coniacian strata in south-western Crimea, Soviet Union // *Acta Geologica Polonica.* 1990. Vol. 40. No 1–2. P. 83–96.

*Kopaevich L., Yakovishina E., Bordunov S.* Integrated study on the base of the Coniacian Stage in the Caucasus // *Cretaceous Research.* 2024. Vol. 158. P. No 105827.

*O'Brien C.L., Robinson S.A., Pancost R.D., et al.* Cretaceous sea-surface temperature evolution: Constraints from TEX86 and planktonic foraminiferal oxygen isotopes // *Earth-Science Reviews.* Vol. 172. 2017. P. 224–247.

*Ogg J.G., Agtenberg F.P., Gradstein F.M.* The Cretaceous Period // *A Geologic Time Scale.* Cambridge: Cambridge University Press, 2004. P. 344–383.

*Pervushov E.M., Ryabov I.P., Guzhikov A.Yu., et al.* Turonian–Coniacian Deposits of the Kamennyi Brod-1 Section (Southern Ulyanovsk–Saratov Trough) // *Stratigraphy and Geological Correlation.* 2019. Vol. 27, No 7. P. 804–839.

*Petrizzo M.R.* Palaeoceanographic and palaeoclimatic inferences from Late Cretaceous planktonic foraminiferal assemblages from the Exmouth Plateau (ODP Sites 762 and 763, eastern Indian Ocean) // *Marine Micropaleontology.* 2002. Vol. 45. P. 117–150.

*Petrizzo M.R.* Upper Turonian–Lower Campanian planktonic foraminifera from southern mid-high latitudes (Exmouth Plateau, NW Australia): biostratigraphy and taxonomic notes // *Cretaceous Research.* 2000. Vol. 21. P. 479–505.

*Petrizzo M.R., Huber B.T., Falzone F., MacLeod K.G.* Changes in biogeographic distribution patterns of southern mid- to high latitude planktonic foraminifera during the Late Cretaceous hot to cool greenhouse climate transition, Cretaceous Research. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2020.104547>.

*Premoli Silva I., Sliter W.V.* Cretaceous planktonic foraminiferal biostratigraphy and evolutionary trends from the Botaccione section, Gubbio, Italy // *Palaeontographia Italica.* 1995. Vol. 82. P. 1–89.

*Robaszynski F., Caron M.* Foraminifères planctoniques du Crétacé: commentaire de la zonation Europe Méditerranée // *Bull. Soc. Geol. France.* 1995. T. 166, N 6. P. 681–692.

*Vishnevskaya V.S., Kopaevich L.F.* Microfossil assemblages as key to reconstruct sea-level fluctuations, cooling episodes and palaeogeography: The Albian to Maastrichtian of Boreal and Peri-Tethyan Russia / *Wagreich M., Hart M.B., Sames B., Yilmaz I.O. (eds) Cretaceous Climate Events and Short-Term Sea-Level Changes* // *Geological Society.* London, Special Publications, 2020. Vol. 498. P. 165–187.

*Walaszczuk I., Kopaevich L.F., Beniamovski V.N.* Inoceramid and foraminiferal record and biozonation of the Turonian and Coniacian (Upper Cretaceous) of the Mangyshlak MTS. Western Kazakhstan // *?* 2013. No 4. P. 469–487.

*Walaszczuk I., Kopaevich L.F., Olfieriev A.G.* Inoceramid/foraminiferal succession of the Turonian and Coniacian (Upper Cretaceous) of the Briansk region (Central European Russia) // *Acta Geologica Polonica.* 2004. 54 (4), 569–581.

*Walaszczuk I., Čech S., Crampton J. S., Dubicka Z., et al.* The Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Coniacian Stage (Salzgitter-Salder, Germany) and its auxiliary sections (Ślupia Nadbrzeźna, central Poland; Střeleč, Czech Republic; and El Rosario, NE Mexico) // *Episodes.* 2022. Vol. 45. No 2. P. 181–220.

*Wilson P.A., Norris R.D., Cooper M.J.* Testing the Cretaceous greenhouse hypothesis using glassy foraminiferal calcite from the core of the Turonian tropics on Demerara Rise // *Geology.* 2002. Vol. 30. P. 607–610.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 553.98:551.735.1(470.5)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-35-48

## НЕФТЕМАТЕРИНСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮРЮЗАНО-СЫЛВЕНСКОЙ ДЕПРЕССИИ ПРЕДУРАЛЬСКОГО КРАЕВОГО ПРОГИБА

Павел Петрович Попов<sup>1</sup>, Мария Александровна Большакова<sup>2</sup>✉,  
Наталья Владимировна Пронина<sup>3</sup>, Иван Сергеевич Хопта<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; pashatamada@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.bolshakova@oilmsu.ru ✉

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nvproncl@mail.ru

<sup>4</sup> ООО «Газпромнефть НТЦ», Санкт-Петербург, Россия; khoptais@yandex.ru

**Аннотация:** Современные оценки нефтематеринского потенциала пермских отложений Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского краевого прогиба основываются на моделях геологического строения, созданных по результатам работ, выполненных в конце прошлого века, и нуждаются в пересмотре и обновлении на основании новых геохимических данных и современных технологий. Генерационный потенциал пермских материнских толщ и их вклад в нефтегазоносность региона до конца не ясен.

Цель данной статьи — рассмотреть литологию пород и геохимию органического вещества нижнепермских потенциально нефтегазоматеринских толщ, а также оценить возможность генерации данными отложениями нефти и газа в Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского краевого прогиба.

**Ключевые слова:** Предуральский краевой прогиб, Юрюзано-Сылвенская депрессия, пермская система, нефтегазоматеринские породы, органическое вещество, пиролиз, кинетические исследования, углеводороды

**Для цитирования:** Попов П.П., Большакова М.А., Пронина Н.В., Хопта И.С. Нефтематеринский потенциал пермских отложений Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского краевого прогиба // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 35–48.

## THE OIL-BEARING POTENTIAL OF THE PERMIAN DEPOSITS OF THE YURYUZANO-SYLVENSKAYA DEPRESSION OF THE PRE-URAL EDGE DEPRESSION

Pavel P. Popov<sup>1</sup>, Maria A. Bolshakova<sup>2</sup>✉, Natalia V. Pronina<sup>3</sup>, Ivan S. Khopta<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; pashatamada@gmail.com

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; m.bolshakova@oilmsu.ru ✉

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nvproncl@mail.ru

<sup>4</sup> Gazprom Neft Scientific and Technical Center, Saint Petersburg, Russia; khoptais@yandex.ru

**Abstract:** Current estimates of the oil source potential of the Permian deposits of the Yuryuzan-Sylva Depression of the Cis-Ural Foredeep are based on geological structural models created using work conducted at the end of the last century and require revision and updating based on new geochemical data and modern technologies. The contribution of the Permian source strata and their generation potential are not fully understood.

The purpose of this article is to examine the lithology and geochemistry of organic matter in the Permian potential oil and gas source strata, to review the results of basin modeling and to assess the possibility of their generation of oil and gas in the Yuryuzano-Sylvenskaya depression of the Pre-Ural foredeep.

**Keywords:** Pre-Ural foredeep, Yuryuzano-Sylvenskaya depression, Permian system, oil and gas source rocks, organic matter, pyrolysis, kinetic studies, hydrocarbons

**For citation:** Popov P.P., Bolshakova M.A., Pronina N.V., Khopta I.S. The oil-bearing potential of the Permian deposits of the Yuryuzano-Sylvenskaya depression of the Pre-Ural edge depression. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 35–48. (In Russ.).

**Введение.** Длительная история эксплуатации месторождений Волго-Уральского нефтегазоносного бассейна (ВУ НГБ) привела к истощению значительной части ресурсной базы в его платформенной части, где перспективы открытия новых крупных залежей углеводородов существенно ограничены. В данных условиях перспективным направлением для выявления новых запасов углеводородов (УВ)

является изучение слабо исследованных периферийных областей бассейна, к которым относится Предуральский краевой прогиб (в частности Юрюзано-Сылвенская депрессия), что определяет актуальность проведения целенаправленных исследований в данном регионе.

По современным представлениям, основными нефтегазоматеринскими толщами в Предуральском кра-

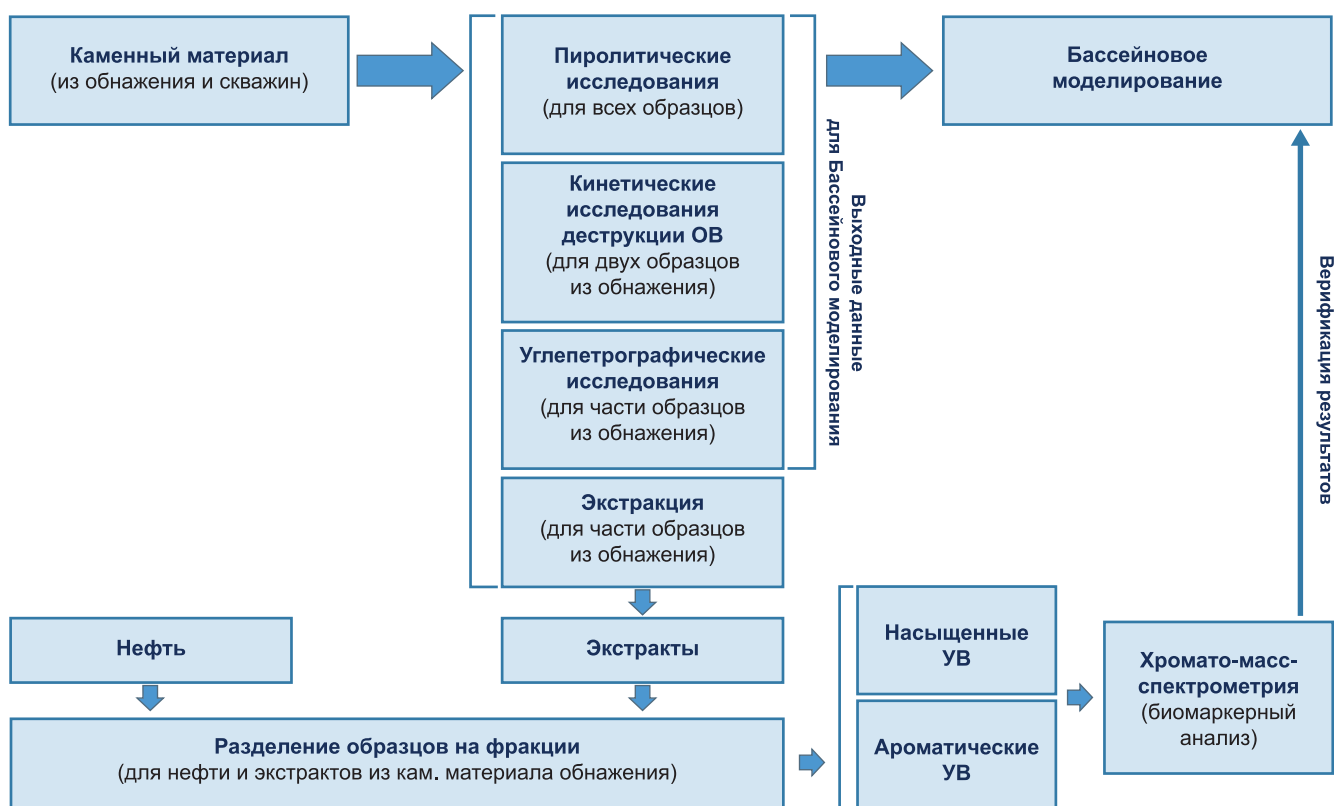


Рис. 1. План проведенных геолого-геохимических исследований органического вещества нижнепермских материнских толщ и нефти из нижнепермских отложений

евом прогибе, в том числе и в Юрюзано-Сылвенской депрессии (ЮСД), считаются отложения рифейского, вендского, девонского (доманикиты) и каменноугольного возраста [Кожанов, Большакова, 2024; Орлова, Полудеткина, 2023; Галкин, 2005]. В отличие от платформенной части ВУ НГБ, где пермские отложения залегают на небольших глубинах, в Предуральском краевом прогибе они погружены на глубины, предположительно достаточные для вступления пород в главную зону нефтегазообразования [Мизенс, 1997; Котик и др., 2017]. Несмотря на это, вклад пермских материнских толщ в формирование нефтегазоносности ЮСД до настоящего времени не исследовался, что является упущением в существующих геолого-геохимических моделях региона.

Цель данной статьи — рассмотреть литологию пород и геохимию органического вещества нижнепермских потенциально нефтегазоматеринских толщ, а также оценить возможность генерации данными отложениями нефти и газа в Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуральского краевого прогиба.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи (рис. 1):

- определение геохимических и литологических характеристик разреза пермских отложений ЮСД (типы органического вещества (ОВ), и их связь с литологией пород; степень преобразованности ОВ);
- изучение кинетики преобразования ОВ в катагенезе для геолого-геохимического моделирования;
- на основе полученных данных выполнено геолого-геохимическое бассейновое моделирование для

выяснения возможности вклада нижнепермских материнских толщ в нефтегазоносность Юрюзано-Сылвенской депрессии;

– установлена возможная связь нижнепермских материнских толщ и нефтей ЮСД при помощи биомаркерного анализа.

**Материалы исследования.** Основой для проведения исследований послужили образцы каменного материала из скважин и обнажения, проба нефти из Копальнинского месторождения (образец нефти получен из группы пластов А артинского возраста, глубина залежи 720 м) (рис. 2). Образцы каменного материала из скважин Юрюзано-Сылвенской депрессии представлены образцами пород каменноугольных и нижнепермских отложений (скв. Бухаровская-137, Калино-Усьва-593, Косьво-Чусовская-300 и 303).

Каменный материал из обнажений был представлен породами нижнепермских отложений дивьинской свиты (рис. 3). Основными объектами исследования из обнажения послужили мергели и известковистые аргиллиты. Часть образцов (обр. 1, 2, 4, 5, 7, 10, 18, 20, 22, 24–28) были отобраны в 2017 г. и переданы из лаборатории геохимии АО «КамНИИКИГС», остальные образцы были отобраны в ходе полевого выезда летом 2024 г. (рис. 3).

Для построения геолого-геохимической модели использованы субширотный и субмеридиональный геологические профили:

*Субширотный профиль (А-Б)* — композитный профиль, составленный из сейсмических профилей

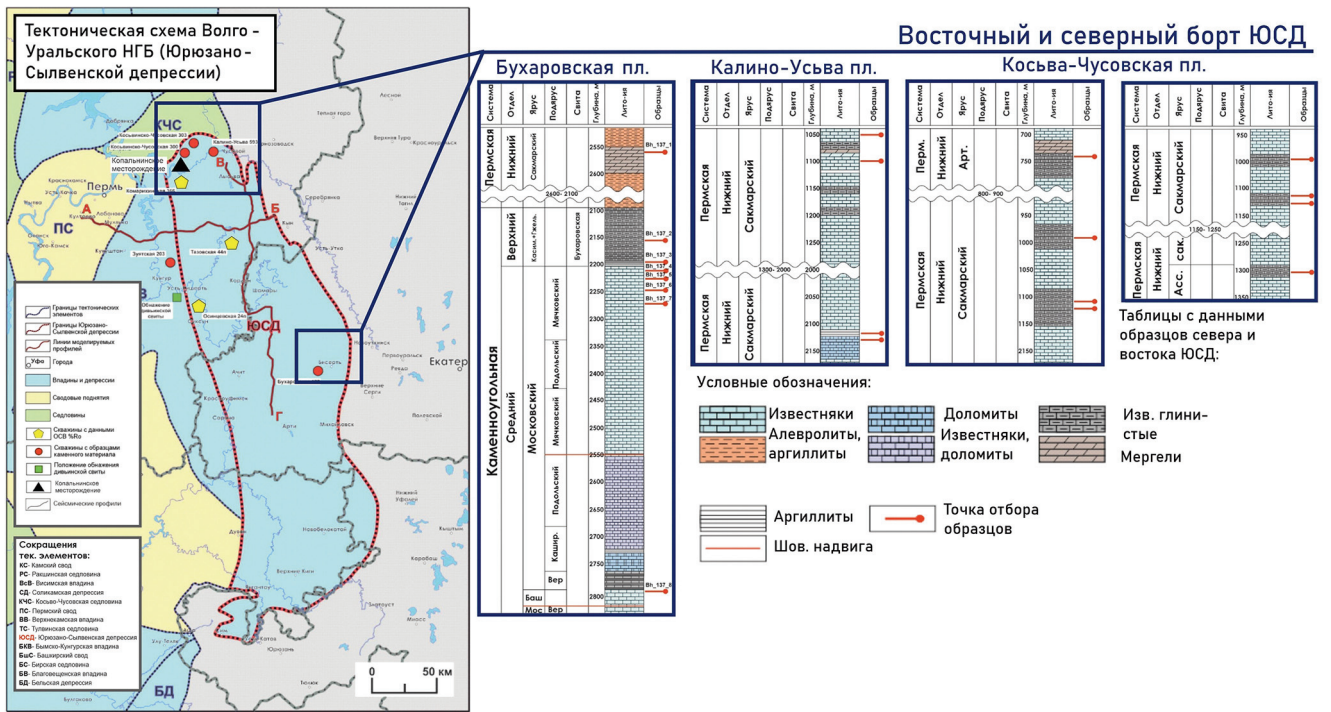


Рис. 2. Схема расположения и литологические колонки изучаемых скважин, положение моделируемых профилей, а также положение Копальнинского месторождения

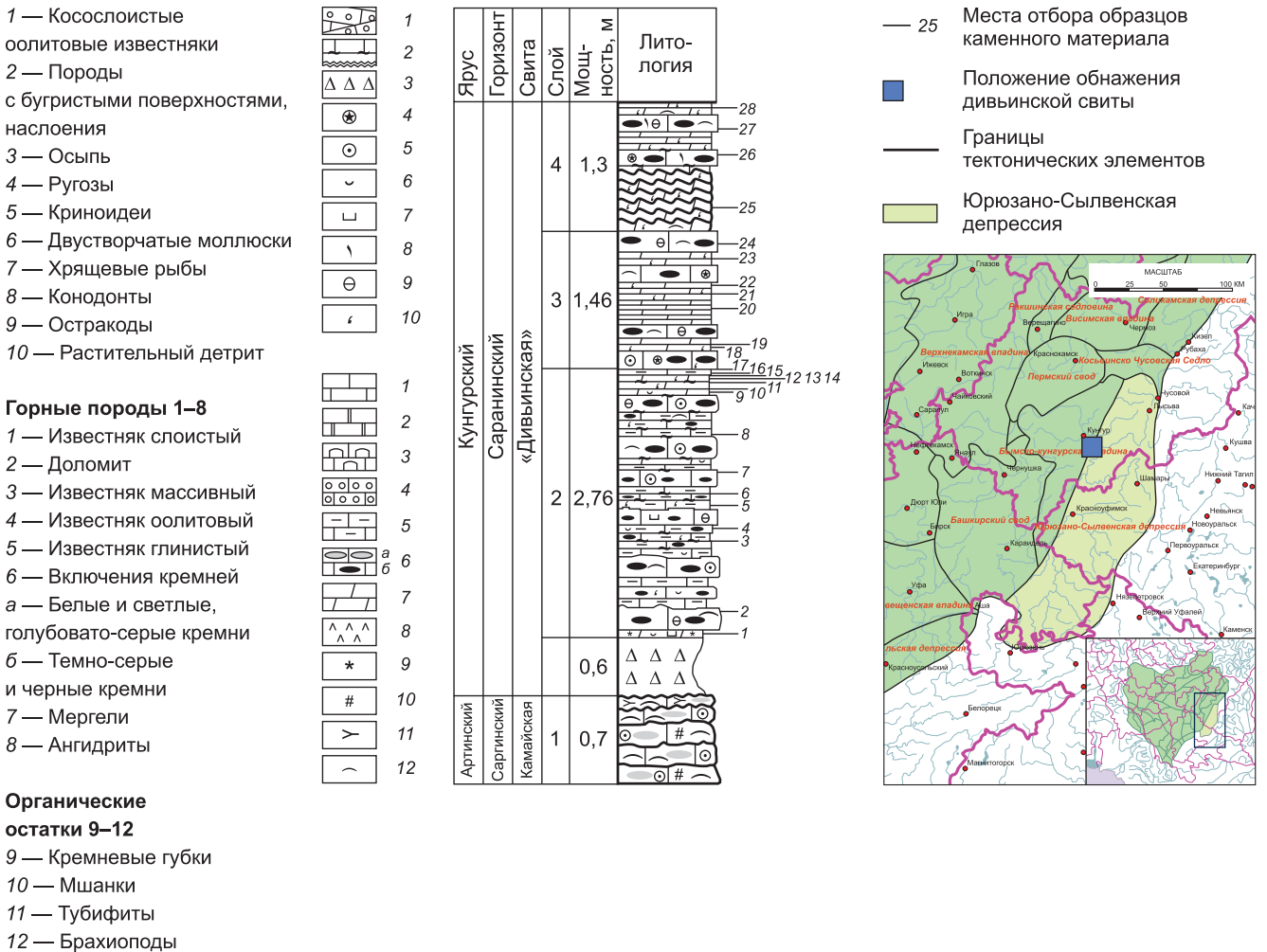


Рис. 3. Схема отбора образцов и положение обнажения на тектонической схеме Волго-Уральского НГБ (фрагмент)

1506i01a, 1506i01, 1506i203 и 1506i203a. Длина профиля составляет 220 км, и пересекает тектонические структуры первого порядка такие как: Пермский свод, Бымско-Кунгурскую впадину и Юрюзано-Сылвенскую депрессию [Колчанова и др., 2003; Соколова, 2010] (рис. 2).

*Субмеридиональный профиль* (В-Г) — композитный профиль, составленный из сейсмических профилей 121001, 121002, 12202a, 12202b. Длина профиля составляет 245 км, и полностью расположен в пределах Юрюзано-Сылвенской депрессии [Колчанова и др., 2003; Соколова, 2010] (рис. 2).

**Методы исследования.** В рамках этой работы выполнен комплекс геохимических и углепетрографических исследований образцов каменного материала. И построена двумерная геолого-геохимическая модель.

Пиролитические исследования потенциально нефтематеринских пород пермского возраста выполнялись на приборах Rock-Eval 6 и HAWK.

Исследования на приборе Rock-Eval 6 проводились для части образцов из обнажения (1, 2, 4, 5, 7, 10, 18, 20, 22, 24–28) (рис. 1). Исследования на данном приборе проводились в 2017 г., в лаборатории геохимии АО «КамНИИКИГС». На приборе HAWK (кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова) были исследованы образцы из обнажения, отобранные из тех же слоев в 2024 г., а также все образцы из скважин.

С помощью пиролитического оборудования на основе рабочей станции HAWK осуществлялось определение кинетических параметров преобразования ОВ потенциальных нефтегазоматеринских пород (НГМП) посредством программируемого нагрева исследуемого образца. Полученные результаты открытого пиролиза обрабатывались с помощью специального ПО. Конечным результатом обработки являются кинетические спектры образования углеводородов из керогена [Савостин и др., 2024]. Для определения кинетических параметров нефтеобразования ОВ пород выбирались образцы с высоким содержанием ОВ (ТОС — Total Organic Carbon) и высоким нефтегенерационным потенциалом на начальной стадии нефтегазообразования ( $T_{\max}$  менее 430–440 °С или  $R^{\circ}$  менее 0,5–0,6%).

Экстракция образцов из обнажения нижнепермских отложений была проведена в аппарате Сокслета. Битумоид извлекают для дальнейшего его исследования (определения концентрации, группового состава, биомаркерного анализа). Исследование проводилось согласно методике [Соболева и др., 2014].

Для проведения хромато-масс-спектрометрических исследований (ХМС) полученные в ходе экстракции образцы, а также пробу нефти разделяют на фракции. В начале было проведено разделение на асфальтены и мальтены. Далее производилось разделение мальтенов на насыщенные и ароматические

углеводороды. По данным образцам были проведены ХМС исследования [Соболева и др., 2014].

Для части битумоидов образцов из обнажения (7, 9, 18, 20, 22) и для нефти Копальнинского месторождения проведены ХМС исследования, насыщенная и ароматическая фракции исследовались методом хромато-масс-спектрометрии на газовом хроматографе Agilent 8890В, снабженном автоматическим устройством ввода пробы Agilent 7693 Autosampler, масс-спектрометром Agilent 5977А MSD (Agilent Technologies, США). Дальнейшая компьютерная обработка полученных результатов проводилась в программном обеспечении MassHunter (Agilent Technologies, США). Методика анализа описана в статье Тихоновой с соавторами [2021].

Углепетрографические исследования проводились в лаборатории угля кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ на установке QDI 508 (CraicTechnologies) согласно ГОСТам (Р 55663-2013 (соответствует международному стандарту ISO 7404-2:2009) Методы петрографического анализа углей. Ч. 2: Методы подготовки проб углей; Р 55662-2013 (соответствует международному стандарту ISO 7404-3:2009) Методы петрографического анализа углей. Ч. 3. Методы определения мацерального состава).

Углепетрографические исследования образцов из обнажения дивьинской свиты были проведены по 6 аншлифам в простом свете. Все образцы были отобраны из обнажения нижнепермских пород дивьинской свиты.

Целью микроскопических исследований органического вещества является изучение его мацерального состава и различных наблюдаемых свойств в отраженном и ультрафиолетовом свете. В ходе изучения, для каждого образца было сделано несколько фотографий, наиболее удачно иллюстрирующие мацеральный состав образца. Для оценки показателей отражения применялась стандартная методика измерений с иммерсионным маслом (n-1,518) и эталоном Spinel (R-0,426%). Количество замеров для каждого образца составляло от 40 до 60.

Геолого-геохимическое бассейновое моделирование является инструментом, позволяющим комплексовать данные о коллекторских интервалах и нефтегазоматеринских пород для прогнозирования нефтегазоносности.

Структурным каркасом модели послужили два профиля проходящих через Юрюзано-Сылвенскую депрессию (рис. 2). Литофациальный каркас модели был построен на основе данных бурения и геологического изучения территории ЮСД [Колчанова и др., 2003; Соколова, 2010; Фортунатова и др., 2012]. Геохимические параметры модели вводились на основе собственных исследований, а также данных геолого-геохимического изучения территории депрессии. Калибровка геолого-геохимической модели проводилась по основным показателям, полученным по скважинным замерам (пластовые температуры

и давление, замеры показателя отражения витринита) и флюидному составу месторождений и залежей территории исследования. Положение скважин с замерами показателя отражения витринита показано на рис. 2. Эти данные были получены как из собственных исследований (углеперографические, кинетические и пиролитические исследования), так и из фондовой литературы [Фортунова и др., 2012].

**Результаты и обсуждение. Пиролитические исследования. Башкирские отложения.** Породы башкирского яруса представлены одним образцом известняка из скважины Бухаровская-137. Содержание  $C_{орг}$  — 0,56%.

Значения S1 составляют 0,32 мг УВ/г породы, то есть указывают на невысокое содержание нефтяных компонентов. Параметр S2 равен 0,85 мг УВ/г породы, что указывает на плохие нефтематеринские свойства данных отложений. ОВ вероятно гумусового типа — водородный индекс (НИ) составляет 153 мг УВ/г ТОС. Значение температур максимального выхода УВ ( $T_{max}$ ) составляет 446°C и указывает на градацию катагенеза МК<sub>2</sub> [Espitalie, 1993] (рис. 4).

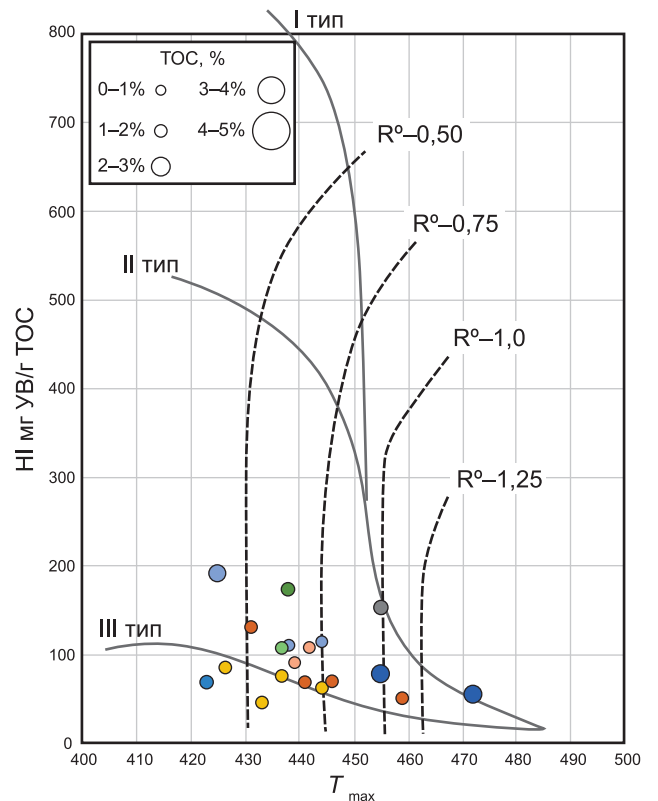
**Московские отложения.** Параметр S2 по результатам пиролиза соответствует бедным НМП (S2 = 0,24–0,49 мг УВ/г породы), S1 составляет 0,1–0,21 мг УВ/г породы. Водородный индекс НИ — 52–131 мг УВ/г ТОС — ОВ гумусового типа. Судя по параметру PI, можно предположить, что возможна генерация углеводородов. Значения  $T_{max}$  (431–446°C), указывают на стадию катагенеза МК<sub>1</sub>–МК<sub>2</sub>.

**Верхнекаменноугольные отложения.** Породы верхнекаменноугольных отложений представлены аргиллитами из скважины Бухаровская-137. Содержание  $C_{орг}$  составило от 0,28 % до 1,75%.

По результатам пиролиза параметр S2 соответствует удовлетворительным НМП (S2 1,38–2,84 мг УВ/г породы). По показателю S1 наличие свободных углеводородов характеризуется как удовлетворительное (S1 от 0,8 до 1,1 мг УВ/г породы). Водородный индекс НИ — 56–78 мг УВ/г ТОС — ОВ, характерное для гумусового типа. Значения  $T_{max}$  (431–446°C) указывают на катагенез градации МК<sub>1</sub>–МК<sub>2</sub>.

**Ассельские отложения.** Породы ассельского яруса, представленные одним образцом известняка из скважины Косьювско-Чусовская 303, ТОС в котором составляет 1,66%.

Параметр S2, характеризующий сохранившийся к моменту анализа нефтематеринский потенциал органического вещества породы, составляет 2,89 мг УВ/г породы, что характерно для удовлетворительных нефтематеринских пород. Параметр S1, характеризующий содержание нефти и битумоидов (показатель продуктивности пласта) относительно повышен и составляет 0,58 мг УВ/г породы. Индекс нефтяной продуктивности PI принимает низкие значения 0,18, свидетельствуя о том, что основная часть углеводородов еще не сгенерирована.  $T_{max}$  (438°C) соответствует стадии катагенеза МК<sub>1</sub>. Водородный индекс НИ равен 174 мг УВ/г ТОС, что характерно для гумусового ОВ.



- Бухаровская 127 (P<sub>1</sub> S)
- Бухаровская 127 (C<sub>2</sub> b)
- Косьювско-Чусовская 303 (P<sub>1</sub> A)
- Бухаровская 127 (C<sub>3</sub>)
- Косьювско-Чусовская 300 (P<sub>1</sub> S)
- Косьювско-Чусовская 303 (P<sub>1</sub> S)
- Бухаровская 127 (C<sub>2</sub> мс)
- Косьювско-Чусовская 300 (P<sub>1</sub> Ar)
- Калино-Усьва 593 (P<sub>1</sub> S)

Рис. 4. Диаграмма зависимости НИ от  $T_{max}$  для образцов из скважин

**Сакмарские отложения.** Сакмарские отложения были изучены по 11 образцам из 4 скважин. В преимущественно карбонатных породах сакмарского яруса содержание  $C_{орг}$  достигает 1,28% (в скважине Косьювско-Чусовская 300), составляя медиальное значение по ярусу 0,34% при дисперсии 0,09%.

По параметру S2 (до 2,47 мг УВ/г породы для Косьювско-Чусовской скважины 303, до 0,14 мг УВ/г породы для Косьювско-Чусовской скважины 300) образцы относятся к бедным и удовлетворительным НМП. По пиролитическому параметру S1 для изученных образцов продуктивные пласты не обнаружены ( $S < 1$  мг УВ/г породы), хотя относительно повышенные количества углеводородов нефтяного ряда зафиксированы в скважинах Калино-Усьвинской 593 (0,2 мг УВ/г породы), Косьювско-Чусовской 303 (0,8 мг УВ/г породы), Бухаровской 137 (0,67 мг УВ/г породы). Водородный индекс НИ изменяется в диапазоне от 48 до 193 мг УВ/г ТОС соответствует III типу. Судя по параметру PI в перечисленных скважинах выявлена микроаккумуляция битумоидов. Значения  $T_{max}$  (437–447°C), указывают на стадию катагенеза МК<sub>1</sub>–МК<sub>2</sub>.

**Артинские отложения.** Породы артинского яруса представлены одним образцом из скважины Косьювско-Чусовская 300. Содержание  $C_{орг}$  в глинистом известняке составило 0,28%.

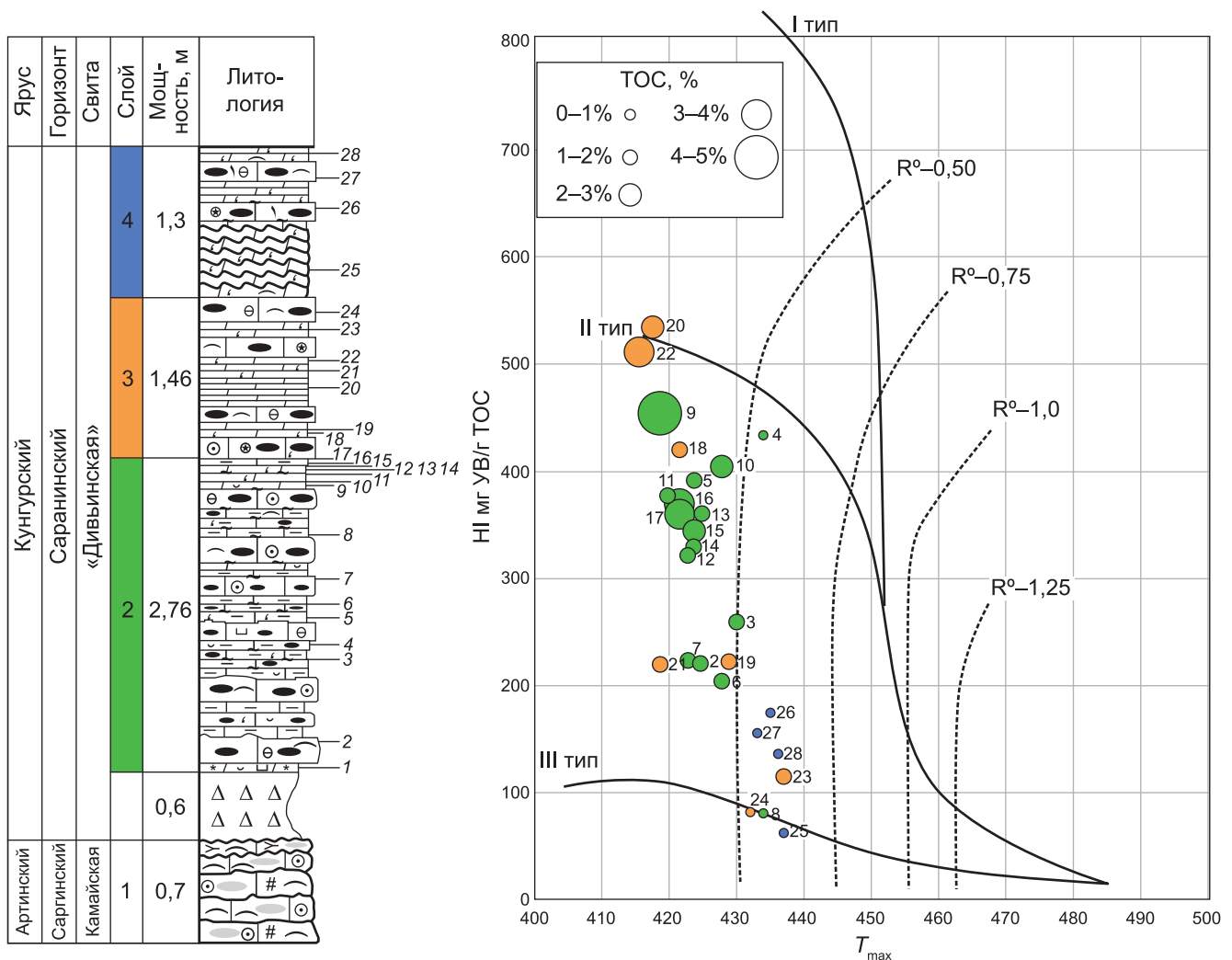


Рис. 5. Диаграмма зависимости водородного индекса HI от  $T_{\max}$  для образцов дивьинской свиты

По результатам пиролиза по параметру S2 обнаружены лишь бедные НМП (S2 до 0,19 мг УВ/г породы). ОВ гумусового типа: водородный индекс HI — 68 мг УВ/г ТОС.

По показателю S1 продуктивный пласт не обнаружен (S1 < 1 мг УВ/г породы; до 0,13 мг УВ/г породы). Значения  $T_{\max}$  (423 °C), указывают на стадию катагенеза ПК<sub>3</sub>.

**Дивьинские отложения.** В известняках и мергелях «дивьинской» свиты слоя 2 по результатам пиролиза содержание ТОС в образцах изменяется от 0,41 до 4,60% (минимальное значение в образце 1, максимальное в образце 9), характеризующие их от очень бедных до обогащенных органическим веществом (рис. 5). Значения S1 находятся в пределах от 0,05 до 0,39 мг УВ/г породы, показывающие наличие свободных углеводородов как очень бедное. Углеводородные продукты пиролиза керогена можно охарактеризовать в широком диапазоне от бедных до очень хороших (значения S2 между 0,13 и 21,04 мг УВ/г породы), в целом образцы содержат значения как удовлетворительные. Данные пиролиза показывают в целом умеренный нефтегенерационный потенциал (S1+S2=0,18–21,43 мг УВ/г породы), за исключением образца 9 (S2=21,04), который выде-

ляется высоким потенциалом. Водородный индекс изменяется в широком диапазоне (83–457 мг УВ/г ТОС), что предполагает наличие сапропелево-гумусового и гумусового ОВ (II и III тип). Значения  $T_{\max}$  419–445 °C соответствуют ранней стадии катагенеза и говорят о незрелости органического вещества (градация катагенеза ПК<sub>3</sub>–МК<sub>2</sub>).

Слой 2 характеризуется высокой вариативностью содержания органического вещества — от бедных (<1%) до обогащенных (>4%) образцов. Преобладает ОВ II и III типов. Нефтегенерационный потенциал варьируется от умеренного до высокого, особенно в образцах с повышенным S2 (например, образец 9).

Слой 3, представленный плитчатыми мергелями с прослоями глинистых известняков, по содержанию ТОС в образцах изменяется в диапазоне от 0,27 до 3,27% (минимальное в образце 24, максимальное в образце 17). В целом, большинство образцов содержат ТОС >1%, что характеризует их как относительно обогащенные органическим веществом.

Значения S1 изменяются от 0,03 до 0,67 мг УВ/г породы, то есть указывают на невысокое содержание нефтяных компонентов. Параметр S2 изменяется в широком диапазоне между 0,68 и 19,52 мг УВ/г породы, в основном углеводородные продукты

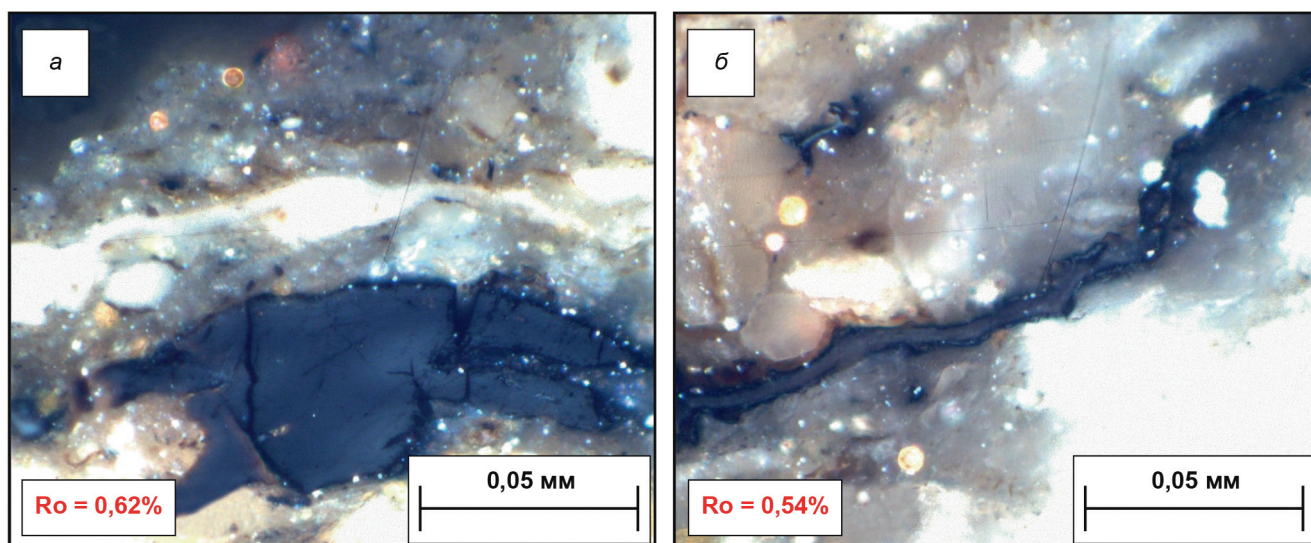


Рис. 6. Микрофотографии аншлифов дивьинской свиты в отраженном свете: а — витродетритинит, б — «сингинетичный» витринит

пиролиза керогена можно охарактеризовать как очень хорошие. Нефтегенерационный потенциал пиролиза в целом хороший ( $S1+S2 = 0,78-20,03$  мг УВ/г породы). Водородный индекс изменяется от 84 до 537 мг УВ/ г ТОС), что предполагает наличие гумусово-сапропелевого и гумусового органического вещества (II и III тип). Значения  $T_{max}$  419–446°C свидетельствуют о незрелости органического вещества (градация катагенеза ПК<sub>2</sub>–МК<sub>1</sub>).

Слой 3 содержит образцы с высоким ТОС (>1%) и хороший генерационный потенциал ( $S2$  до 19,52 мг УВ/г породы). Преобладает сапропелево-гумусовое ОВ (тип II), что делает слой перспективным для нефтегенерации. Однако низкие значения PI и  $T_{max}$  указывают на раннюю стадию созревания.

Значения ТОС для слоя 4, который сложен мергелями с бугристыми поверхностями наложения и прослоями глинистых известняков, невысокие и изменяются в узких пределах — от 0,15 до 0,51% (минимальное в образце 27, максимальное в образце 28).

Параметр  $S1$  очень низок (менее или равен 0,06 мг УВ/г породы). Остаточный углеводородный потенциал (продукты пиролиза керогена) можно охарактеризовать как бедный (значения  $S2$  между 0,22 и 0,99 мг УВ/г породы). Данные пиролиза показывают в целом небольшой суммарный нефтегенерационный потенциал ( $S1+S2 = 0,28-1,05$  мг УВ/г породы). Изменения значений водородного индекса от бедных до удовлетворительных (64–177 мг УВ/ г ТОС) предполагает присутствие гумусового керогена (III тип). Значения  $T_{max}$  433–437°C свидетельствуют о невысокой зрелости органического вещества (градация катагенеза МК<sub>1</sub>).

**Углетрографические исследования образцов из обнажения дивьинской свиты.** Мацеральный состав изучаемых отложений представлен переотложенными мацералами группы витринита и инертинита, а также битумными пленками, которые встречаются в межзерновом пространстве или на поверхности органических включений.

Данные мацеральные компоненты встречаются в породе в виде мельчайших включений, располагающихся между минеральными зёрнами и слоями. Их оптические свойства (из-за крайне малых размеров включений) невозможно точно охарактеризовать и измерить. Редко встречаются крупные компоненты, на которых и проводились замеры показателя отражения.

Мацералы группы витринита представлены двумя переотложенными разновидностями; витринит, который попал в еще не сформированный осадок в виде сформированного мацерала (рис. 6, а), и витринит, который попал в осадок в виде фрагментов высших растений (древесинные ткани корней, стволов, коры и листьев) (рис. 6, б). Морфологически они выражены либо изометричными фрагментами, либо вытянутыми разновидностями.

Мацералы группы инертинита в образцах дивьинской свиты представлены в основном переотложенными разновидностями (инертдетритинит) (рис. 7, а), а также переотложенными мацералами фунгинита, который сохранил растительную структуру (рис. 7, б). В данных образцах данные включения характеризуются более высокими показателем отражения и, следовательно, более светлым цветом. В изученных образцах встречается в виде отдельных включений.

Битумные пленки в прямом смысле являются пленками — оболочками, которые равномерно покрывают минеральный матрикс породы (рис. 8, а) или «обволакивают» органические включения (рис. 8, б), и придают образцам коричневый цвет в отраженном свете. Это всегда подвижные новообразованные продукты, сопровождающие трансформацию ОВ. Их присутствие в породе свидетельствует о начале процессов нефтеобразования.

Определение катагенетической преобразованности органического вещества являлось ключевой задачей данных исследований. Результаты пиролитических исследований не давали точных данных о зрелости отложений. Часть образцов указывали на

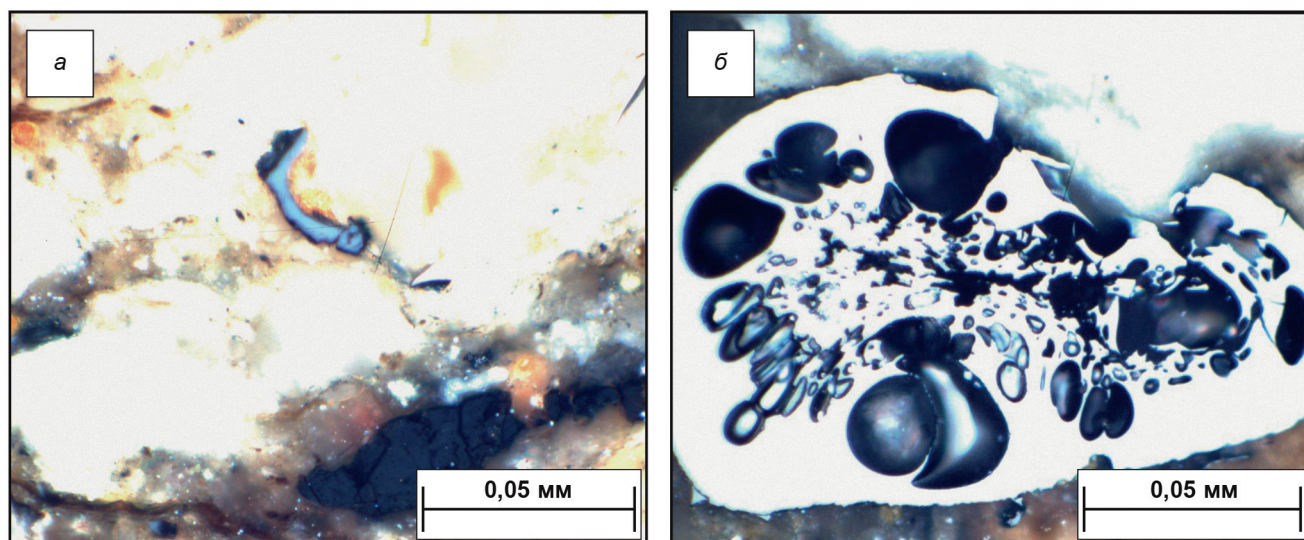


Рис. 7. Микрофотографии аншлифов дивьинской свиты в отраженном свете: а — инертдетритин, б — фунгинит

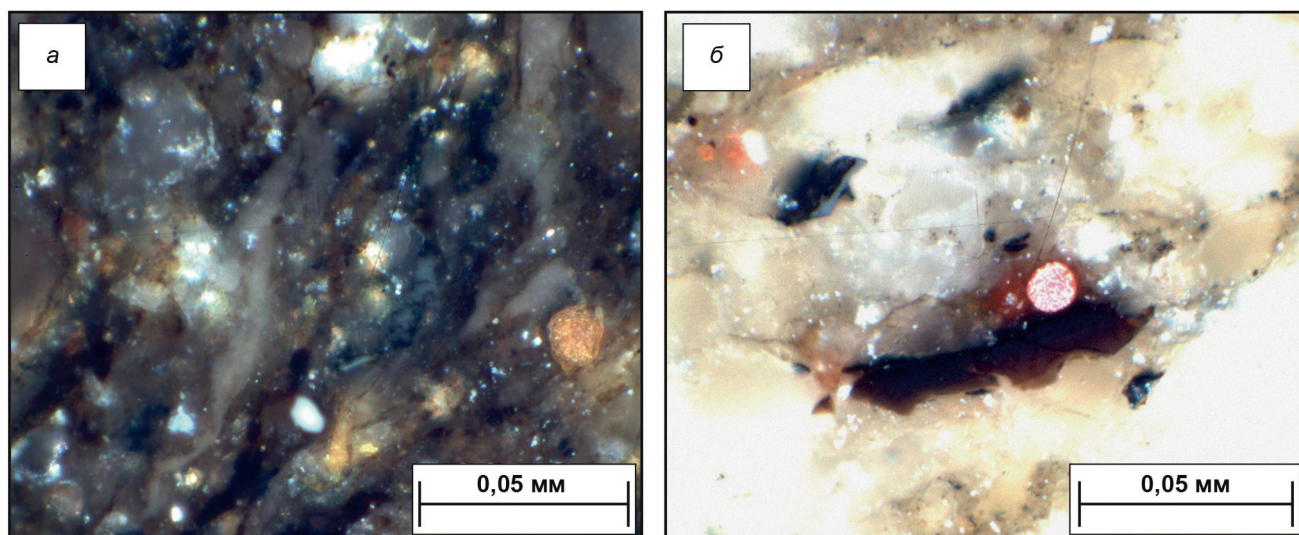


Рис. 8. Микрофотографии аншлифов дивьинской свиты в отраженном свете: а — битумные пленки в межзерновом пространстве, б — битумные пленки, сорбированные на поверхности органического включения

то, что органическое вещество является не зрелым, но другая часть образцов говорили о начале катагенетической преобразованности на уровне МК<sub>1</sub> ( $T_{\max}$  424 до 437°C).

Замеры показателя отражения витринита не давали однозначного результата (в связи с двумя разностями витринита в образцах). Образцы перетолженного витринита в целом характеризуются более высокой катагенетической преобразованностью (сред. 0,61%). Данные образцы не могут говорить о катагенетической преобразованности ОВ, но по ним можно судить о верхней границе возможной зрелости отложений.

Также в образцах встречались включения витринита, который попал в осадок в виде фрагментов высших растений. Данные образцы уже характеризуются более низкими значениями отражательной способности от 0,53 до 0,55% (на эти значения мы и опираемся при определении зрелости). Судя по

данным образцам, породы характеризуются катагенетической преобразованностью стадии МК<sub>1</sub>.

**Кинетические спектры деструкции ОВ.** Кинетические спектры деструкции ОВ дивьинской свиты. Полученные результаты открытого пиролиза обрабатывались с помощью ПО «Kinetics2015». Однокомпонентные кинетические спектры деструкции ОВ определены для II типа керогена второго слоя (образцы № 15 и 17). Содержание ТОС в образцах различны. Для образца № 15 ТОС = 2,15%, а для образца № 17 = 3,27%. Показатели  $T_{\max}$  для образцов равны 424 (образец № 15), и 422 (образец № 17).

Результаты обработки: на однокомпонентных кинетических спектрах ОВ образца № 15 (при фиксированном частотном факторе  $A = 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ) отмечается диапазон выхода УВ — энергии активации ( $E_a$ ) от 47 до 64 ккал/моль (рис. 9).

Энергия активации максимального выхода УВ соответствует 53–54 ккал/моль. При не фик-

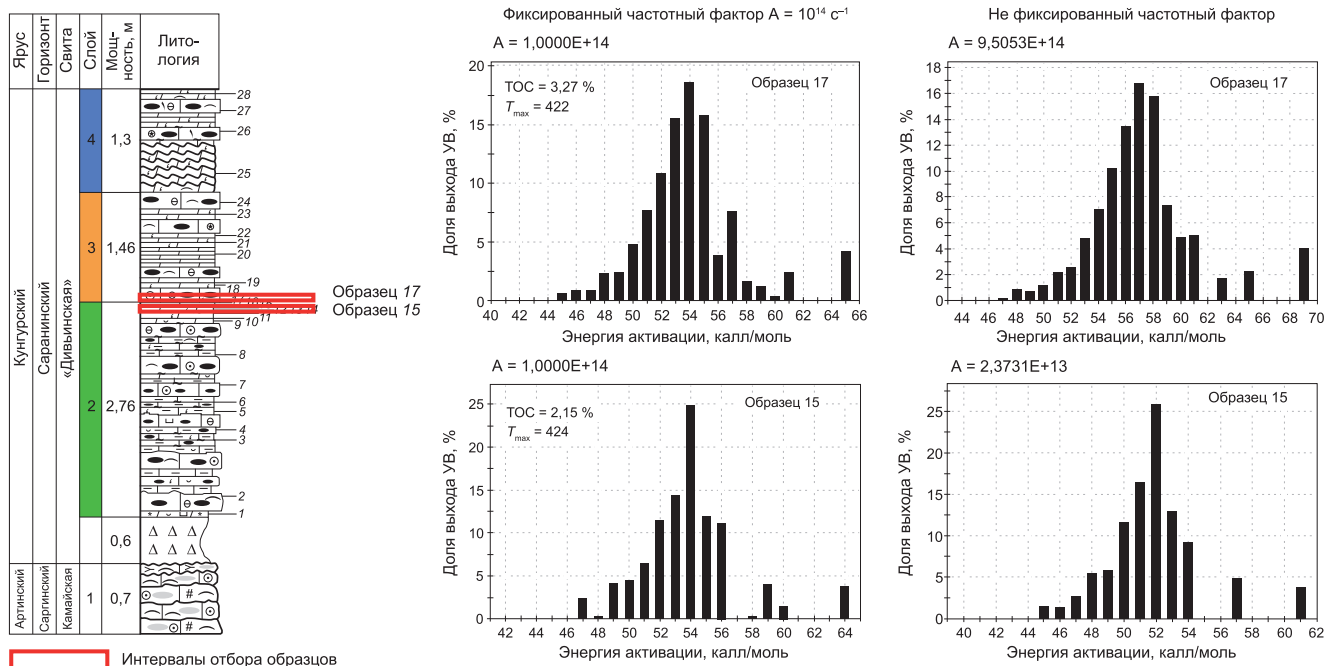


Рис. 9. Результаты обработки кинетических спектров

сированном частотном факторе ( $A = 2,3 \cdot 10^{13} \text{ c}^{-1}$ ) диапазон выхода УВ от 45 до 61 ккал/моль. Энергия активации максимального выхода УВ соответствует 51–52 ккал/моль. Для образца № 17 (при фиксированном частотном факторе  $A = 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ) диапазон энергии активации составляет от 45 до 65 ккал/моль. Энергия активации максимального выхода УВ фиксируется при значениях 53–55 ккал/моль. При не фиксированном частотном факторе ( $A = 9,5 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$ ) диапазон выхода УВ варьируется от 47 до 69 ккал/моль. Энергия активации максимального выхода УВ соответствует 56–58 ккал/моль.

Для разделения полученных однокомпонентных кинетик на выход нефти и газа отдельно спектры были сопоставлены с двухкомпонентными кинетиками из библиотеки кинетических спектров для бассейнового моделирования. Из-за отсутствия кинетики схожих отложений в библиотеке сопоставление кинетики производилось со средними значениями кинетик для II типа керогена. Полученные значения получились следующие: выход газа — 23%, выход нефти — 77% (рис. 10).

**Бассейновое моделирование.** Моделирование процессов нефтегазообразования в Юрюзано-Сылвенской депрессии Предуралья позволяет оценить возможность вклада пермских материнских толщ в формирование нефтегазоносности. На данном этапе изучения депрессии наиболее слабоизученными и интересными с точки зрения нефтегазоносности являются породы каменноугольного и нижнепермских комплексов. Построение геолого-геохимической бассейновой модели и интерпретация результатов моделирования позволило объединить данные о нефтегазоматеринских толщах прогиба, и выявить связь между каменноугольно-нижнепермскими

ми материнскими толщами и залежами Юрюзано-Сылвенской депрессии.

Главной задачей моделирования было оценить катагенетическую преобразованность НГМТ прогиба и выяснить потенциально возможный вклад пермских материнских толщ в нефтегазоносность региона. Индекс трансформации материнских толщ по моделируемым профилям приведен на рис. 11.

В ассельских и сакмарских материнских толщах коэффициент трансформации достигает 35–55%, что свидетельствует об их катагенетической зрелости. Также полученные данные согласуются с пиролитическими исследованиями. Исходя из полученных пиролитических данных и данных моделирования, эти отложения зрелые, и могли вносить свой вклад в нефтегазоносность депрессии.

Моделирование артинских пород дивьянской свиты было проведено по четырем кинетическим спектрам (рис. 12). Коэффициент трансформации варьируется от 25 до 32% (при фиксированном частотном факторе), и от 28 до 35% (при не фиксированном частотном факторе) в очаге генерации. Судя по результатам моделирования, углепетрографическим и пиролитическим исследованиям, дивьянская свита могла вносить вклад в нефтегазоносность Юрюзано-Сылвенской депрессии.

Также была проведена оценка степени насыщения нефтью и газом отложений Юрюзано-Сылвенской депрессии (рис. 13). В связи с отсутствием месторождений вдоль профилей в ЮСД, оценка УВ насыщения также проведена для Бымско-Кунгурской впадины. Месторождения УВ пересекает лишь профиль А-Б (Козубаевское, Кукуштанское и Ожгинское месторождения Бымско-Кунгурской впадины), профиль В-Г проходит в близости от Лысьвенского месторождения (северная часть профиля).

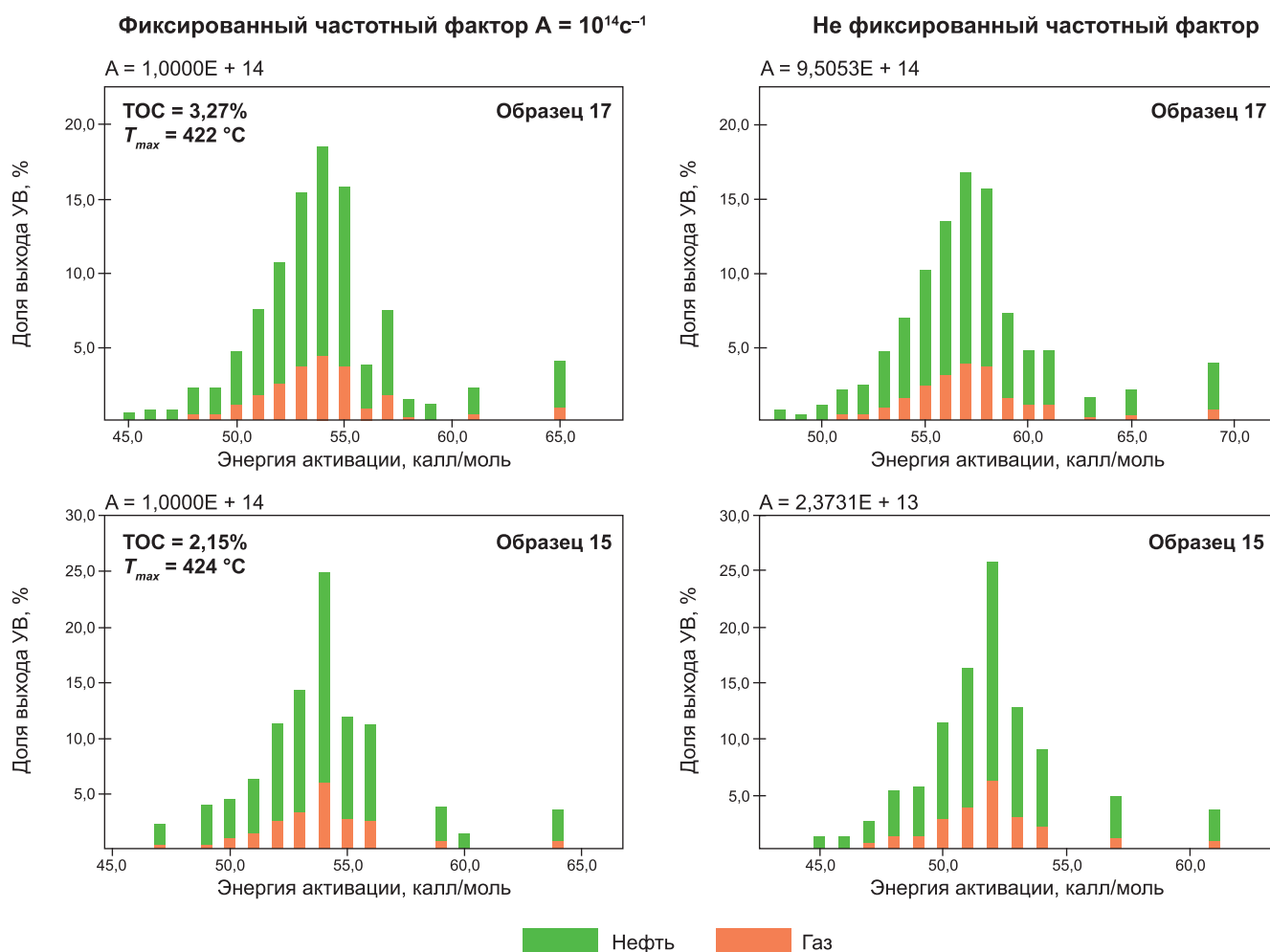


Рис. 10. Полученные двухкомпонентные кинетические спектры деструкции керогена дивьинской свиты

В нижнепермском комплексе по результатам моделирования УВ насыщение может достигать 50–60% (на севере профиля В-Г). По фазовому составу (по результатам моделирования) сформированные залежи в основном нефтяные. Это также согласуется с доказанной нефтегазоносностью. В отложениях данного комплекса в северной и центральной части ЮСД открыто пять месторождений: три нефтяных месторождения: Лысьвенское, Копальнинское и Селинское (Пермский край) и два газовых — Кедровское и Кордонское (Свердловская область). Моделируемые профили проходят вдали от газовых месторождений, но в близости от нефтяных (Лысьвенское месторождение). Свой вклад в данном комплексе могли внести нижнепермские материнские толщи. Наиболее высоким потенциалом обладают материнские отложения дивьинской свиты. По результатам моделирования углеводороды дивьинской свиты способны к миграции. По результатам исследований породы данной свиты обладают потенциалом для генерации в основном нефтяных УВ, что также согласуется с тем, что залежи вышележащих пород также в основном нефтяные.

**Сопоставление органического вещества нефти и нефтегазоматеринских пород.** Для проверки гипотезы о вкладе пермских НГМП в формирование

нефтегазоносности мы провели сопоставление молекулярного состава нефти и битумоидов.

По результатам ХМС исследований в образцах экстрактов пород из обнажения и образце нефти обнаружены *n*-алканы в диапазоне  $C_{14}$ – $C_{41}$ . Низкомолекулярные *n*-алканы обнаружены в следовых количествах.

Изопренаны пристан ( $iC_{19}$ ) и фитан ( $iC_{20}$ ) обнаружены в нефти, но не во всех образцах из обнажения (в образце 18 не обнаружен пристан ( $iC_{19}$ ), а в образце 7 не обнаружено пристана ( $iC_{19}$ ) и фитана ( $iC_{20}$ )).

Практически во всех образцах из обнажения (кроме образца 18) наблюдается нечетность, доминирование *n*-алканов с нечетным количеством атомов углерода над четными, в области высокомолекулярной части  $n$ - $C_{23}$ – $n$ - $C_{31}$ . В образце нефти наблюдается равномерный спад концентрации *n*-алканов в диапазоне от  $n$ - $C_{17}$  до  $n$ - $C_{38}$  (рис. 14).

Так же по группе алканов в образцах были рассчитаны и другие геохимические параметры:  $K_i$ -изопреноидный коэффициент, и Carbon Preference Index (CPI) [Bray, Evans, 1961].

$K_i$  (изопреноидный коэффициент) — в образцах 9 и 20 значения коэффициента указывают на ранние градации катагенеза, а в образце 22 на не зрелое ОВ (высокая погрешность в связи с низкими концен-

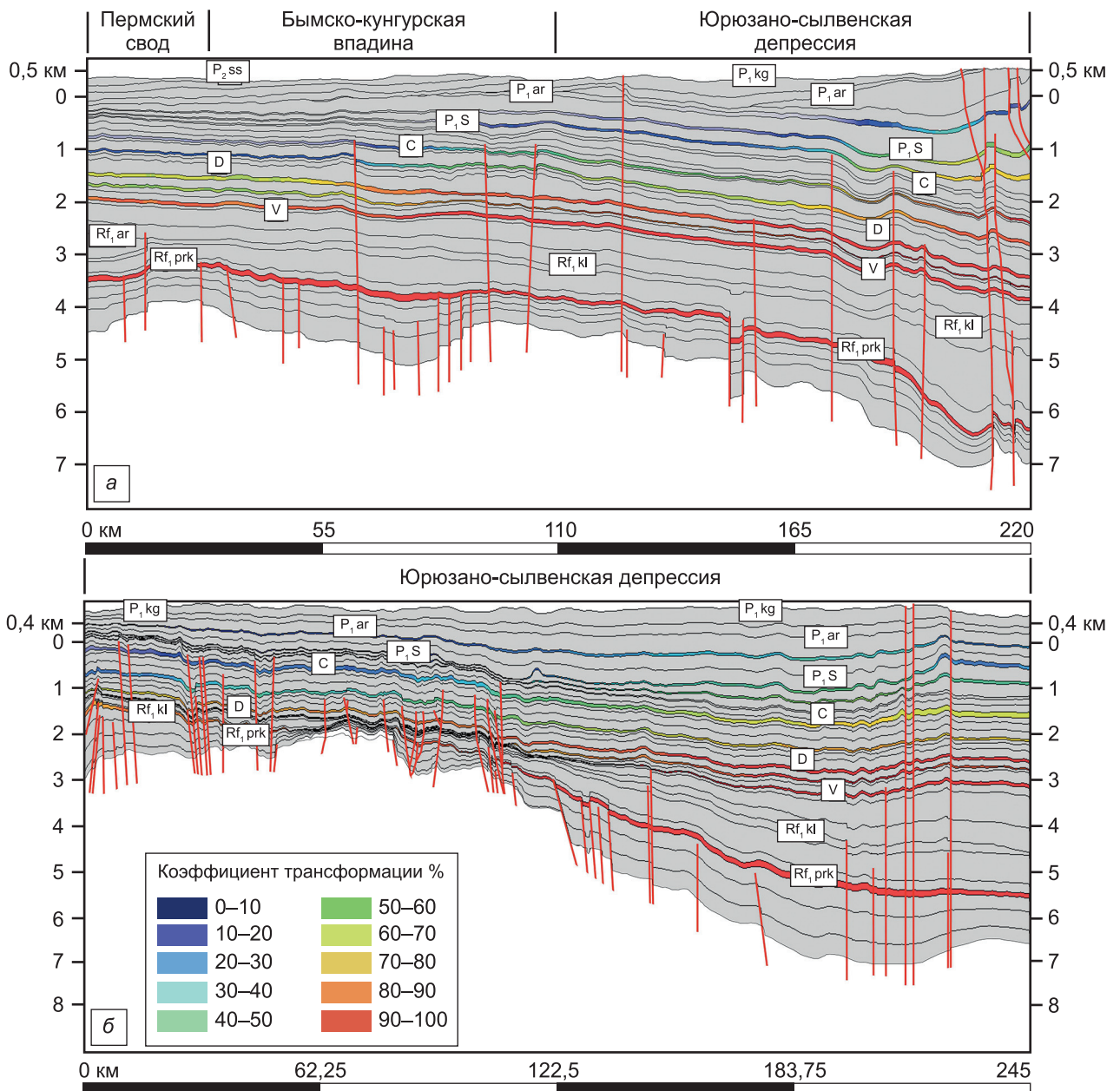


Рис. 11. Коэффициент трансформации органического вещества нефтематеринских пород; а — профиль А-Б, б — профиль В-Г

трациями пристана ( $iC_{19}$ ) и фитана ( $iC_{20}$ ). В нефти данный коэффициент указывает на зрелое ОВ.

Значения СРІ в образцах из обнажения указывают на термическую зрелость органического вещества (в образце 22 на низкую зрелость). В нефти данный коэффициент указывает на зрелое ОВ.

Параметр T24 ( $C_{24}$  тетрациклический терпан)/N30 ( $C_{30}$  αβ-гопан) — в образцах из обнажения данный показатель указывает на вклад бактериального ОВ (значения меньше 0,1), а в нефти на вклад смешанного бактериально-водорослевого ОВ (значение выше 0,3).

Параметр H29/N30 в образцах и нефти указывают на термическую зрелость и окислительные условия осадконакопления, что не коррелируется с другими показателями. Данный параметр не учитывался в дальнейшем.

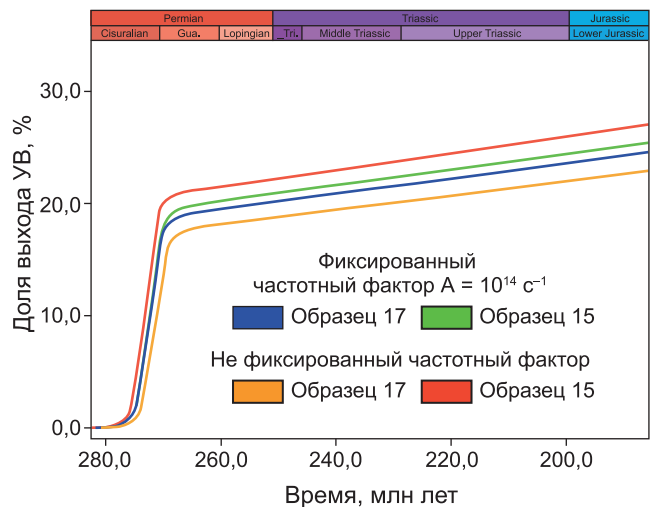


Рис. 12. Графики коэффициента трансформации от времени при разных кинетических спектрах деструкции керогена

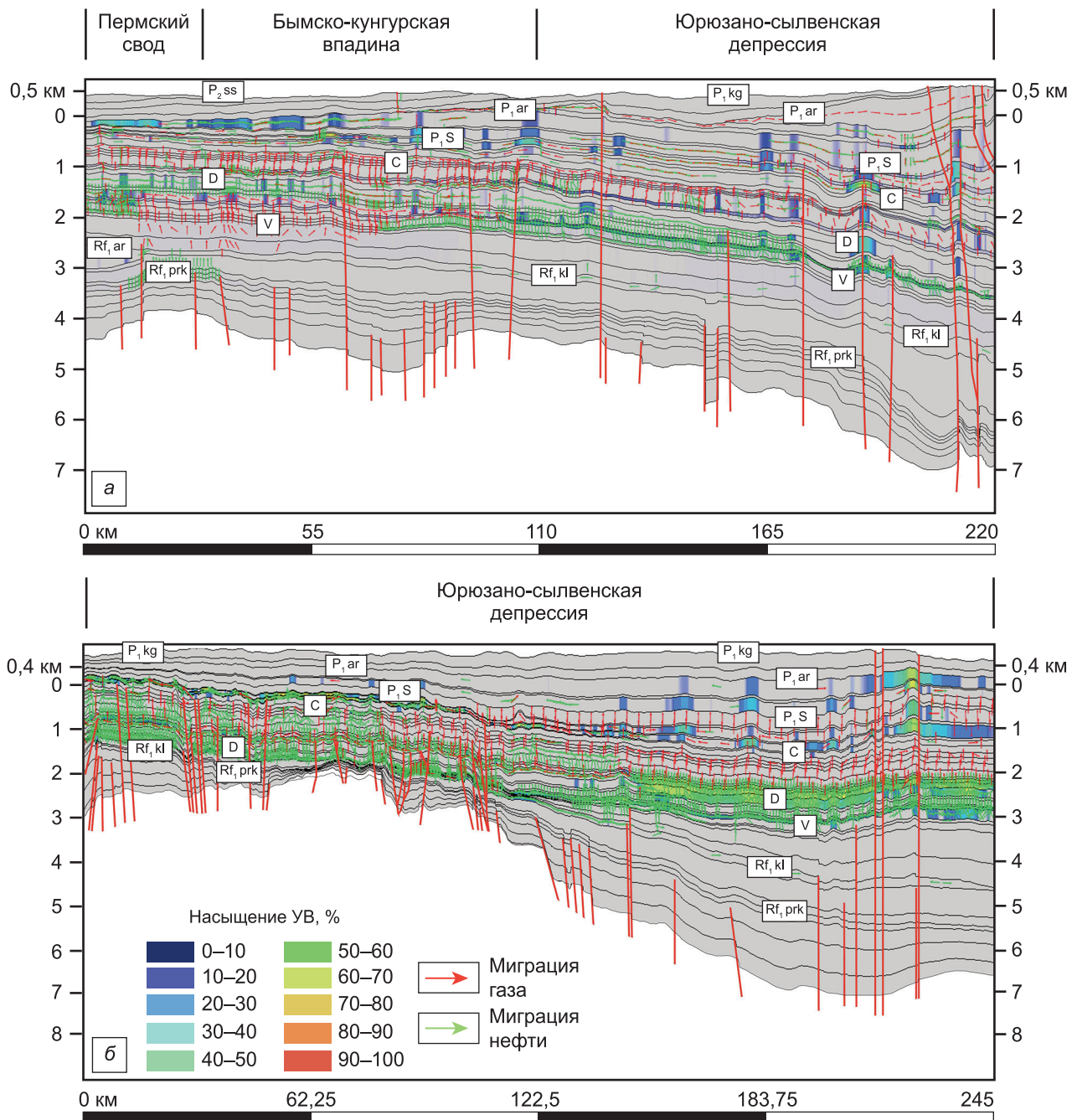


Рис. 13. Степень насыщения нефтью и газом и данные миграции: а — профиль А-Б, б — профиль В-Г

G (гаммацеран)/H30 (C<sub>30</sub>-αβ-ганопан) указывает на соленость бассейна седиментации. Значение в образцах и нефти указывают на повышенную соленость во время накопления органического вещества.

Показатели dia27S/(reg27S+dia27S) и dia29S/(reg29S+dia29S) в образцах из обнажения указывают на вклад в основном морского (аквогенного) ОБ. В нефти данный показатель указывает на более высокий вклад наземного ОБ.

Показатель Ts/Ts+Tm в образцах из обнажения указывает на низкую термическую зрелость, а в нефти на стадию «нефтяного окна».

Параметр 31S/31S+31R во всех образцах указывает на стадию нефтяного окна (значения выше

0,5). Коэффициент 32S/32S+32R также указывает на термическую зрелость органического вещества.

Показатели reg27-28-29 bb/(bb+aa) указывают на невысокую термическую зрелость образцов из обнажений, и на более высокую зрелость нефти.

Также был построен треугольная диаграмма распределения стеранов (рис. 15).

Исходя из данной диаграммы ОБ накапливалось в прибрежноморских условиях заливов, лагун или устьев. Наблюдается схожесть условий накопления для дивьинской свиты и исходного органического вещества нефти.

По данным интерпретации были рассчитаны показатели зрелости (MPI-1 [Radke et al., 1982]

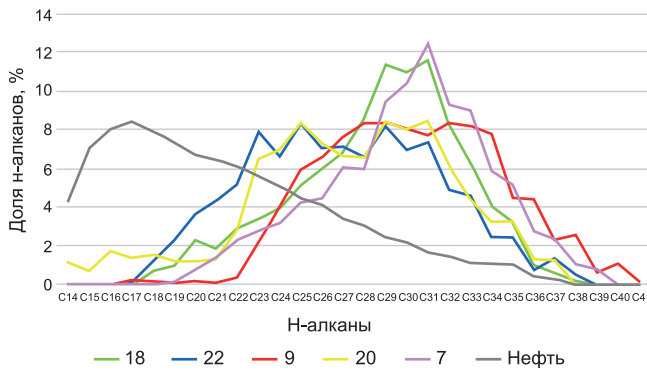


Рис. 14. Сравнение распределений н-алканов в образцах

и 4MDBT/ 1MDBT [Radke et al., 1986]). Значения MPI-1 плохо коррелируются с данными о зрелости образцов из обнажения и нефти (значения лежат в одном диапазоне). Значение же 4MDBT/ 1MDBT более достоверные, и указывают на низкую зрелость ОВ в образцах из обнажения (что также согласуется с данными пиролиза и углепетрографическими исследованиями), а в нефти значения 4MDBT/ 1MDBT указывают на начало нефтегенерации (эквивалент  $VR_0$  (%) 0,5–0,7%).

Рассчитанные коэффициенты были разделены на две группы: параметры, характеризующие зрелость, и параметры, характеризующие ОВ. По данным группам были построены звездчатые диаграммы (рис. 16).

По результатам биомаркерного анализа органическое вещество в образцах из обнажения и исходное ОВ нефти накапливались в мелководноморских восстановительных условиях. Образец нефти характеризуется более высокой катагенетической преобразованностью, чем образцы из обнажения. Стадия преобразованности ОВ в образцах из обнажения не высокая, соответствует начальной стадии нефтяного окна. Также и нефть характеризуется не высокой термической зрелостью, но выше чем в образцах обнажения (в более погруженных частях Юрюзано-Сылвенской депрессии зрелость дивьинской свиты



Рис. 15. Треугольная диаграмма распределения стеранов

может быть и выше). Хотя ОВ и образовывалось в схожих условиях, но в нефти Копальнинского месторождения наблюдается больший вклад гумусового ОВ. Вероятнее всего, дивьинская свита является единственной материнской толщей для данной нефти. Требуется дальнейшие исследования, и анализ материнских толщ депрессии.

**Заключение.** В ассель-сакмарских материнских толщах содержание органического углерода колеблется от 0,2 до 1,7%. Уровень водородного индекса свидетельствует о том, что органическое вещество относится к керогену III типа. Значения  $T_{max}$  (в среднем от 437 до 444 °C) свидетельствуют о термической зрелости стадий  $МК_1$ – $МК_2$ .

В образцах из обнажения дивьинской свиты содержится значительное количество органического углерода — в среднем более 1,5–2%. Водородный индекс свидетельствует о том, что органическое вещество относится к керогену II типа со значитель-

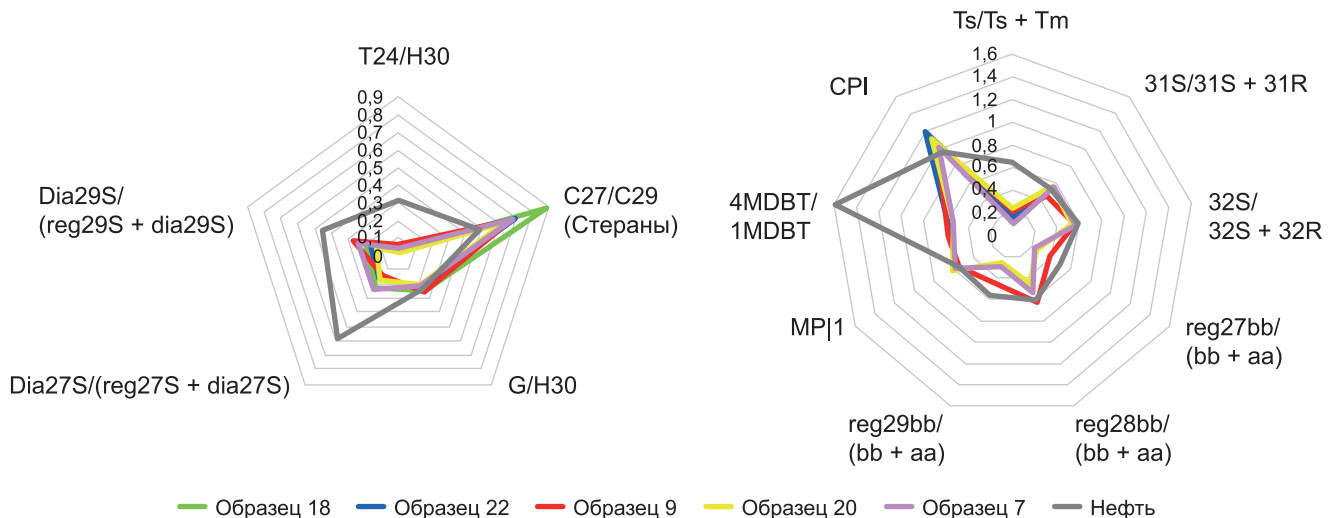


Рис. 16. Звездчатые диаграммы распределения рассчитанных геохимических параметров

ными примесями органического вещества III типа. Все проанализированные образцы имеют невысокую термическую зрелость с  $T_{\max}$  около 436 °С (ПК<sub>3</sub>–МК<sub>1</sub>), отражательная способность витринита (для сингенетичного витринита) составляет Ro- 0,54% (ранняя стадия МК<sub>1</sub>).

Судя по высокому содержанию и типу органического вещества породы нижнепермских материнских толщ характеризуются значительным нереализованным потенциалом.

Степень выработанности потенциала отложений нижнепермских материнских толщ в наиболее погруженных частях Юрюзано Сылвенской депрессии достигает 23–35%, что означает, что эти породы могли внести свой вклад в формирование нефтегазоносности Предуралья Краевого прогиба.

По результатам биомаркерного анализа органическое вещество в образцах из обнажения и исходное ОВ нефти накапливались в мелководноморских восстановительных условиях. Образец нефти характеризуется более высокой катагенетической преоб-

разованностью, чем образцы из обнажения. Стадия преобразованности ОВ в образцах из обнажения не высокая, соответствует начальной стадии нефтяного окна. Также и нефть характеризуется невысокой термической зрелостью, но выше чем в образцах обнажения (в более погруженных частях Юрюзано-Сылвенской депрессии зрелость дивьинской свиты может быть и выше). Хотя ОВ и образовывалось в схожих условиях, но в нефти Копальнинского месторождения наблюдается больший вклад гумусового ОВ. Вероятнее всего, дивьинская свита не является единственной материнской толщей для данной нефти, но вклад ее в формирование всё же не исключен. Требуются дальнейшие исследования, и анализ материнских толщ депрессии.

**Финансирование.** Работа выполнена на кафедре геологии и геохимии горючих ископаемых геологического факультета МГУ в рамках госбюджетной темы «Оценка ресурсов трудноизвлекаемых углеводородов и разработка инновационных методов их освоения», номер ЦИТИС АААА-А16-116033010113-2.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Галкин С.В. Методика вероятностной оценки генерационных перспектив в «старых» нефтедобывающих районах (на примере Пермского Прикамья) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2005. № 9–10. С. 5–8.

Кожанов Д.Д., Большакова М.А. Оценка вклада докембрийских отложений в формировании нефтеносности восточной части Волго-Уральского бассейна по результатам моделирования // Записки Горного института. 2024. № 266. С. 199–217.

Колчанова Р.Н., Кузнецова Н.М., Березина Е.Г. и др. Региональные сейсморазведочные исследования геологического строения Юрюзано-Сылвенской депрессии с целью выявления региональных зон нефтегазоаккумуляции, связанных с Камско-Кинельской системой прогибов: отчет сейсмических партий 15, 12 / ОАО «Пермнефтегеофизика». 2003. 115 с. 23 л. граф. пр.

Котик О.С., Котик И.С., Каргиева Т.Г. Пермские отложения юго-востока Коротаихинской впадины: углетрография, геохимия и нефтегазогенерационный потенциал // Геология нефти и газа. 2017. № 4. С. 91–102.

Мизенс Г.А. Верхнепалеозойский флиш западного Урала. УрО РАН, 1997.

Орлова А.Ю., Полудеткина Е.Н. Геохимия нефтей и органического вещества доманиковых отложений южно-татарского свода // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2023. Т. 18. № 1. С. 188–208.

Савостин Г.Г., Махнутина М.Л., Костышина М.О. и др. Изменчивость кинетических характеристик органического вещества баженовской свиты на примере исследования ядерного материала одной скважины в центральной части Западной Сибири // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 140–151.

Соболева Е.В., Гусева А.Н. Практикум по химии горючих ископаемых. М., 2014. С. 96.

Соколова Е.В. Информационный отчет «Зонально-региональные геофизические исследования (сейсморазведка в комплексе с гравиметрической съемкой) на Саргинской площади в восточной части Волго-Уральской нефтегазоносной провинции»: В 3 кн. / ФГУНПП «Росгеолфонд», ФГУ «Уральский ТФГИ», ФГУП «Баженовская геофизическая экспедиция». Кн. 1. 221 л. Кн. 2. 157 л. Кн. 3. 215 л.

Тихонова М.С., Калмыков А.Г., Иванова Д.А. и др. Изменчивость состава углеводородных соединений в юрских нефтегазоматеринских толщах Каменной вершины Краснотурганского свода (Западная Сибирь) // Георесурсы. 2021. № 23(2). С. 158–169.

Фортунатова Н.К., Швец-Тэнзта-Гурий А.Г., Агафонова Г.В. и др. Отчет «Оценка перспектив нефтегазоносности прогибов древних платформ России с целью выделения новых нефтегазоперспективных зон и объектов». М., 2012. Кн. 6.

Bray E.E., Evans E.D. Distribution of n-paraffins as a key to recognition of oil source formations // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1961. V. 22. No. 1. P. 2–15.

Espitalie J., Bordenave M.L. Rock-Eval pyrolysis // Bordenave (Ed.) Applied Petroleum Geochemistry. Technip ed., Paris, 1993. P. 237–361.

Peters K.E. The biomarker guide. 2nd ed., 2005. 702 p.

Radke M., Welte D.H., Wilsch H. Maturity parameters for aromatic hydrocarbons: influence of organic matter type // Organic Geochemistry. 1986. V. 10. No. 1–3. P. 51–63.

Radke M., Wilsch H., Leythaeuser D., et al. Aromatic components of coal: relationship of distribution pattern with rank // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1982. V. 46. No. 10. P. 1831–1848.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 550.4: 556.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-49-61

## ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ( $\delta^{17}\text{O}$ , $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ ) СВОБОДНОЙ И СВЯЗАННОЙ ВОД ГЛИНИСТОЙ ФРАКЦИИ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО-КУБАНСКОГО ПРОГИБА

Наталья Александровна Харитоновна<sup>1</sup>✉, Георгий Алексеевич Челноков<sup>2</sup>,  
Екатерина Сергеевна Казак<sup>3</sup>, Анна Валерьевна Асеева<sup>4</sup>, Александр Валерьевич  
Ермаков<sup>5</sup>, Александр Александрович Карабцов<sup>6</sup>, Василий Юрьевич Лаврушин<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; tchenat@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

<sup>2</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия; geowater@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Kanigu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4427-3196>

<sup>4</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; barkar\_anna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5809-8125>

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Геологический институт РАН, Москва, Россия; a.v.ermakov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8125-1789>

<sup>6</sup> Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия; karabzov@fegi.ru

<sup>7</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия; wl2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4815-7627>

**Аннотация.** В статье представлены оригинальные данные об изотопном составе водной компоненты грязевых вулканов южной части Западно-Кубанского прогиба. Впервые представлены значения стабильных изотопов кислорода и водорода ( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ ) в свободной, поровой и связанной водах, выделенных экспериментальным методом из глинистой пульпы вулканов при температурах 105 и 350 °С. Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии значимого вклада дегидратационных вод, выделяющихся при трансформации смектита в иллит, в водный баланс грязевых вулканов Керченско-Таманской области. Водная компонента изучаемых грязевых вулканов формируется, главным образом, за счет смешивания инфильтрованных метеорных вод региона, морских вод и адсорбционных вод глинистых фаз, извлекаемых при прогреве субстрата до 150 °С.

**Ключевые слова:** грязевые вулканы, водная компонента, стабильные изотопы, экспериментальные исследования, глинистая фракция, Тамань, Керчь

**Для цитирования:** Харитоновна Н.А., Челноков Г.А., Казак Е.С., Асеева А.В., Ермаков А.В., Карабцов А.А., Лаврушин В.Ю. Изотопные характеристики ( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) свободной и связанной вод глинистой фракции грязевых вулканов южной части Западно-Кубанского прогиба // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 49–61.

## ISOTOPIC CHARACTERISTICS ( $\delta^{17}\text{O}$ , $\delta^{18}\text{O}$ , $\delta\text{D}$ ) OF LIQUID AND CLAY-BOUND WATER FRACTION OF MUD VOLCANOES OF THE SOUTHERN PART OF THE WEST KUBAN TROUGH

Natalya A. Kharitonova<sup>1</sup>✉, Georgiy A. Chelnokov<sup>2</sup>, Ekaterina S. Kazak<sup>3</sup>,  
Anna V. Aseeva<sup>4</sup>, Aleksandr V. Ermakov<sup>5</sup>, Aleksandr A. Karabtsov<sup>6</sup>,  
Vasilii Yu. Lavrushin<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; tchenat@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0855-3385>

<sup>2</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; geowater@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6020-9277>

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Kanigu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4427-3196>

<sup>4</sup> Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; barkar\_anna@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5809-8125>

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University; Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; a.v.ermakov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8125-1789>

<sup>6</sup> Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia; karabzov@fegi.ru

<sup>7</sup> Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; wl2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4815-7627>

**Abstract.** The present paper provides novel isotopic data on the water composition of mud volcanoes located in the southern sector of the West Kuban Trough. For the first time, stable isotope ratios of oxygen and hydrogen ( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , and  $\delta\text{D}$ ) were determined jointly for both free and clay-bound water fractions, experimentally extracted using a direct evaporation technique from clay pulp samples at 105 °C and 350 °C. The obtained results demonstrate that dehydration waters released during the smectite–illite transformation contribute negligibly to the overall water budget of the mud volcanoes in the Kerch–Taman region. The isotopic signatures indicate that the formation of mud volcano waters is primarily controlled by the mixing of infiltrating meteoric waters, seawater, and physically bound waters of clays liberated under natural substrate heating up to approximately 150 °C.

**Keywords:** mud volcanoes, water phase, stable isotopes, experimental test, clay fraction, Taman, Kerch

**For citation:** Kharitonova N.A., Chelnokov G.A., Kazak E.S., Aseeva A.V., Ermakov A.V., Karabtsov A.A., Lavrushin V.Yu. Isotope characteristics ( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) of liquid and bound waters of the clay fraction of mud volcanoes in the southern part of the West Kuban trough. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 49–61. (In Russ.).

**Введение.** При формировании грязевых вулканов происходит множество взаимосвязанных процессов: седиментация, диагенез, созревание органического вещества, истирание и дробление пород, вынос вещества к поверхности, аккумуляция продуктов извержений. Геохимическое исследование компонентов извержений грязевых вулканов (воды, породы и газа) дает возможность понять механизмы формирования и эволюции грязевых вулканов, установить их связь с углеводородами и реконструировать историю развития осадочного бассейна.

Самым крупным районом проявления грязевого вулканизма на территории РФ является южная часть Западно-Кубанского прогиба, охватывающая равнинные районы Северо-Западного Предкавказья и Восточного Крыма (Таманский и Керченский полуострова, соответственно) (рис. 1). Здесь, в пределах субширотной Керченско-Таманской области грязевого вулканизма, сосредоточено более 80 вулканов, из которых примерно половина действует постоянно [Якубов и др., 1980; Шнюков и др., 1986, 2005; Алиев и др., 2015]. Грязевулканические постройки локализованы вблизи южного борта Западно-Кубанского прогиба в полосе  $\sim 150 \times 30$  км. Несмотря на многолетние исследования, природа грязевулканических проявлений Керченско-Таманского региона все еще дискуссионна. Одним из компонентов грязевых вулканов является водная фаза, чей генезис все еще не установлен, несмотря на значительное количество работ, посвященных данной тематике. Остается непонятным вопрос о механизме формирования на больших глубинах разжиженной глинистой пульпы и степень гидродинамической изолированности грязевулканических каналов от находящихся в верхней части разреза водоносных комплексов и от расположенных рядом морских вод.

Основная цель работы заключалась в комплексном изучении изотопных характеристик ( $\delta^{17}\text{O}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) различных генетических типов вод, содержащихся в глинистой пульпе грязевых вулканов. Особое внимание уделялось анализу свободной (жидкой), поровой и связанной водам. В ходе исследования впервые осуществлен изотопный анализ экстрагированных при  $105^\circ\text{C}$  и  $350^\circ\text{C}$  вод из грязевых вулканических построек, что позволило определить их генетическую принадлежность, установить происхождение различных типов вод и выявить особенности формирования водной фазы вулканов.

**Объекты и методы исследования.** Было исследовано 22 грязевых вулкана региона: 13 на Керчинском и 9 на Таманском полуостровах. Места отбора проб и их краткая характеристика представлены на рис. 2 и в табл. 1. На вулканах отбирались образцы глинистой пульпы, которая после отстаивания в течение

суток отфильтровывалась через мембранный фильтр Advantec с размером пор 0,45 мкм. Образцы после отбора были герметично упакованы в несколько полиэтиленовых пакетов и хранились в лабораторных условиях без перепада температуры, что позволило избежать испарения воды.

Глинистая пульпа была изучена методами рентгенофазового анализа и ИСП-МС. Анализ проводился с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku MiniFlex II (Япония) с использованием излучения Cu-K $\alpha$ , генерируемого при 30 кВ и 15 мА, и с использованием монохроматора на дифрагированном пучке и непрерывной скоростью сканирования  $1^\circ 2\theta/\text{мин} - 1$  с  $0,02^\circ 2\theta$ . Для детального изучения глинистых минералов образец был разделен на фракции методом отмучивания в дистиллированной воде [Hubert et al., 2012]. Исходная проба разделилась на три фракции 1 — 10–100 микрон (5 минут отмучивания); 2 — 1–10 микрон (1 час отмучивания); 3 — меньше 1 микрона (сутки отмучивания). Для фракций 1–10 микрон и меньше 1 микрона были подготовлены ориентированные образцы, поскольку при съемке ориентированного препарата интенсивность базальных линий глинистых минералов увеличивается. В дальнейшем ориентированные препараты были насыщены в парах этиленгликоля (насыщенный), после чего прокалены при  $550^\circ\text{C}$  (прокаленный). Определение фаз проводилось с помощью программного обеспечения, которое поставлялось вместе с прибором (PDXL), и базы данных ICDD (обновлена в 2012) для расшифровки.

Пробы свободной (пластовой) воды для изотопных исследований были отобраны в пластиковые емкости по 10 мл без фильтрации. Выделение поровой и физически-связанной (рыхлосвязанной) водных фаз выполнялось методом испарения на устройстве для анализа водосодержания УДАВ 1.2-5. Относительная ошибка определения не превышает 5 отн.% [Kazak, Kazak, 2019].

В данной статье за основу разделения вод по их видам в грязевой пульпе принята классификация В.И. Осипова и В.Н. Соколова (2013) с уточнениями Е.С. Казак [Казак и др., 2023]. К свободной поровой воде отнесены воды, включая межслоевые и слабосвязанные адсорбированные фазы, находящиеся в порах глинистого материала, подчиняющиеся законам гравитации, которые могут быть выделены из образца при его фильтрации/отстаивании. При атмосферной влажности и температуре земной поверхности в районе  $+15^\circ\text{C}$  большая часть физически адсорбированной воды равномерно распределена в межслоевом пространстве глинистых частиц [Cases et al., 1997]. Вода сконденсированна в их мезо- и микропорах. Большая часть этой воды

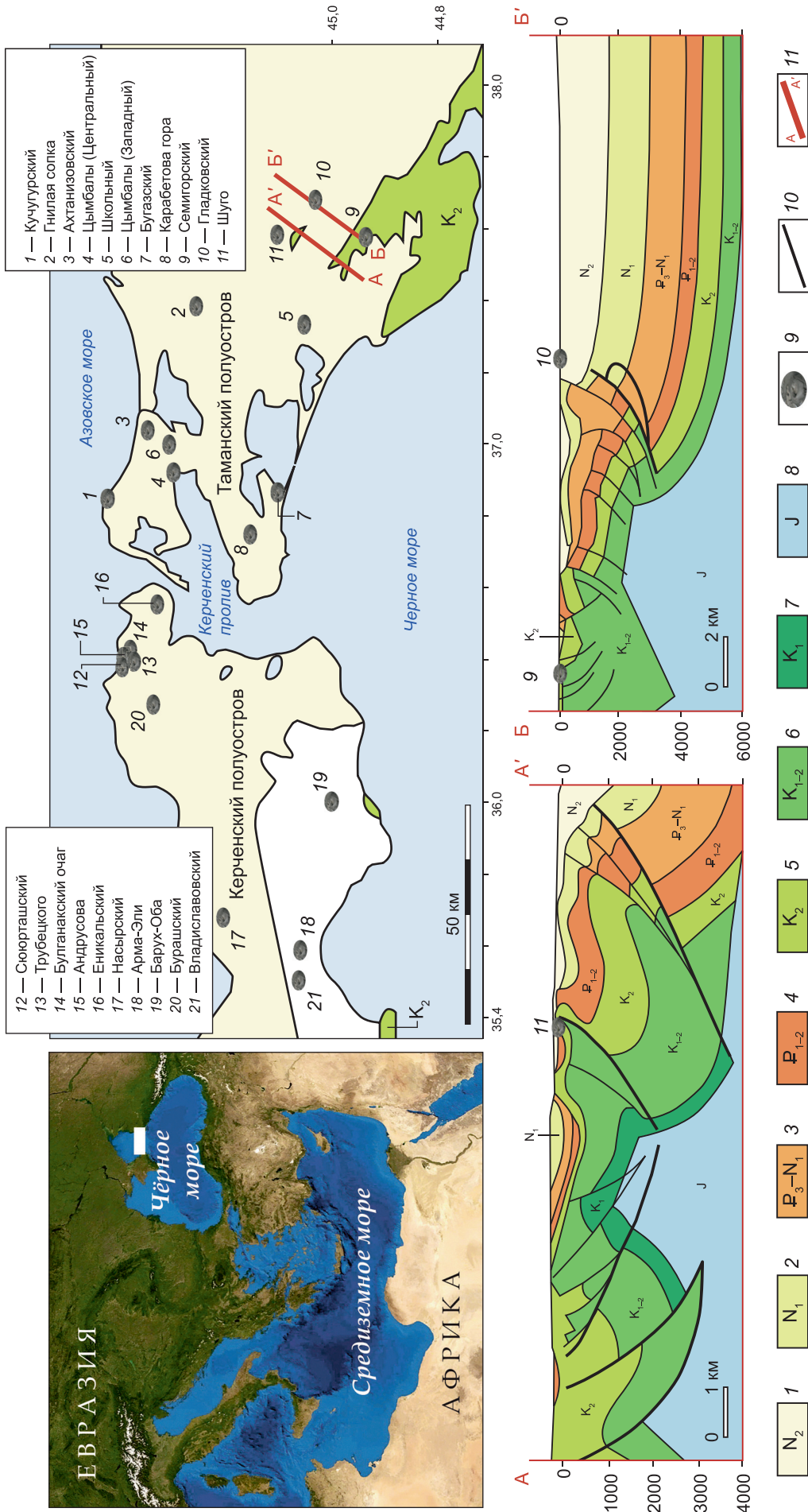


Рис. 1. Расположение основных грязевулканических проявлений в пределах Керченско-Таманской области (по данным [Шнюков и др., 2005; Челноков и др., 2023]). Геологические разрезы А-А' и Б'-Б' составлены по данным Государственной геологической карты М 1 : 200 000 [Корсаков и др., 2021] и В.И. Попкова [Попков и др., 2017] с упрощениями. 1 — отложения верхнего неогена. Кварцевые пески с прослоями глины, песчано-глинистого конгломерата, ракушками; 2 — отложения нижнего неогена. Глины с редкими прослоями мергелей, иногда известняков и песчаников; 3 — палеоген-неогеновый водоупорный комплекс. Глины с прослоями, линзами и конкрециями сидеритов; 4 — палеогеновая карбонатно-терригенная толща; 5 — верхнемеловые терригенно-карбонатные отложения; 6 — нижне-верхнемеловые отложения, представленные известняками, мергелями; 7 — нижнемеловые отложения (глины, песчаники, конгломераты); 8 — юрские отложения. Рифтогенные, массивные, слоистые известняки, аргиллиты, лавы андезитов; 9 — места локализации грязевых вулканов; 10 — тектонические деформации; 11 — геологические разрезы

Таблица 1

## Краткая гидрохимическая характеристика изученных вулканов

Шифр пробы	Название вулкана	Координаты		Высотная отметка, м	Температура, °С	Минерализация, г/л	pH	Eh, мВ	Тип воды	rNa/rCl	T <sub>прогрева</sub> по t(Mg/Li), °С
		Широта	Долгота								
<b>Грязевые вулканы Таманского полуострова</b>											
1_23	Кучугурский	45,432135	36,922775	86	18,6	7	7,06	-156	Cl/Na	1,22	47
3_23	Ахтанизовский	45,312074	37,081979	50	15	7	7,29	-221	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	1,94	95
4_23	Цымбалы центральная	45,309217	37,039311	100	20,6	10	8,23	-225	Cl/Na	1,34	45
5_23	Цымбалы западная	45,308626	37,031015	93	21,5	8,5	7,96	n/a	Cl/Na	1,29	67
7_23	Семигорская скважина	44,898167	37,604003	85	12	5	7,23	-58	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	2,51	85
8_23	Семигорский	44,901164	37,597804	65	20	5,5	8,38	-170	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	2,62	81
9_23	Школьный	45,028426	37,585526	184	n/a	7	7,83	-233	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	1,70	62
10_23	Гладковский	45,005494	37,723604	122	18,6	25	7,14	-111	Cl/Na	0,7	133
11_23	Шуго	45,070374	37,610363	139	16,2	9	7,5	-169	Cl/Na	1,44	138
12_23	Бугазский	45,118613	36,897775	8	18,2	9	8,79	-40	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	1,95	77
13_23	Карabetова гора	45,20107	36,794928	116	26	12,4	7,17	n/a	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	4,12	85
16_23	Гнилая сопка (Гефест)	45,253685	37,435315	27	29,5	6,5	8,82	-303	Cl/Na	1,19	52
17_23	Сююрташский	45,446794	36,112255	40	n/a	15	n/a	n/a	Cl/Na	n/a	52
<b>Грязевые вулканы Керченского полуострова</b>											
19_23	Еникальский	45,379238	36,619914	27	17,8	11,5	6,92	-90	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	3,35	91
20_23	Андрусова	45,427653	36,476646	67	16,1	13,9	7,62	n/a	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	1,63	107
21_23	Булганакский очаг	45,423724	36,478044	57	26	6,4	6,7	-152	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	1,58	123
23_23	Трубецкого	45,424811	36,464488	86	n/a	14	6,79	-303	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	1,64	108
27_23	Владиславовский	45,155549	35,437678	28	n/a	12	9,03	82	Cl/Na	1,01	95
28_23	Арма-Эли, сальза 1	45,182588	35,578095	34	19,6	12	7,56	-195	Cl/Na	1,03	85
29_23	Насырский	45,290789	35,681872	28	24	15,3	7,65	59	Cl/Na	0,99	73
34_23	Борух-Оба	45,121785	36,000801	75	22,7	14	8,88	-352	HCO <sub>3</sub> -Cl/Na	2,3	104
36_23	Бурашский	45,398632	36,336047	124	23	9,08	7,15	-125	Cl/Na	0,95	69

Примечание: n/a — нет данных.

извлекается при комнатной температуре при относительной влажности около 0% или при повышенных температурах. Однако, часть воды, прочно связанная вокруг обменных катионов, может оставаться и до более высоких температур.

К физически слабосвязанной воде отнесены воды, адсорбированные на поверхности минерала, имеющие ограниченную подвижность и не подчиняющиеся силам гравитации, их выделение начинается в диапазоне температур от 80 °С и выше. При повышении температуры молекулы H<sub>2</sub>O удаляются последовательно, в зависимости от силы их взаимодействия с поверхностью глинистого минерала. Межслойная вода глинов находится в равновесии с внешней влагой и удаляется вместе с физически адсорбированной водой, хотя и с меньшей скоростью [Emmerich et al., 2018; Ferrage et al., 2010]. Удаление физически адсорбированной и основной межслойной воды завершается при нагреве до 105 °С.

К химически связанной воде отнесены воды, входящие в кристаллическую структуру минеральной фазы в виде групп ОН. Точная температура начала их выделения зависит от типа минеральной фазы,

и обычно начинается для смектитов с 400 °С, переходя в необратимый процесс при 600 °С [Srodo' n, McCarty, 2008; Kuligiewicz, Derkowski, 2017].

Метод испарения предусматривает ступенчатый нагрев образца в закрытой кювете до высокой температуры, обеспечивающей испарение из образца воды, пары которой затем конденсируются и собираются в мерной пробирке (рис. 3) [Kazak, Kazak, 2019; Kazak и др., 2022]. Кювета выполнена из термостойкого материала и имеет герметично закрывающуюся крышку с тонкой отводящей трубочкой, один конец которой находится в кювете, другой опускается в пробирку-приемник. Образец взвешивается и помещается в кювету, которую ставят в нагревательный элемент и прогревают. В емкости с холодной водой или льдом ниже уровня положения образца в нагревательном элементе находится пробирка-приемник. После прогрева при заданной температуре кювету с образцом охлаждают в эксикаторе и затем измеряют потерю массы породы, а также количество воды в пробирке приемнике.

Выделение рыхлосвязанной воды из образцов пород проводилось при температуре 105 °С в течение

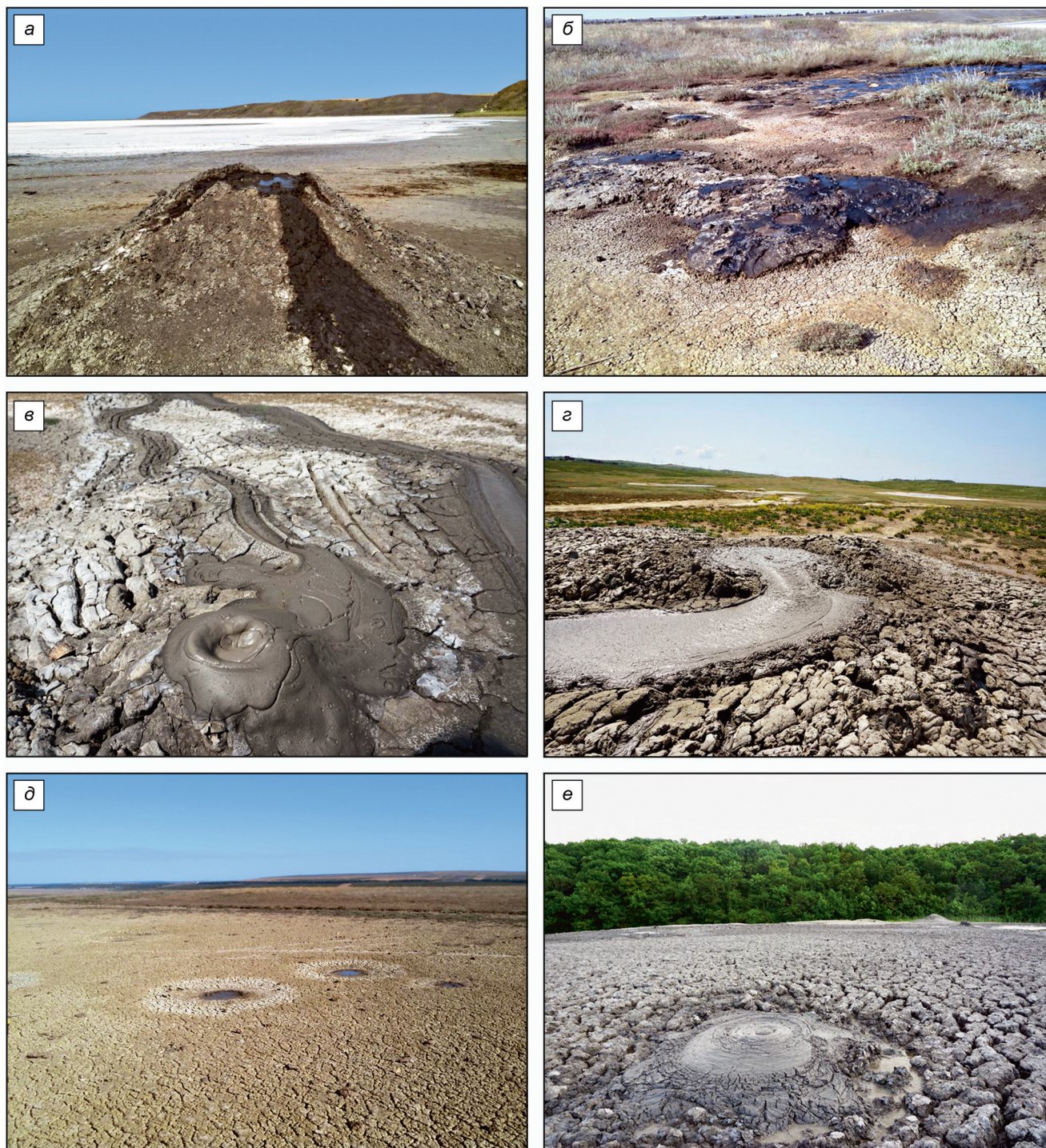


Рис. 2. Облик грязевых вулканов Керченско-Таманской области: а — Чонгеленский (Тобечик); б — Насырский; в — Карabetова гора; г — Андрусова гора; д — Шапурский; е — Шуго. Полевые фото В.Ю. Лаврушина, 2023 год

5 ч. Выделение прочносвязанной и межслоевой воды осуществлялось при температуре 350 °С в течение 5 ч. В среднем использовалось около 50 г каждого образца. В табл. 2 приведено количество воды, выделившееся при эксперименте, и изначальная влажность изучаемой фракции.

Также был выполнен прогрев водопродонной воды до 150 °С с целью оценки фракционирования изотопов кислорода и водорода при увеличении температуры.

Для выявления влияния процессов испарения и влажности на изотопный состав изучаемых вод был произведен расчет дейтериевого D-exc (‰) и <sup>17</sup>Oexc (ppt) эксцессов по следующим формулам:

$$D - excess = \delta D - 8\delta^{18}O$$

и

$$\frac{^{17}O - excess}{10^6} = \ln \left( \frac{\delta^{17}O}{1000} + 1 \right) - 0,528 \ln \left( \frac{\delta^{18}O}{1000} + 1 \right).$$

Таблица 2

## Количество воды, полученное при эксперименте, и исходная влажность образца

Шифр пробы	Название пробы	Температура нагрева, °С	Масса исходной породы, г	Масса выделившейся воды, г	W, %
Грязевые вулканы Таманского полуострова					
1_23	Кучугурский	105	37,25	8,22	22,1
		350	28,73	7,89	
3_23	Ахтанизовский	105	70,78	5,26	7,4
		350	65,61	3,75	
5_23	Цымбалы	105	16,68	2,85	17,1
		350	13,39	5,12	
7_23	Семигорская скважина	105	41,07	5,99	14,6
		350	34,85	6,27	
8_23	Семигорский	105	67,67	9,70	14,3
		350	57,69	6,79	
9_23	Школьный	105	35,67	14,50	40,7
		350	20,77	3,39	
10_23	Гладковский	105	68,70	13,28	19,3
		350	55,25	7,08	
11_23	Шуго	105	82,42	2,70	3,3
		350	73,87	10,69	
12_23	Бугазский	105	13,47	3,34	24,8
		350	9,00	2,35	
13_23	Карabetова гора	105	45,85	4,70	10,3
		350	40,74	9,75	
17_23	Сюурткашский	105	57,29	11,65	20,3
		350	45,39	7,92	
Грязевые вулканы Керченского полуострова					
19_23	Еникальский	105	39,29	11,79	30,0
		350	27,30	6,01	
20_23	с. Андрусова	105	68,27	7,02	10,3
		350	63,39	3,83	
21_23	Булганакский очаг	105	27,09	5,04	18,6
		350	19,74	5,15	
23_23	Трубецкого	105	33,93	4,03	11,9
		350	29,65	6,72	
27_23	Владиславовский	105	18,68	1,37	7,3
		350	14,45	3,44	
28_23	Арма-Эли, сальза 1	105	23,16	4,31	18,6
		350	17,92	6,91	
29_23	Насырский	105	25,83	6,29	24,4
		350	19,22	5,86	
34_23	Борух-Оба	105	28,16	8,83	31,4
		350	18,77	3,87	
36_23	Бурашский	105	28,91	3,55	12,3
		350	23,85	5,98	

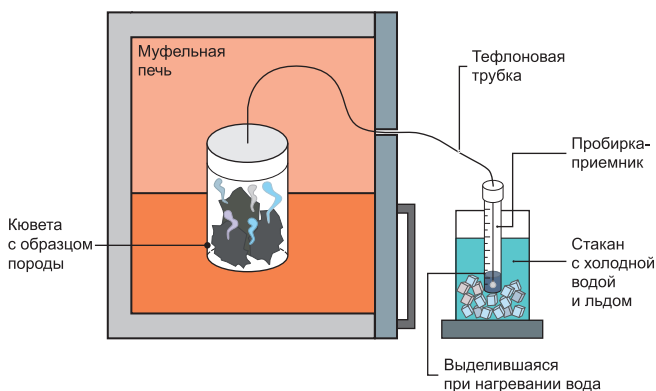


Рис. 3. Принципиальная схема метода испарения [Казак и др., 2022]

Температурно-независимый параметр  $^{17}\text{O}_{\text{excess}}$  является полезным инструментом, дополняющим традиционный D-excess для оценки гидрологических процессов, палеоклиматологии и палеогидрологии на основе стабильных изотопов [Aron et al., 2021]. Его чувствительность к диффузионному фракционированию делает его ценным индикатором условий (палео)влажности и местоположения регионов — источников влаги [Surma et al., 2021; Nyamgerel et al., 2021].

**Результаты исследования и их обсуждение.**

Практически все изученные грязевулканические воды являются холодными ( $T < 20^\circ\text{C}$ ), исключение составляют вулканы Цымбалы: центральная и западная сальзы ( $20,6$  и  $21,5^\circ\text{C}$ ), Карabetова гора ( $26,0^\circ\text{C}$ ), Гнилая сопка ( $29,5^\circ\text{C}$ ), Булганакская ( $26,0^\circ\text{C}$ ), Насырский ( $24,0^\circ\text{C}$ ), Борух-Оба ( $22,7^\circ\text{C}$ ) и Бурашский ( $23,0^\circ\text{C}$ ). Наши данные демонстрируют, что pH изучаемых вулканов располагается в диапазоне значений  $7,0$ – $8,9$ , окислительно-восстановительный потенциал (Eh) изменяется от  $-220$  до  $+430$  мВ. Минерализация водной компоненты демонстрирует значительную вариабельность в зависимости от конкретного вулкана, находясь в диапазоне  $5,0$ – $25,0$  г/л. Максимальные значения минерализации ( $>15$  г/л) выявлены в вулканах Сюурташский ( $15$  г/л), Насырский ( $15,3$  г/л) и Гладковский ( $25$  г/л). Предыдущие исследования показали однородность химического состава грязевулканических вод изучаемого района [Лаврушин и др., 2021]. Установлено, что климатический фактор существенно влияет на минерализацию и химический состав водной компоненты вулканов, так как в условиях аридного климата весьма активен процесс упаривания воды, что способствует изменению солевого состава грязевулканических вод.

По макрокомпонентному составу большинство исследуемых вод относится к  $\text{HCO}_3\text{-Cl/Na}$  и  $\text{Cl/Na}$  типам. Соотношение  $r\text{Na}/r\text{Cl}$  сильно варьирует в зависимости от химического типа грязевулканических вод и составляет  $0,7$ – $1,44$  для вод  $\text{Cl/Na}$  типа, и  $1,94$ – $4,12$  для  $\text{HCO}_3\text{-Cl/Na}$  вод. В сравнении с морской водой, грязевулканические воды всех изучаемых объектов обогащены В, Br, Ba, I, Li, Hg и As [Лаврушин и др., 2003]. Содержание бора (В)

Таблица 3

Изотопный состав изучаемых вод

Шифр пробы	Название вулкана	Грязевулканическая вода						Вода, экстрагированная при 105 °С						Вода, экстрагированная при 350 °С					
		$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\Delta^{17}\text{O}$	$\Delta^{18}\text{O}$	D-exc	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\Delta^{17}\text{O}$	$\Delta^{18}\text{O}$	D-exc	$\delta^{17}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\Delta^{17}\text{O}$	$\Delta^{18}\text{O}$	D-exc
		‰			ppm			‰			ppm			‰			ppm		
Грязевые вулканы Таманского полуострова																			
1_23	Кучугурский	1,82	3,44	-28,8	-0,25	8,3	-56,4	0,63	1,43	-25,48	-121	5,86	-132,6	4,15	8,01	7,66	-69	8,30	-133,3
3_23	Ахтанизовский	6,53	12,43	-22,0	-15,4	16,4	-121,4	1,71	3,29	-17,63	-23	6,74	-49,0	4,67	8,64	5,95	114	9,15	44,7
5_23	Цымбалы западная	3,98	7,57	-22,3	-12,1	11,6	-82,8	3,43	6,66	-29,44	-78	11,59	-131,4	6,52	12,60	1,40	-115	13,68	-215,6
7_23	Семигорская скважина	5,14	9,78	-18,5	-8,8	13,3	-96,7	4,05	8,01	-23,97	-170	12,26	-233,8	7,25	13,99	6,56	-111	14,42	-222,5
8_23	Семигорский	5,54	10,56	-20,2	-20,3	14,3	-104,6	6,54	12,62	-10,93	-98	15,23	-199,2	10,06	19,16	21,13	-15	17,77	-167,9
9_23	Школьный	3,58	6,82	-17,4	-15,2	10,2	-71,9	3,40	6,63	-16,91	-98	9,99	-151,1	8,28	15,60	26,15	75	13,58	-49,6
10_23	Гладковский	3,44	6,55	-9,3	-14,6	9,0	-61,7	3,06	5,91	-10,94	-51	8,52	-98,3	6,25	11,92	17,32	-22	11,00	-117,6
11_23	Шуго	5,49	10,44	-18,0	-9,3	13,9	-101,5	4,06	7,86	-24,79	-85	12,21	-148,1	7,31	14,15	8,02	-131	14,39	-244,4
12_23	Бугазский	4,77	9,09	-22,8	-17,5	13,2	-95,5	3,38	6,54	-32,53	-63	11,86	-115,5	7,67	14,71	6,55	-67	15,14	-184,5
13_23	Карabetова гора	5,88	11,20	-18,7	-20,1	14,8	-108,3	4,28	8,39	-26,54	-138	12,96	-204,8	6,95	13,42	-1,30	-115	14,83	-222,2
16_23	Гнилая сопка (Гефест)	1,25	2,36	-31,3	4,6	7,5	-50,2	0,56	1,15	-34,51	-44	6,71	-53,7	3,77	7,47	-3,78	-169	9,20	-228,6
17_23	Сююрташский	-0,52	-0,97	-27,6	-8,5	3,7	-19,9	0,28	0,41	-27,50	67	5,10	63,4	14,90	15,95	29,51		13,51	-127,6
Грязевые вулканы Керченского полуострова																			
19_23	Еникальский	6,56	12,48	-23,0	-15,1	16,6	-122,9	5,30	10,19	-29,09	-70	15,07	-151,0	9,35	17,71	8,58	36	17,88	-105,6
20_23	Андрусова	5,29	13,50	-10	-	16,0	-118,1	5,29	10,14	-13,05	-56	13,02	-137,1	8,80	16,77	17,80	-19	15,79	-153,5
21_23	Булганакский очаг	6,84	13,01	-21,7	-15,2	17,0	-125,8	5,04	9,71	-15,58	-74	12,91	-151,5	7,81	14,95	10,41	-58	14,90	-177,9
23_23	Трубецкого	6,93	13,19	-21,7	-11,8	17,1	-127,2	5,36	10,31	-28,47	-64	15,11	-146,9	8,09	15,44	-3,10	-33	17,08	-156,9
27_23	Владиславовский	1,60	3,05	-22,5	-7,0	7,1	-47,0	1,24	2,45	-28,46	-52	7,26	-72,0	4,61	8,88	1,55	-62	9,93	-132,6
28_23	Арма-Эли, сальза I	2,26	4,32	-25,3	-22,6	8,7	-59,9	0,59	1,25	-34,82	-67	6,85	-77,0	3,97	7,69	-3,86	-85	9,42	-146,7
29_23	Насырский	-0,28	-0,53	-19,8	5,3	3,2	-15,5	-1,08	-1,87	-27,86	-91	2,87	-76,0	2,20	4,06	1,17	59	5,16	26,6
34_23	Борух-Оба	6,86	13,09	-5,8	-27,5	15,1	-110,6	4,94	9,55	-16,36	-87	12,85	-163,8	7,90	14,91	10,11	50	14,90	-69,3
36_23	Бурашский	4,19	7,95	-14,4	-2,8	11,0	-78,0	3,16	6,12	-25,63	-68	10,58	-116,5	6,82	13,14	7,12	-98	13,50	-203,5
37_23	Черное море	-1,20	-2,36	-21,0	49,1	1,5	-2,1												
38_23	Кояшское озеро	1,09	1,89	-17,5	90,0	5,3	-32,6												
39_23	Азовское море	-0,87	-1,69	-19,7	28,8	2,0	-6,2												

в опробованных грязевулканических водах сильно варьирует от 0,6 до 1,64 г/л при среднем значении 310 мг/л. Концентрация Ва располагается в диапазоне от 0,04 до 21 мг/л и демонстрирует обратную корреляцию с содержанием  $\text{SO}_4^{2-}$ . Корреляция бария и гидрокарбонат-иона отсутствует. Содержание Sr демонстрирует широкий диапазон изменчивости от 0,1 до 42 мг/л, наиболее высокие концентрации характерны для вод Cl-Na типа [Лаврушин и др., 2021].

*Состав глинистой пульпы.* Состав глинистой пульпы изученных вулканов примерно одинаков, они состоят из преимущественно глинистых ми-

нералов в разнообразных пропорциях. Основным минералом является смектит (~30–40 масс.%), далее следует каолинит (~10–20 масс.%), хлорит (~1–7 масс.%), кварц (~20–45 масс.%) и плагиоклаз (~5–10 масс.%). В целом, это умеренно песчанистые преимущественно гидрослюдистые осадки майкопской серии с различным соотношением минеральных глинистых фаз. Пробы осадков из вулкана Булганакский очаг обогащены иллитом (~20–35 масс.%) и содержат незначительное количество смектита (до 10 масс.%), а пробы из вулканов Насырский, Владиславовский и Еникальский, наоборот, содер-

жат преимущественно смектит и обеднены иллитом, содержание которого составляет ~15 масс.%, ~13 масс.% и ~9 масс.%, соответственно.

В выбросах рассматриваемых вулканов присутствуют разнообразные аутигенные минералы: доминируют сложные карбонатные соединения, преимущественно Fe–Mg–Ca–(Mn)-карбонаты, часто встречается пирит разнообразной морфологии, кварц. Иногда присутствуют марказит, глауконит, гипс, барит, целестин.

*Изотопный состав грязевулканических вод.* Свободные (жидкие) воды, полученные в результате отстаивания грязевулканической субстанции, демонстрируют тяжелый изотопный состав:  $\delta^{17}\text{O}$  варьирует от  $-0,52$  до  $+5,88\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-0,97$  до  $+13,19\text{‰}$ , а  $\delta\text{D}$  от  $-31,3$  до  $-5,8\text{‰}$  (табл. 3). В целом, наши данные по содержанию  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  находятся в соответствии с полученными ранее результатами [Валяев и др., 1985; Селецкий, 1991; Лаврушин и др., 2005, 2015, 2021].

Наиболее «изотопно-тяжелыми» по  $\delta^{18}\text{O}$  ( $> +13\text{‰}$ ) являются воды следующих вулканов Керченского полуострова: Борух-Оба, Трубецкого, Булганакский очаг и Андрусова. Избыток  $\delta^{17}\text{O}$  ( $> +7\text{‰}$ ) обнаружен в вулканах Ахтанизовский (Таманский полуостров) и Еникальский, Булганакский очаг, Борух-Оба и Трубецкого (Керченский полуостров). Аномально высокое значение  $\delta\text{D}$  ( $> -15,0\text{‰}$ ) зафиксировано в водах вулканов Бурашский, Андрусова, Гладковский и Борух-Оба.

Наиболее «изотопно-легкими» являются воды вулканов Сюрташский и Насырский, значения изотопов близки к значениям в водах Черного и Азовского морей. Данные предыдущих исследований показывают, что в грязевулканических водах величина  $\delta^{18}\text{O}$  увеличивается параллельно росту концентрации  $\text{HCO}_3^-$  и бора, и уменьшается с ростом содержания ионов хлора и брома [Лаврушин и др., 2021]. Зависимость  $\delta^{18}\text{O}$ –Cl не прослеживается, видимо, вследствие наложенных процессов. Наиболее низкие значения  $\delta^{18}\text{O}$  характерны для вулканов, имеющих связь с подземными водами морского генезиса, а наиболее высокие — для вулканов, подвергшихся процессу значительного испарительного концентрирования. По данным В.Ю. Лаврушина, естественные изотопные значения жидкой фазы изучаемых вулканов (неискаженные наложенными процессами) составляют  $\delta^{18}\text{O} > +1\text{‰}$ .

В сравнении с локальными атмосферными и морскими водами наблюдается ярко выраженное обогащение  $\delta^{18}\text{O}$  (до  $+17,1\text{‰}$ ) и незначительный дефицит  $\delta\text{D}$  (до  $-20\text{‰}$ ), что вызывает заметное отклонение от глобальной линии метеорных вод. На бинарной диаграмме  $\delta\text{D}$ – $\delta^{18}\text{O}$  воды вулканов отчетливо демонстрируют сдвиг вправо от ГЛМВ, некоторые из вод попадают в поле распространения метаморфических вод (рис. 4).

Наибольший сдвиг вправо ( $\Delta^{18}\text{O} > +15\text{‰}$ ) характерен для следующих вулканов: Борух-Оба, Андрусо-

ва, Ахтанизовский, Еникальский, Булганакский очаг и Трубецкого. Столь отчетливый сдвиг обусловлен, по мнению большинства исследователей, двумя причинами: поступлением гидрационных вод при прогреве глинистых минералов и обменными реакциями  $\delta^{18}\text{O}$  воды с силикатами (алюмосиликатами) или карбонатами грязевулканического субстрата. Расчеты температур прогрева вод при их погружении, произведенные по Mg–Li геотермометру, показывают, что наибольший сдвиг по кислороду фиксируется в вулканах с температурой прогрева, более  $90^\circ\text{C}$  (табл. 1).

Для вулканов Таманского полуострова, исключая Сюрташский, Гладковский и Шуго, наблюдается прекрасная корреляционная зависимость с  $R \sim 0,95$  между  $\Delta^{18}\text{O}$  и температурой прогрева, рассчитанной по Mg–Li геотермометру. В водах вулканов Керченской группы корреляционная зависимость тоже просматривается, однако, она менее отчетливая с  $R \sim 0,5$ .

*Изотопный состав экстрагированных вод.* Изученные образцы грязевой пульпы содержат некоторое количество поверхностной адсорбированной (рыхлосвязанной) воды, выделение которой происходит в интервале  $90\text{--}105^\circ\text{C}$ . Масса выделившейся воды сильно варьирует в пробах, составляя от 1,37 до 14,7 г, и зависит от состава, а также исходной влажности образца (табл. 2). Наименьшее количество воды выделилось из вулкана Владиславовский (влажность 7,3%), а наибольшее — из вулкана Школьный (влажность 40,7%).

Изотопный состав адсорбированной воды неоднороден, варьирует в достаточно широком диапазоне: от  $-34,8$  до  $-10,9\text{‰}$  для  $\delta\text{D}$  и от  $-1,87$  до  $+12,62\text{‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$ . На бинарной диаграмме  $\delta\text{D}$ – $\delta^{18}\text{O}$  тренд изменения изотопного состава адсорбированной воды практически идентичен тренду для жидких вод грязевых вулканов (рис. 4). Это свидетельствует о значительном в процентном соотношении вкладе рыхлосвязанных вод в общий баланс гравитационных вод грязевых вулканов и о значительном прогреве исходных вод до  $120\text{--}140^\circ\text{C}$  при их погружении на глубину 1–5 км. Расчет температуры прогрева грязевулканических вод, выполненный на основе Mg–Li геотермометра (табл. 1), демонстрирует значения  $47\text{--}138^\circ\text{C}$ . Наибольшие температуры характерны для вулканов Гладковский и Шуго Таманского полуострова и Андрусова, Булганакский очаг, Трубецкого и Борух-Оба Керченского полуострова. Видимо, именно отличие в прогреве глинистого материала, помимо его состава, и определяет исходную влажность пульпы.

По изменению значения  $\delta\text{D}$  в эксперименте исследованные пробы делятся на две неравнозначные группы. В первой группе фиксируется закономерное увеличение содержания дейтерия при нагревании исходного субстрата (рис. 5, б). Данная картина характерна для вулканов Кучугурский, Ахтанизовский, Семигорский, Школьный, Сюрташский, Андрусова и Булганакский очаг. Мы полагаем, что

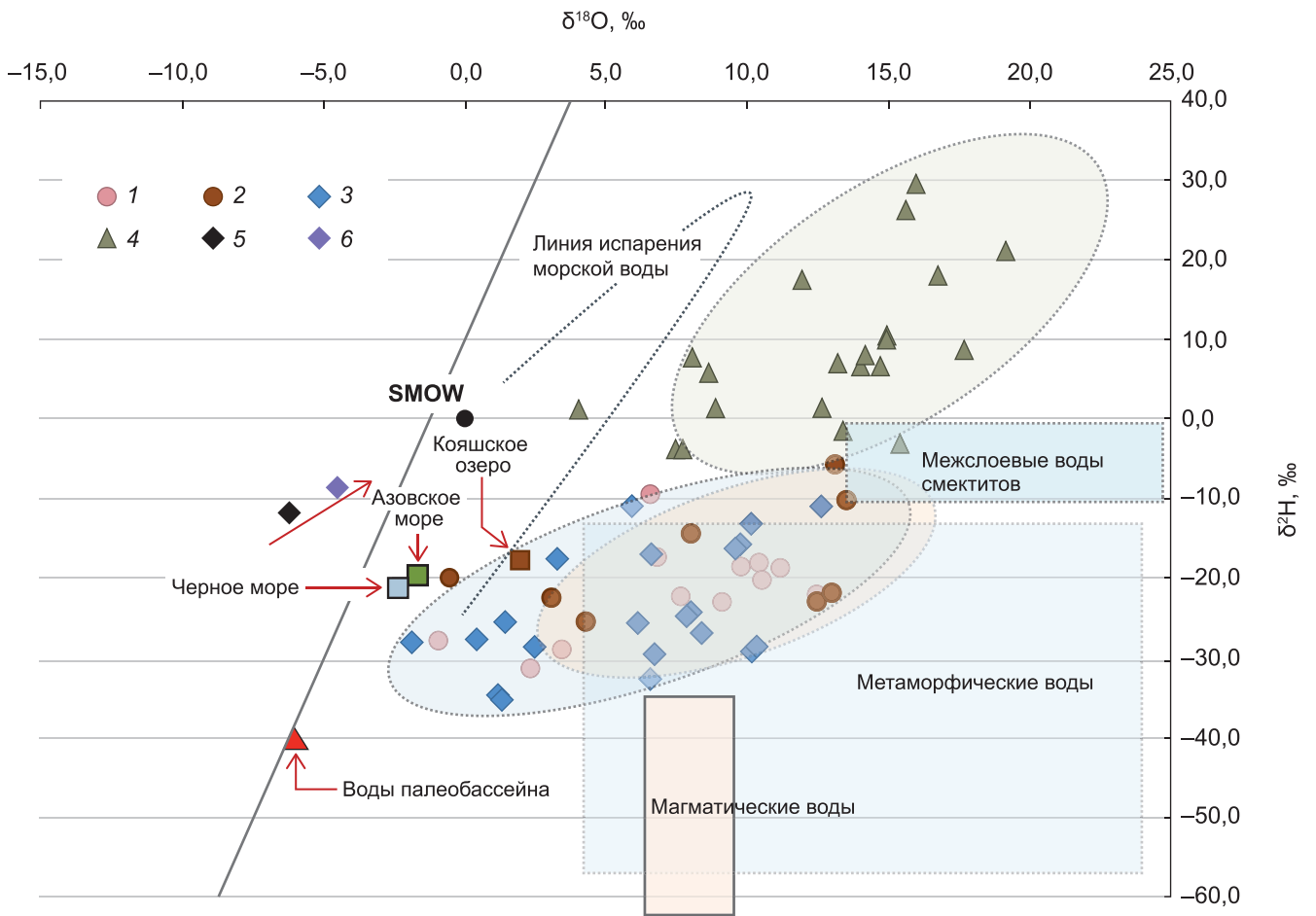


Рис. 4. Изотопный состав изученных вод на бинарной диаграмме в координатах  $\delta^{18}\text{O}-\delta\text{D}$ : 1 — пробы грязевых вод вулканов Таманского полуострова; 2 — пробы грязевых вод вулканов Керченского полуострова; 3 — воды, полученные при экстракции 105 °С; 4 — воды, полученные при экстракции 350 °С; 5, 6 — образцы водопродонной воды до опыта и после прогрева до 105 °С, соответственно

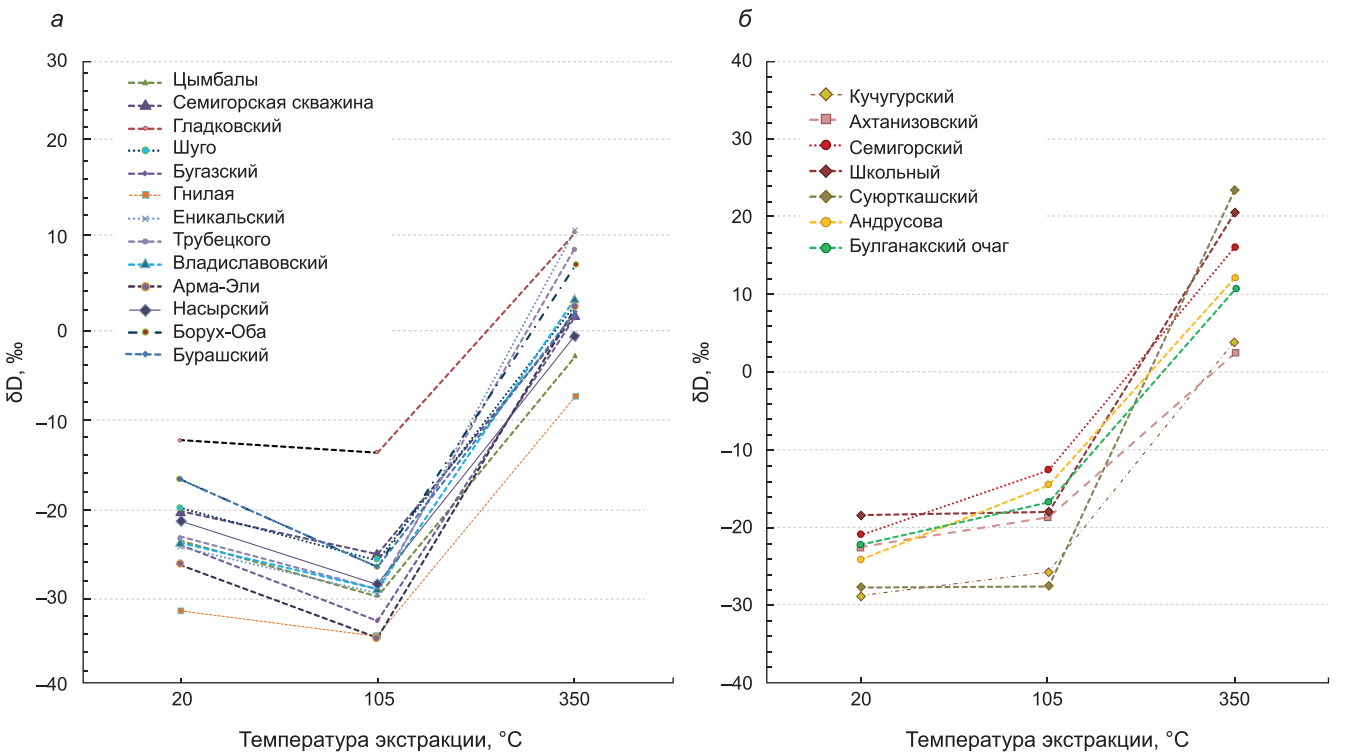


Рис. 5. Изменение изотопного состава дейтерия в изученных пробах в зависимости от температуры прогрева: а — образцы воды, в которых фиксируется дефицит дейтерия при 105 °С; б — образцы воды, в которых наблюдается закономерное утяжеление изотопного состава

наблюдаемый процесс является следствием испарительного концентрирования гравитационных вод, содержащихся в разжиженной глинистой пульпе. Для второй группы вулканов характерна противоположная картина — при прогреве до 105 °С наблюдается заметный дефицит  $\delta D$  выделившейся воды, который может составлять >10‰ (рис. 5, а). Процент дефицита различен для изучаемых вулканов, и, видимо, определяется минеральным составом глинистой пульпы. Наиболее значимое облегчение по водороду характерно для вулканов Насырский, Бугазский, Борух-Оба и Бурашский. На данном этапе исследований мы предполагаем, что наблюдаемый эффект происходит при нагреве в результате выделения значительного количества «изотопно-легкой» по дейтерию адсорбционной воды слюды, смектитов и каолинита, либо высвобождения воды в результате дегидратации гипса. Уровень «дефицита» дейтерия, возможно, регулируется количеством адсорбционной воды в глинистых фазах или количеством гипса. В то же время, зависимость между количеством выделяемой в эксперименте воды и ее измеренным значением  $\delta D$  не просматривается.

В образцах воды, извлеченной при 105 °С, изотопный сдвиг  $\Delta^{18}O$  имеет положительные значения, указывая на реакции изотопного обмена с минералами водовмещающей толщи. В большинстве проб (рис. 4) величина параметра  $\Delta^{18}O$  близка к его значению в пластовых водах. Исключение составляют вулканы Ахтанисовский и Булганакский очаг, в которых адсорбционная вода демонстрирует значительно меньший показатель  $\Delta^{18}O$ .

Изотопный сдвиг  $\Delta^{18}O$  в водах, извлеченных при 350 °С, значителен и характеризуется положительными значениями, за исключением вод вулканов Ахтанисовский и Булганакский очаг. Анализ закономерности изменения  $\delta D$  от  $\delta^{18}O$  всех вод показывает, что выявленный тренд характерен для испарительного концентрирования, угол регрессии составляет ~4–5°. Угол наклона корреляционной зависимости идентичен углу наклона для тестируемой водопроводной воды (рис. 4).

Полученный результат заставляет предположить, что в интервале температуры 300–350 °С не происходит извлечение структурных гидроксильных (ОН) групп из глинистых фракций, а наблюдается испарительное концентрирование извлеченной адсорбированной воды, которая была слабо связана в промежуточном слое («объемная» вода). При трансформации смектита, который может содержать до 25 масс.% кристаллизационных вод, в иллит и другие гидрослюды должно выделяться значительное количество гидратационных вод, которые имеют облегченный состав по дейтерию [Селецкий, 1978; Kanik et al., 2022; Whittaker et al., 2023]. Однако, в нашем эксперименте мы не фиксируем такого облегчения изотопного состава воды дейтерием, а наоборот происходит его утяжеление (табл. 3; рис. 4; 5), что может быть следствием испарительного

фракционирования. Это подтверждается результатами рентгенофазовых исследований глинистой пульпы вулканов — после прокаливания образца до 350 °С в составе глинистой пульпы остается пик смектита, который исчезает только при нагреве образца до 550 °С.

Дейтериевый эксцесс (D-*exs*) в изучаемых пробах варьирует очень значительно и располагается в диапазоне значений от –127,2 до –15,5‰ (рис. 6). Наибольший сдвиг параметра демонстрируют воды вулкана Насырский, а наименьший — воды вулкана Трубецкой. По величине D-*exs* изученные грязевулканические воды можно разделить на три большие группы: в первую группу попадают воды с D-*exs* < –100‰, во вторую вулканы со средним значением D-*exs* (–100÷–50‰), а в третью — с D-*exs* > –50‰. Большинство исследованных проб отнесены ко второй группе (табл. 2).

Анализ корреляционных связей между  $\delta^{18}O$  и D-*exs* (рис. 7) демонстрирует линейное уменьшение значения D-*excess* при росте содержаний  $\delta^{18}O$  для грязевулканических вод с хорошей корреляционной зависимостью ( $R \sim 0,97$ ), что свидетельствует о существенной роли испарения при формировании этих вод. Для адсорбционных вод подобная зависимость также проявляется, однако, она менее отчетливая и с меньшим коэффициентом корреляции. Воды, извлеченные при 350 °С, никакой корреляции между данными параметрами не демонстрируют, однако угол наклона регрессии (~4–5°) между  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , а также сильно отрицательные значения D-*exs* (табл. 3) свидетельствуют о значительном испарительном фракционировании во время опыта.

Между концентрациями молекул  $H_2^{18}O$  и  $H_2^{17}O$  в грязевулканических водах наблюдается тесная корреляционная связь, так как для  $^{17}O$  кинетический коэффициент фракционирования при испарении меньше, чем равновесный коэффициент фракционирования. Значения  $^{17}O_{exs}$  для жидких вод варьируют в широком диапазоне от –27,5 до 5,3 ‰. Минимальными значениями характеризуются воды вулканов Семигорский, Карабетова гора, Борух-Оба и Арма-Эли. Максимальные значения выявлены в водах вулканов Гнилая сопка (Гефест) и Насырский (табл. 3). Линия регрессии, аппроксимирующая значения функции  $\delta^{17}O(\delta^{18}O)$  в жидких водах вулканов, имеет наклон 0,527 близкий к наклону природных вод (0,528).

Рыхлосвязанная вода, извлеченная при 105 °С, имеет значительно более низкие значения  $^{17}O_{exs}$ : от –23 до –170 ‰ (рис. 6). Линия регрессии изменяет свой наклон до 0,521. В то же время наблюдаются практически прямая корреляция между параметрами  $^{17}O_{exs}$  и D-*exs* (рис. 8).

Вода, извлеченная при 350 °С, по показателю  $^{17}O_{exs}$  сильно дисперсионная: в некоторых вулканах наблюдаются резко отрицательные значения, в других же зафиксированы положительные значения (рис. 6). Линия регрессии  $\delta^{17}O(\delta^{18}O)$  увеличивает

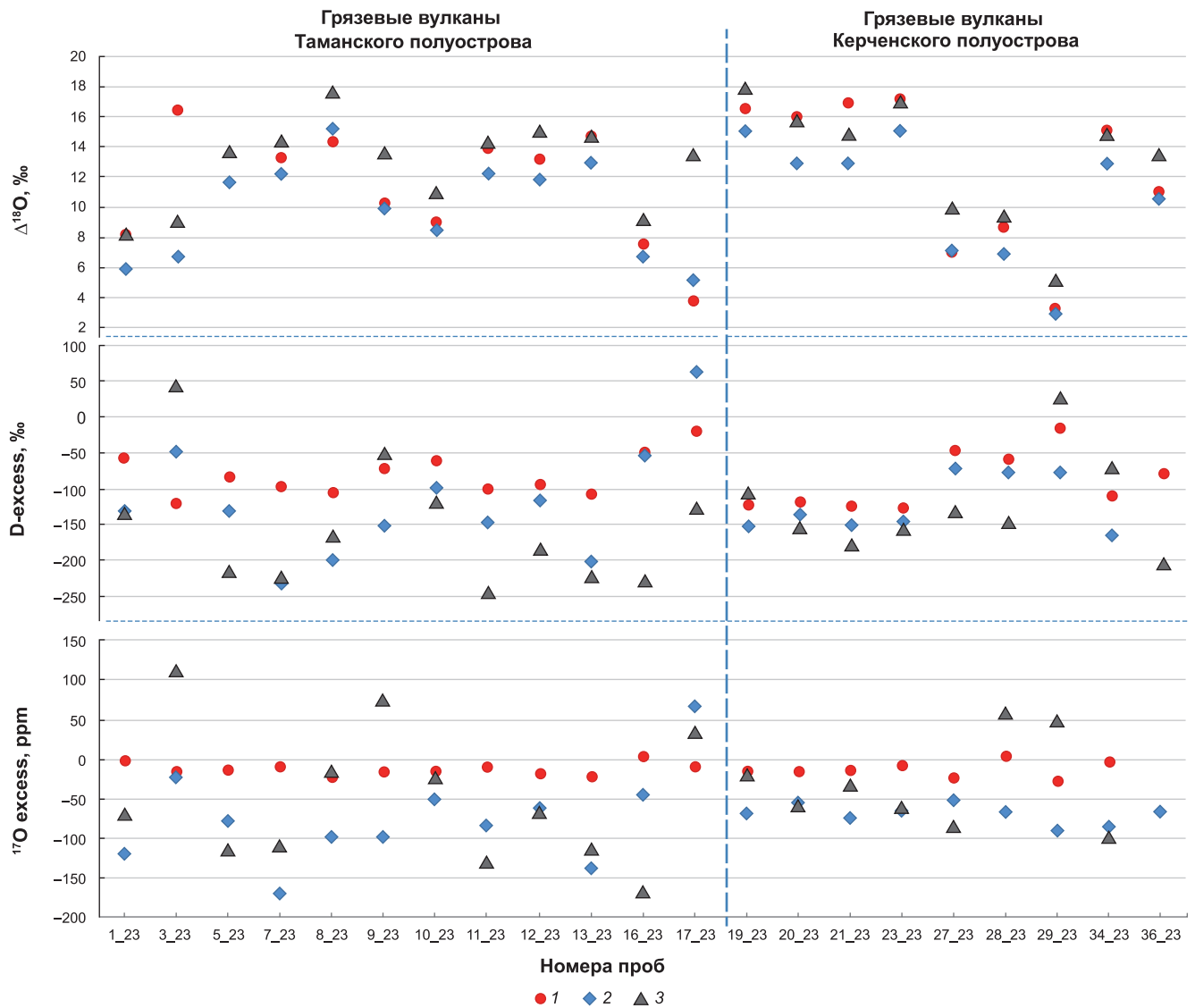


Рис. 6. Вариативность параметров  $\Delta^{18}\text{O}$ , D-excess и  $^{17}\text{O}$ -excess в разных типах экстрагированных вод индивидуальных образцов грязевулканической пульпы: 1 — свободная вода грязевых вулканов, 2 — вода, экстрагированная при 105 °С, 3 — вода, экстрагированная при 350 °С

свой наклон до 0,525, также обнаруживается положительная корреляция между параметрами  $^{17}\text{O}$ exс и D-ехс (рис. 8).

В целом, изотопный состав воды демонстрируют различные условия ее формирования, такие как температура и влажность. Таким образом, данные изотопного состава жидких и экстрагированных (смеси поровых и адсорбционных) вод свидетельствуют об их различном генезисе, что позволяет нам предполагать три источника воды в грязевулканических выбросах, а именно локальные морские воды современного или палео возраста, местные атмосферные осадки и адсорбционный комплекс глин. Наши данные поддерживают предположение, высказанное в работе Лаврушина с соавторами [Лаврушин и др., 2021], что на глубине 1–3 км, на которую погружаются исходно морские воды, происходит изотопное фракционирование седиментогенных палеовод в процессе подземного испарения, в результате данного процесса в грязевулканическом

очаге накапливаются воды с избытком кислорода и дейтерия.

На данном этапе исследования значимого вклада структурных вод, высвобождающихся при иллитизации смектита, не просматривается. Возможно, неочевидность вклада ОН-групп в изотопный состав изучаемых грязеваулканических вод, обусловлена смешанной изотопной характеристикой выделяемых нами вод. Для полного извлечения адсорбированной воды с поверхностей глинистых минералов, особенно смектитов, необходим прогрев пробы как минимум до 250 °С [Bauer, Vennemann, 2014; VanDeVelde, Bowen, 2013]. В то время как в присутствии таких межслоевых катионов как  $\text{K}^+$  и  $\text{Cs}^+$  температура прогрева значительно повышается и может достигать 500 °С [Kuligiewicz, Derkowski, 2017]. В нашем эксперименте подобной температуры прогрева достичь не удалось, поэтому мы считаем, что вся выделенная при экстрагировании вода являлась физически-связанной.

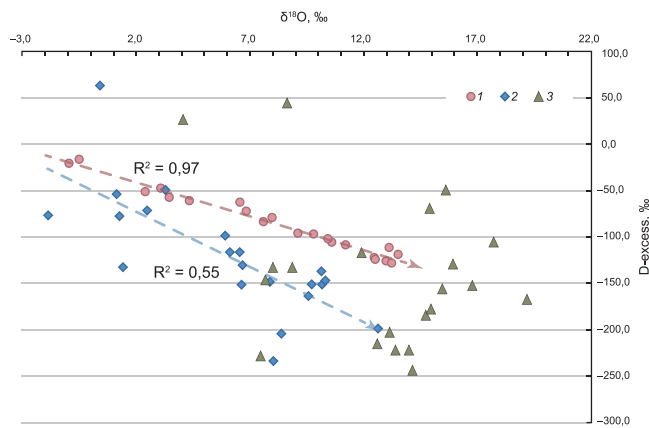


Рис. 7. Корреляционные связи  $\delta^{18}\text{O}$  в изучаемых водах от величины D-excess. Условные обозначения см. рис. 6

**Выводы.** Полученные данные показывают, что как минимум три генетических вида воды участвуют в составе свободной (водной) фазы грязевых вулканов: инфильтрационная (метеорная), морская вода (современная или палео-) и адсорбционная (физически-связанная). Прогрев образца глинистой пульпы до  $350^\circ\text{C}$  не вызывает структурную перестройку глинистых фаз и извлечения химически-связанной воды, однако, он способствует значительному фракционированию свободной и физически-связанной воды в процессе испарительного концентрирования. Инфильтрационная вода демонстрирует следы ис-

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алиев Ад.А., Гулиев И.С., Дадашев Ф.Г., Рахманов Р.Р. Атлас грязевых вулканов мира. Баку: Nafta-Press, 2015. 322 с.

Валяев Б.М., Гринченко Ю.И., Ерохин В.Е. и др. Изотопный облик газов грязевых вулканов // Литология и полезные ископаемые. 1985. № 1. С. 72–87.

Казак Е.С., Казак А.В., Родькина И.А. и др. Вода баженовской свиты. Опыт и результаты комплексных исследований. М.: ООО «Группа Ремедиум», 2023. 151 с.

Казак Е.С., Родькина И.А., Сорокоумова Я.В. Лабораторные методы определения содержания воды низкопроницаемых породах-коллекторах // Вест. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 6. С. 56–70.

Корсаков С.Г., Белуженко Е.В., Черных В.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200000. 2-е изд. Серия Кавказская. Объяснительная записка [Электронный ресурс] Минприроды России, Роснедра, ГНЦ ФГУП «Южморгеология», ФГУП «Кавказгеолсъемка». Электрон. текстовые дан. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021.

Лаврушин В.Ю., Айдаркожина А.С., Сокол Э.В. и др. Грязевулканические флюиды Керченско-Таманской области: геохимические реконструкции и региональные тренды. Сообщение 1. Геохимические особенности и генезис грязевулканических вод // Литология и полезные ископаемые. 2021. № 6. С. 485–512.

Лаврушин В.Ю., Дубинина Е.О., Авдеев А.С. Изотопный состав кислорода и водорода вод грязевых вулканов Тамани (Россия) и Кахетии (Восточная Грузия) // Литология и полезные ископаемые. 2005. № 2. С. 143–158.

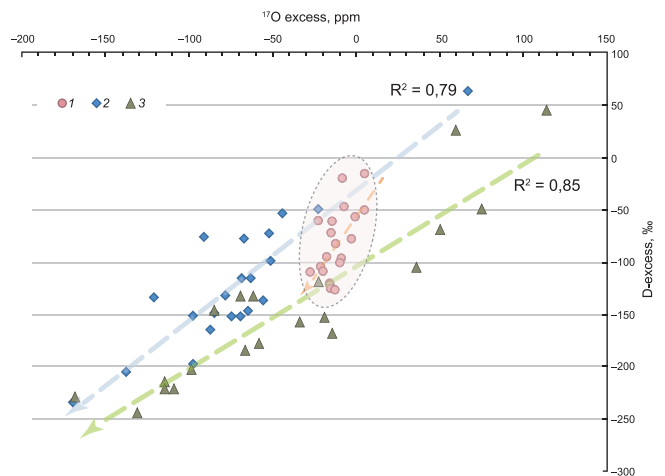


Рис. 8. Корреляционные связи между параметрами  $\Delta^{17}\text{O}$ -excess и D-excess для изученных вод. Условные обозначения см. рис. 6

парения, присутствующего в данных ландшафтах. Количество адсорбционной воды определяется типом глинистого вещества грязевой пульпы (иллит, смектит, каолинит). Соотношение инфильтрационной, морской и адсорбционной вод зависят от индивидуального строения вулкана, температуры прогрева исходного вещества и глубины корней вулкана.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках и при финансовой поддержке проекта РНФ 23-47-00035.

Лаврушин В.Ю., Конф А., Дейхле А., Степанец М.И. Изотопы бора и формирование грязевулканических флюидов Тамани (Россия) и Кахетии (Грузия) // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 2. С. 147–182.

Осипов В.И., Соколов В.Н. Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013, 576 с.

Попков В.И., Попков И.В. Структурно-тектонические предпосылки нефтегазоносности и возможные типы ловушек нефти и газа в складчато-орогенных зонах на примере Северо-Западного Кавказа // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12, № 2. С. 8.

Селецкий Ю.Б. Дегидратация глин как возможный фактор формирования изотопного состава глубоких подземных вод // Водные ресурсы. 1978. № 3. С. 148–152.

Селецкий Ю.Б. Дейтерий и кислород-18 в проблеме формирования вод грязевых вулканов // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1991. № 5. С. 133–138.

Челноков Г.А., Харитонова Н.А., Лаврушин В.Ю. и др. Редкоземельные элементы в водах грязевых вулканов Керченско-Таманской области // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 5. С. 58–71.

Шнюков Е.Ф., Соболевский Ю.В., Гнатенко Г.И. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманской области (атлас). Киев: Наукова Думка, 1986. 148 с.

Шнюков Е.Ф., Шереметев В.М., Маслаков Н.А. и др. Грязевые вулканы Керченско-Таманского региона. Краснодар: ГлавМедиа, 2005. 176 с.

Якубов А.А., Григорьянц Б.В., Алиев А.Д. и др. Грязевой вулканизм Советского Союза и его связь с нефтегазоносностью. Баку: ЭЛМ, 1980. 165 с.

- Aron P.G., Levin N.E., Beverly E.J., et al. Triple oxygen isotopes in the water cycle // *Chemical Geology*, V. 565, 2021, 120026, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.120026>.
- Bauer K.K., Vennemann T.W. Analytical methods for the measurement of hydrogen isotope composition and water content in clay minerals by TC/EA. *Chemical Geology*. 2014, 363, 229–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.039>
- Cases J.M., B'erend I., François M., et al. Mechanism of adsorption and desorption of water vapor by homoionic montmorillonite: 3. The Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup> and Ba<sup>2+</sup> exchanged forms // *Clay Clay Miner.* 1997. 45 (1), 8–22.
- Hubert F., Caner L., Meuner A., Ferrage E. Unraveling complex <2µm clay mineralogy from soils using X-ray diffraction profile modeling on particle-size sub-fractions: Implications for soil pedogenesis and reactivity // *American Mineralogist*. 2012. V. 97. P. 384–398.
- Emmerich K., Giaudo N., Schuhmann R., et al. On the Prediction of Water Contents in Na-Saturated Dioctahedral Smectites // *J. Phys. Chem. C*. 2018, 122(13), 7484–7493.
- Ferrage E., Lanson B., Michot J. L., Robert J.-L. Hydration properties and interlayer organization of water and ions in synthetic Na-smectite with tetrahedral layer charge. Part 1. Results from X-ray diffraction profile modeling // *J. Phys. Chem. C*. 2010, 114, 4515–4526.
- Kanik N.J., Longstaffe F.J., Kuligiewicz A., Derkowski A. Systematics of smectite hydrogen-isotope composition: Structural hydrogen versus adsorbed water // *Applied Clay Science*. 2022. 216. 106338. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.106338>
- Kazak E.S., Kazak A.V. A novel laboratory method for reliable water content determination of shale reservoir rocks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019, T. 106301.
- Kuligiewicz A., Derkowski A. Tightly bound water in smectites // *Am. Mineral.* 2017. 102 (5), 1073–1090.
- Nyamgerel Y., Han Y., Kim M., Koh D., Lee J. Review on Applications of <sup>17</sup>O in Hydrological Cycle // *Molecules*. 2021. 26. 4468. <https://doi.org/10.3390/molecules26154468>
- Srodo'n, J., McCarty, D.K. Surface area and layer charge of smectite from CEC and EGME/H<sub>2</sub>O-retention measurements // *Clay Miner.* 2008. 56 (2). 155–174.
- Surma J., Assonov S., Staubwasser M. Triple Oxygen Isotope Systematics in the Hydrologic Cycle // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2021. Vol. 86. P. 401–428, <http://dx.doi.org/10.2138/rmg.2021.86.12>
- VanDeVelde J.H., Bowen G.J. Effects of chemical pre-treatments on the hydrogen isotope composition of 2:1 clay minerals: Clay mineral isotope treatment effects. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 2013, 27(10), 1143–1148. <https://doi.org/10.1002/rcm.6554>
- Whittaker M. L., Shoaib M., Lammers L.N., et al. Smectite phase separation is driven by hydration-mediated interfacial charge // *J. Colloid Interface Sci.* 2023. 647. 406–420. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.05.085>

Статья поступила в редакцию 20.10.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 550.3

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-62-72

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАННЫХ ГЕОРАДАРНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ СКРИНИНГА СТВОЛОВ ДЕРЕВЬЕВ

Мария Сергеевна Судакова<sup>1</sup>✉, Евгения Борисовна Терентьева<sup>2</sup>,  
Иван Александрович Серёгин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; m.s.sudakova@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; genia\_teren@mail.ru

<sup>3</sup> Российский государственный аграрный университет — МСХА им. Тимирязева, Москва, Россия; seregin@mail.ru

**Аннотация.** Данное исследование посвящено актуальной проблеме неинвазивной диагностики стволов деревьев с использованием технологии георадарной томографии. Основная цель исследования — выявление динамических атрибутов в необработанных записях георадара, которые могут достоверно указывать на наличие гнили или воздушных полостей внутри стволов деревьев. Исследование основано на данных томографии, полученных от 22 крупномерных лиственных деревьев в Парке Горького в Москве. Предложенный атрибут «Произведение параметра поглощения на расстояние» эффективно различает здоровые и пораженные гнилью деревья. Для здоровых деревьев этот атрибут демонстрирует положительные значения, в то время как для пораженных или полых деревьев значения отрицательные. Полученные результаты открывают новые перспективы для неинвазивной диагностики городских деревьев и могут применяться при крупномасштабном скрининге зеленых насаждений.

**Ключевые слова:** георадиолокация, неразрушающий контроль, атрибутный анализ, мониторинг деревьев, стволовая гниль

**Для цитирования:** Судакова М.С., Терентьева Е.Б., Серёгин И.А. Анализ динамических характеристик данных георадарной томографии для скрининга стволов деревьев // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 62–72.

## ATTRIBUTE-BASED ANALYSIS OF GPR RAY-BASED TOMOGRAPHY DATA FOR TREE TRUNKS SCREENING

Mariya S. Sudakova<sup>1</sup>✉, Evgeniya B. Terentyeva<sup>2</sup>, Ivan A. Seregin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, m.s.sudakova@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; genia\_teren@mail.ru

<sup>3</sup> Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia; seregin@mail.ru

**Abstract.** This study addresses the actual issue of non-invasive tree trunk diagnostics using ground-penetrating radar (GPR) tomography. The primary objective is to identify dynamic attributes in non-processed GPR data that can reliably indicate the presence of rot or air holes within tree trunks. The study is based on tomography data obtained from 22 large trees in Gorky Park, Moscow. The proposed “attenuation multiply to distance” attribute effectively distinguishes between healthy and rot-affected trees. For healthy trees, this attribute exhibits positive values, while for rotted or hollow trees, the values are negative. The obtained results open new perspectives for non-invasive diagnostics of urban trees and can be applied to large-scale screening of green spaces.

**Keywords:** ground-penetrating radar, non-destructive testing, attribute analysis, tree monitoring, stem rot

**For citation:** Sudakova M.S., Terentyeva E.B., Seregin I.A. Attribute-based analysis of GPR ray-based tomography data for tree trunks screening. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 62–72. (In Russ.).

**Введение.** Зеленые насаждения дают множество преимуществ, среди которых охлаждение атмосферы и улучшение качества воздуха [Roy et al., 2012; Mullaney et al., 2015]. Присутствие деревьев в городах способствует расслаблению и снятию стресса, а исследования показывают, что вид зеленых насаждений снижает физиологическую реакцию на стресс [Ulrich, 1986; Schroeder, 1989].

Однако ослабленные и больные деревья могут угрожать благополучию городов, что вызывает озабоченность специалистов лесного хозяйства и муниципалитетов. В исследовании, проведенном в США,

было выяснено, что на долю травм, связанных с деревьями, приходится 4,16% случаев госпитализации [Nakakian et al., 2018]. Внезапное падение деревьев, как из-за штормов, так и самопроизвольное, приводит к человеческим жертвам и порче имущества, чаще всего транспортных средств [Weyrauch, Gill, 2021; Byard, 2024].

Статистика по Москве и Московской области показывает, что только лишь за первые дни мая 2025 г., согласно пресс-релизу правительства, в результате непогоды количество упавших деревьев превысило 2 тысячи [Порядка..., 2025]. К сожалению, оценить

общее количество падений деревьев в Москве и Московской области на практике сложно, так как сводка по всему региону требует агрегирования данных разных не связанных ведомств: падения деревьев во дворах — зона ответственности управляющих организаций, вдоль дорог — региональных дорожных служб, а в лесфонде — Минлесхоза. Но одно несомненно — в мире все шире обсуждается усиление опасностей, связанных с деревьями, в связи с изменением климата, что создает риски для общественной безопасности [Portoghesi, et al., 2023].

Падение и слом деревьев объясняется, в первую очередь, гнилью стволов и дефектами корневой системы [van Haaften et al., 2021, Shi et al., 2023], наклоном ствола и неправильной конфигурацией кроны [Tirpner et al., 2019]. Среди всех этих факторов стволовая гниль является критическим для разрушения деревьев, согласно работе [Heineman et al., 2015]. Стволовая гниль снижает плотность древесины и структурную целостность, делая деревья более восприимчивыми к факторам окружающей среды [Koltunov, 2019]. Причем дерево не обязательно вырубать, так как даже в случае выявления гнили возможно продление жизни дерева при ранней диагностике и принятии адекватных мер, что особенно важно для исторически значимых деревьев [Терентьева, 2020].

При наличии гнили, перед вырубкой необходимо оценить прочность ствола. Для решения этой задачи, а также для оценки рисков падения, используются формулы, основанные на использовании соотношений диаметров ствола и пустот [Kane et al., 2001; Mattheck, Breloer, 1998; dos Reis et al., 2022; и др.]. В качестве оценки зоны риска деревьев с гнилью берется диапазон потери прочности 20–44% и в случае превышения 44% дерево считается аварийным [Coder, 1989].

Для выявления стволовой гнили, а также оценки ее размеров, традиционно используется сверление. Однако, кернение обеспечивает прямой доступ к внутреннему состоянию древесины, следовательно, оно является инвазивным и может инициировать дальнейшие процессы гниения [Helliwell, 2007]. Также недостатками подхода является ограниченность только одним направлением, причем точная привязка координат отбираемого образца весьма затруднительна.

Ввиду исключительной важности оценки пространственных размеров пустот и гнили, на первый план выходят методы, способные решить задачу двумерной или трехмерной оценки размеров внутренних аномалий ствола. Для этого применяются акустическая томография [Arciniegas et al., 2014], электрическая томография [Martin, Gunther, 2013; Nagrey, 2006; Soge et al., 2019], микроволновые и георадарные методы, которые могут обнаружить гниение, не повреждая дерево [Goh et al., 2018]. Однако, по-настоящему неинвазивными методами являются только методы, использующие радиоволны.

Изучение пустот и гнили в стволах живых деревьев с помощью георадара включает в себя несколько методик и приемов, включая применение георадара с совмещенным излучателем и приемной антенной (профилирование) [Chen et al., 2021; Alani et al., 2019; Tosti et al., 2020], а также георадарную томографию с разнесенными излучателем и приемной антенной [Терентьева и др., 2020, Sudakova et al., 2021]. При этом наилучшие результаты в определении площади полости на срезе ствола дает комбинированный подход, включающий в себя и томографию и профилирование для построения начальной модели для томографического расчета [Sudakova et al., 2025].

При обследовании деревьев важна не только точность определения наличия гнили и ее размеров, но и длительность цикла получения и обработки данных. Как показала практика, ни одна из модификаций применения георадара для стволов деревьев не удовлетворяет двум критериям одновременно: профилирование с совмещенными источником и приемником делается быстро, но не дает точных результатов, а томография дает точный количественный результат, но полные трудозатраты на одно дерево составляют несколько часов, что неприемлемо для массовой оценки.

Существующая потребность в новом подходе к интерпретации данных георадара, полученных на стволах деревьев в модификации совмещенных антенн, находят свое отражение в современных работах. Так, в одной из работ был только намечен подход к использованию атрибутного анализа применительно к стволам деревьев [Parnow et al., 2024], хотя атрибутный анализ уже второе десятилетие используется применительно к данным GPR в гляциологии [Navarro et al., 2016], археологии [Chiang et al., 2012] и строительстве [Morris et al., 2019].

В данной работе мы хотим сосредоточиться на поиске динамических атрибутов (или атрибута) необработанной записи георадара, полученной по томографической методике, которые бы давали однозначный ответ на вопрос: присутствует ли в стволе дерева гниль или даже воздушная пустота. Это значительно сократит трудозатраты на полевые исследования и обработку данных, и станет основой методики быстрого выявления опасных деревьев. В дальнейшем, если это целесообразно, ствол дерева может быть исследован с помощью более сложных методов.

Как показала наша практика, существующий кинематический признак присутствия неоднородностей в стволе дерева — негиперболичность годографа прямой волны, может быть связан с функциональными изменениями влажности внутри ствола или с его формой, а не со стволовой гнилью.

Теоретически, в процессе распространения через гнилую, трухлявую древесину, и/или воздушную полость внутри дерева, сигнал претерпевает значительно большее затухание, чем при распространении через древесину здорового ствола. Это должно

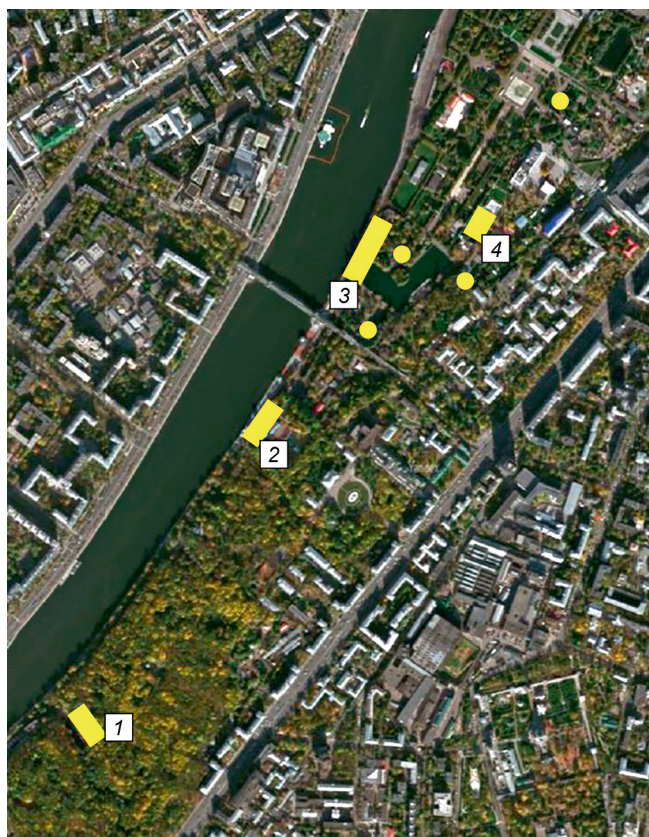


Рис. 1. Карта-схема территории пробоотбора (г. Москва): 1 — Екатерининский пруд парка им. Горького, 2 — театр Стаса Намина, 3 — Пушкинская набережная, 4 — фонтан «Девушка на буме»)

отразиться на его амплитудных и спектральных характеристиках.

При этом, в отличие от кинематических, динамические характеристики записи более подвержены влиянию таких факторов, как наличие шумов и помех, различие контакта антенн с поверхностью, неровность коры, интерференция различных волн, приповерхностные неоднородности и прочее.

Таким образом, для достижения цели выявления признака гнили на георадарной записи, необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать статистически независимые динамические атрибуты сигнала, прошедшего сквозь ствол дерева;
- выявить атрибут, позволяющий определить наличие или отсутствие стволовой гнили;
- определить число измерений, необходимых для получения устойчивого значения атрибута.

Материалом для данной работы послужили данные томографии, полученные летом 2024 г. в Парке имени Горького в Москве на 22 крупномерных лиственных деревьях. Все результаты были верифицированы прямыми методами: 20 стволов были прокернены с 2 сторон (северной и южной) на высоте исследования, 2 дерева были спилены.

**Объект исследования, аппаратура и методика.** Схема расположения участков с выделенными для исследования деревьями, показана на рис. 1. Все деревья были выбраны сотрудниками парка. Рас-

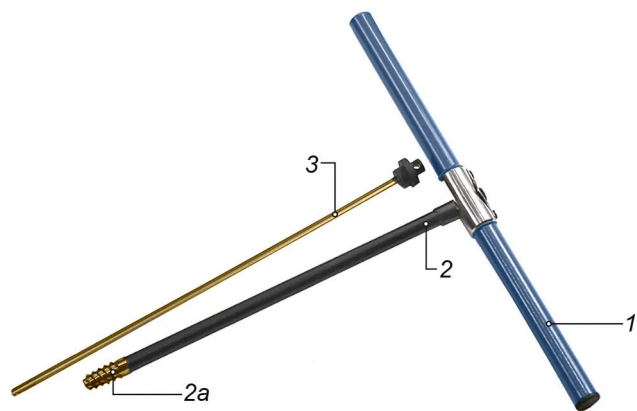


Рис. 2. Бурава: 1 — футляр, 2 — трубчатый корпус с хвостовиком (2a), 3 — экстрактор

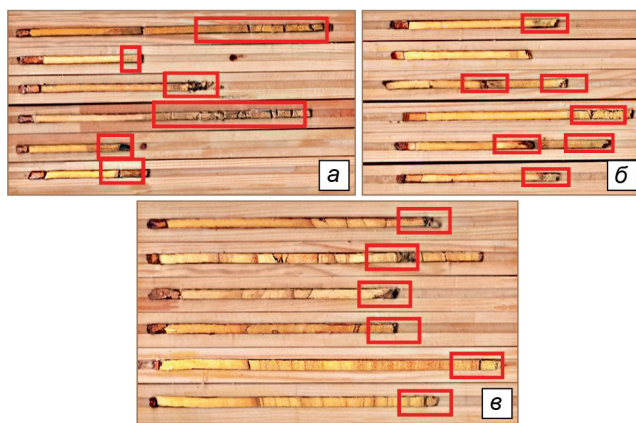


Рис. 3. Выявленные случаи отклонения: а — береза, б — липа, в — ива

пределение деревьев по видам и по радиусам стволов на высоте 140 см показано на рис. 4.

Под исследование были предоставлены следующие виды деревьев: Береза повислая (*Betula pendula*) — 3 дерева, Тополь черный (*Populus nigra*) — 4 дерева, Липа мелколистная (*Tilia cordata*) — 6 деревьев, Ива повислая (*Salix alba*) — 6 деревьев, Клен ясенелистный (*Acer negundo*) — 2 дерева. Визуально все деревья, кроме 2 лип, выглядят здоровыми.

В качестве контрольной проверки проводилось кернение с северной и южной сторон ствола дерева на высотах 60, 140 и 180 см. Отбор образцов осуществлялся с применением специализированного инструмента — буравы. Данный инструмент представляет собой футляр, трубчатый корпус с хвостовиком в виде шнека на конце и экстрактор — подложка, при помощи которой достают керн (рис. 2). Так как бурава позволяет получать керны до 35-ти см длиной, то радиус находился через уравнение окружности. Мощность древесины определялась с применением программного обеспечения «FiJi» с подключаемым плагином «ObjectJ».

По результатам кернения у одного дерева (береза, рис. 3, а) выявлена стволовая гниль, у трех деревьев (2 липы и 1 ива, рис. 3, б, в соответственно) воздушные полости внутри ствола, у всех тополей обнаружена сниженная плотность древесины ствола

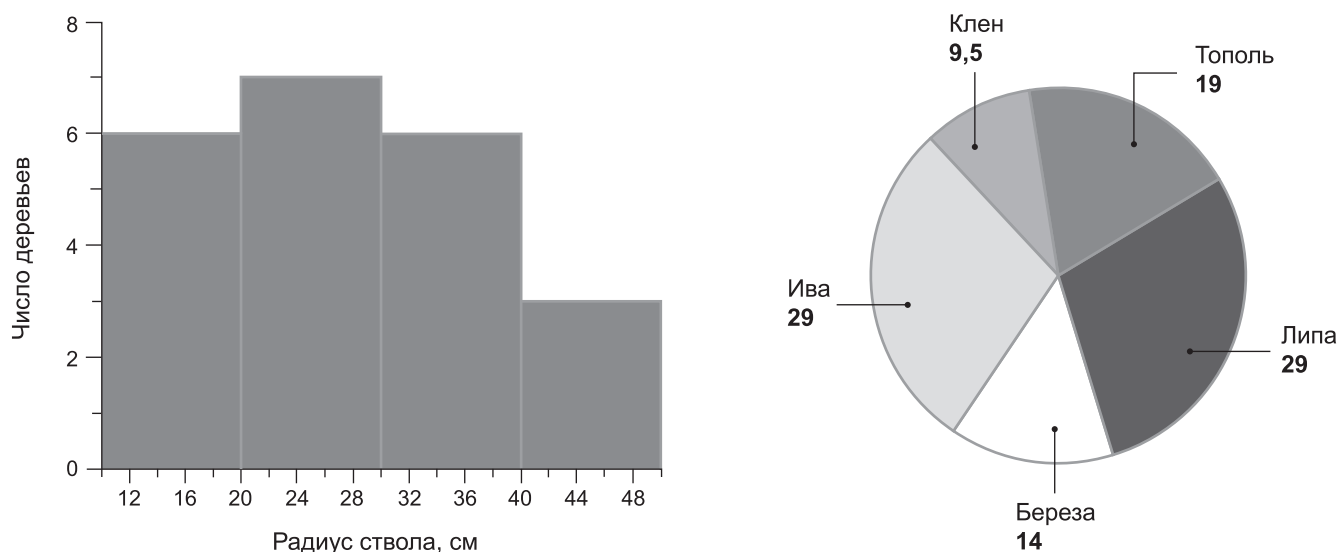


Рис. 4. Виды исследованных деревьев (а) и радиусы их стволов на высоте 140 см от дневной поверхности (б)

в сердцевине, 13 деревьев не имеют особенностей внутри ствола.

Диапазон радиусов стволов деревьев на высоте 140 см от земли составляет от 12 до 43 см (рис. 4). Из них деревьев с радиусом ствола от 10 до 20 см — 6 шт, от 20 до 30 см — 7 шт, от 30 до 40 см — 6 шт, от 40 до 50 см — 3 шт. Средний радиус ствола составил порядка 27 см.

Обследования деревьев проводились на высоте 140 см (рис. 5). Для обследования использовался георадар Zond-12e, антенны типа «бабочка». В качестве источника использовались антенна 1500 МГц, в качестве приемника — антенна 2000 МГц. Для двух тополей, радиус стволов которых составлял 35 и 41 см соответственно, в качестве источника использовалась антенна 900 МГц, в качестве приемника — антенна 1500 МГц.

В соответствии с томографической методикой, описанной в [Терентьева и др., 2020], шаг точек возбуждения составил 10 см, шаг точек приема после интерполяции составил 0,5 см. Привязка осуществлялась с помощью специальной мерной ленты, шаг привязки 10 см.

Излучающая и приемная антенны были ориентированы таким образом, чтобы оси диполей были параллельны друг другу и перпендикулярны направлению движения приемника.

**Анализ данных.** На рис. 6 представлены примеры данных георадарной томографии, полученных при исследовании стволов различных видов деревьев, находящихся в разных состояниях: береза, ива, липа, тополь. Данные подбирались таким образом, чтобы проиллюстрировать их вариативность.

Древесина лиственных пород в нормальном состоянии характеризуется скоростями порядка 6–8 см/нс, скорость в трухлявой древесине около 20 см/нс, скорость в воздухе 30 см/нс, а в гнилой древесине отличается от здоровой в 2 раза в меньшую сторону, т.е. составляет порядка 3,5–4 см/нс. Это позволяет выделить кинематические признаки



Рис. 5. Процесс работы с антеннами 1500 МГц (слева) и 2000 МГц (справа)

определения состояния ствола дерева по годографу волны, проходящей через ствол. Так, он будет гиперболической формы и не будет иметь значительных изломов, если древесина ствола в здоровом состоянии. Если внутри дерева труха или воздушная пустота, то форма годографа меняется (поднимается по центру). Если внутри дерева гниль (понижение влажности), то годограф волны будет «проседать» по центру радарограммы. Это проиллюстрировано на модельных и реальных данных в работе [Sudakova et al., 2025].

Однако, у этого правила существуют исключения, связанные как с формой ствола дерева, так и с внутренними особенностями его устройства (например, наличия вросших сучков). На рис. 6, а представлены данные, соответствующие вышеизложенным соображениям: ствол дерева без особенностей и годограф прямой волны имеет гиперболическую форму. На рис. 6, в, показаны данные, полученные на стволе дерева также без особенностей, однако, по центру годографа прямой волны видно «уплощение» годографа, что может говорить о возможном наличии трухлявости. Такой же кинематический признак (уменьшение времени прихода) виден на данных,

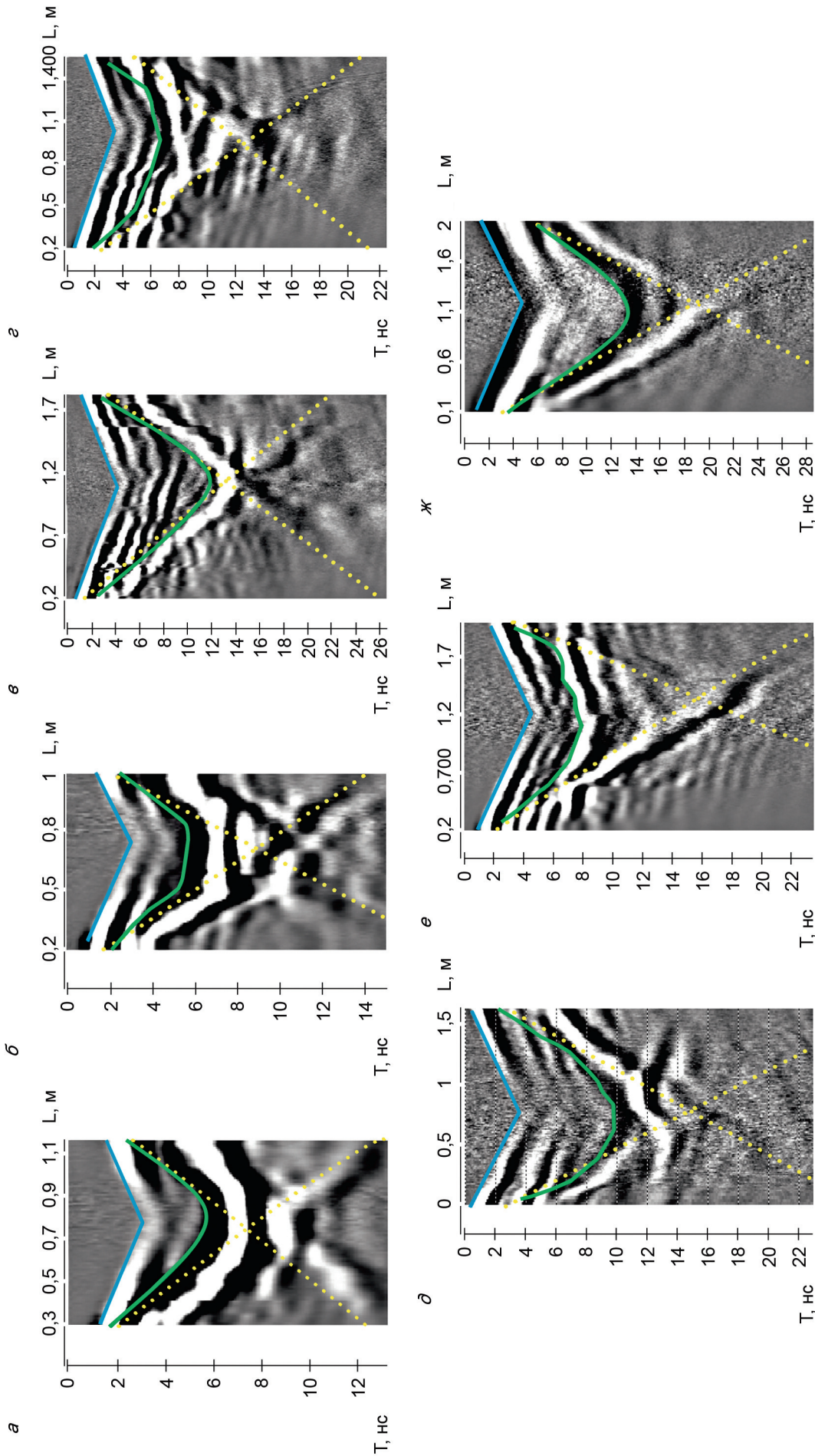


Рис. 6. Примеры данных георадарной томографии, полученных при исследовании стволов различных видов деревьев, находящихся в разных состояниях: *а* — береза здоровая, *б* — береза с выявленной гнилью внутри ствола, *в* — ива здоровая, *г* — ива с пустотой внутри ствола, *д* — липа здоровая, *е* — липа с пустотой внутри ствола, *ж* — тополь здоровый, выявлено уменьшение плотности древесины к сердцевине. Цветами показано: голубым — воздушная волна, желтым — прямая волна по коре вокруг ствола, зеленым — прямая волна через ствол. *Л* — расстояние между источником и приемником вдоль ствола, *м*, *Т* — время записи, *нс*

представленных на рис. 6, *з*, *е*, но это данные, полученные на стволах деревьев с подтвержденной воздушной пустотой.

Также на этих данных амплитуда волны видимо меньше, чем на данных, соответствующих здоровым деревьям (рис. 6, *а*, *в*), но видимое уменьшение амплитуды наблюдается и на рис. 6, *д*, *ж*, соответствующих стволам деревьев без выявленных гнили или трухлявости/пустоты. Причем годограф прямой волны на рис. 6, *ж*, имеет хорошо выраженную гиперболическую форму, но соответствует стволу тополя со сниженной плотностью в сердцевине, а годограф прямой волны на рис. 6, *д* соответствует стволу липы без особенностей, однако сам годограф имеет излом, природа которого не связана с негативными изменениями ствола.

Приведенные примеры иллюстрируют скорее исключительные случаи внутреннего устройства стволов деревьев (кроме рис. 6, *а*), однако, по ним становится понятно, что кинематические или хорошо видимые динамические признаки не могут быть достаточными для диагностики наличия или отсутствия гнили или пустоты внутри ствола во всех случаях.

Для поиска атрибута на данных георадиолокации, который бы с большой вероятностью позволял бы определить наличие каких-либо нежелательных дефектов внутри ствола, были рассчитаны значения следующих атрибутов волны, проходящей через ствол дерева (на рис. 6 показана зеленым цветом):  $A_{max}$  — максимальная амплитуда (по модулю) в окне,  $F_c$  — частота, отвечающая главному максимуму в спектре,  $BW$  — частотный диапазон (максимальная частота минус минимальная частота по уровню 0,5 от максимума спектра). Атрибуты рассчитывались в двух разных окнах: размер первого окна был равен одному видимому периоду сигнала, второго — полтора видимых периода. Для верификации результатов аналогичным образом рассчитывались атрибуты воздушной волны (на рис. 3 показана синим цветом). Расчет проходил в программе SeisPro 2025, с помощью модуля SSAA (Seismic Sequence Attribute Analysis — Сейсмический анализ атрибутов).

Далее были построены графики зависимости приведенных атрибутов от расстояния между источником и приемником во траектории вокруг ствола дерева. Примеры графиков приведены на рис. 7 (здоровый ствол дерева ива повислая) и рис. 8 (ствол ивы повислой, в котором была выявлена воздушная пустота). Графики зависимости амплитуды приведены в логарифмическом масштабе, графики спектральных характеристик — в линейном.

Наблюдается логарифмическая зависимость амплитуд волн от расстояния между источником и приемником. Были подобраны зависимости атрибута  $A_{max}$  от расстояния в экспоненциальном виде. Параметр затухания (степень при экспоненте,  $\beta$ ) отрицательный, что соответствует современным представлениям о физике распространения волн

в материальных средах, и позволяет считать построенные зависимости корректными.

Значения параметров  $F_c$  и  $BW$  имеют дискретный вид; закономерности их изменения с расстоянием не наблюдается. Появление аномально высоких значений для прямой волны на больших расстояниях свидетельствуют о том, что здесь соотношение сигнал/шум меньше 1, и рассчитанные в заданном окне значения соответствуют шумовой компоненте. Очевидно, качество данных не позволяет определять спектральные характеристики в окне в автоматическом режиме, и определенные таким образом спектральные атрибуты не могут быть приняты в дальнейшую работу. Поэтому в дальнейшем анализировался только атрибут максимальная абсолютная амплитуда в окне, точнее рассчитанный параметр затухания  $\beta$ .

Минимальные, максимальные, средние и медианные значения параметров затухания  $\beta$  разных волн, измеренные в разных окнах приведены в таблице. Значения, полученные в разных окнах, не отличаются друг от друга более чем на 20%. Положительные значения параметра затухания соответствуют деревьям с радиусами стволов меньше 10 см и являются результатом недостаточного расстояния между источником и приемником для получения адекватного результата.

Таблица

Минимальные, максимальные, средние и медианные значения параметров затухания  $\beta$  разных волн, измеренные в разных окнах

Тип волны	Воздушная		Прямая (здоровые стволы)		Прямая (больные стволы)		Прямая (тополя)	
	1·T	1,5·T	1·T	1,5·T	1·T	1,5·T	1·T	1,5·T
$\beta$ мин	-10,9	-8,3	-4,0	-3,3	-7,0	-6,9	-5,8	-5,7
$\beta$ макс	-3,4	-2,7	2,3	2,3	-3,1	-3,1	-2,1	-2,0
$\beta$ среднее	-6,3	-5,4	-0,5	-0,4	-4,9	-5,0	-4,0	-3,9
$\beta$ медиана	-6,3	-5,5	-0,4	-0,5	-4,8	-5,0	-3,7	-3,8

В среднем, значения параметра затухания для прямой волны, прошедшей через ствол деревьев с выявленными дефектами (гниль, пустоты и уменьшение плотности древесины) на порядок больше (около -5), чем значение параметра затухания для здоровых деревьев (около -0,5), что позволяет использовать этот атрибут для ранжирования стволов. Однако, диапазоны рассчитанного параметра поглощения для полностью здоровых стволов и стволов деревьев с особенностями перекрываются, что говорит о необходимости поиска нового атрибута.

В качестве атрибута, который более однозначно показывал бы наличие или отсутствие проблемных участков внутри ствола, рассматривалось значение максимальной абсолютной амплитуды в окне, равном одному периоду, умноженное на расстояние между источником и приемником напрямую  $\beta(A_{max} \cdot D)$ .

Примеры графиков полученных зависимостей приведены на рис. 9. В итоге, для всех деревьев,

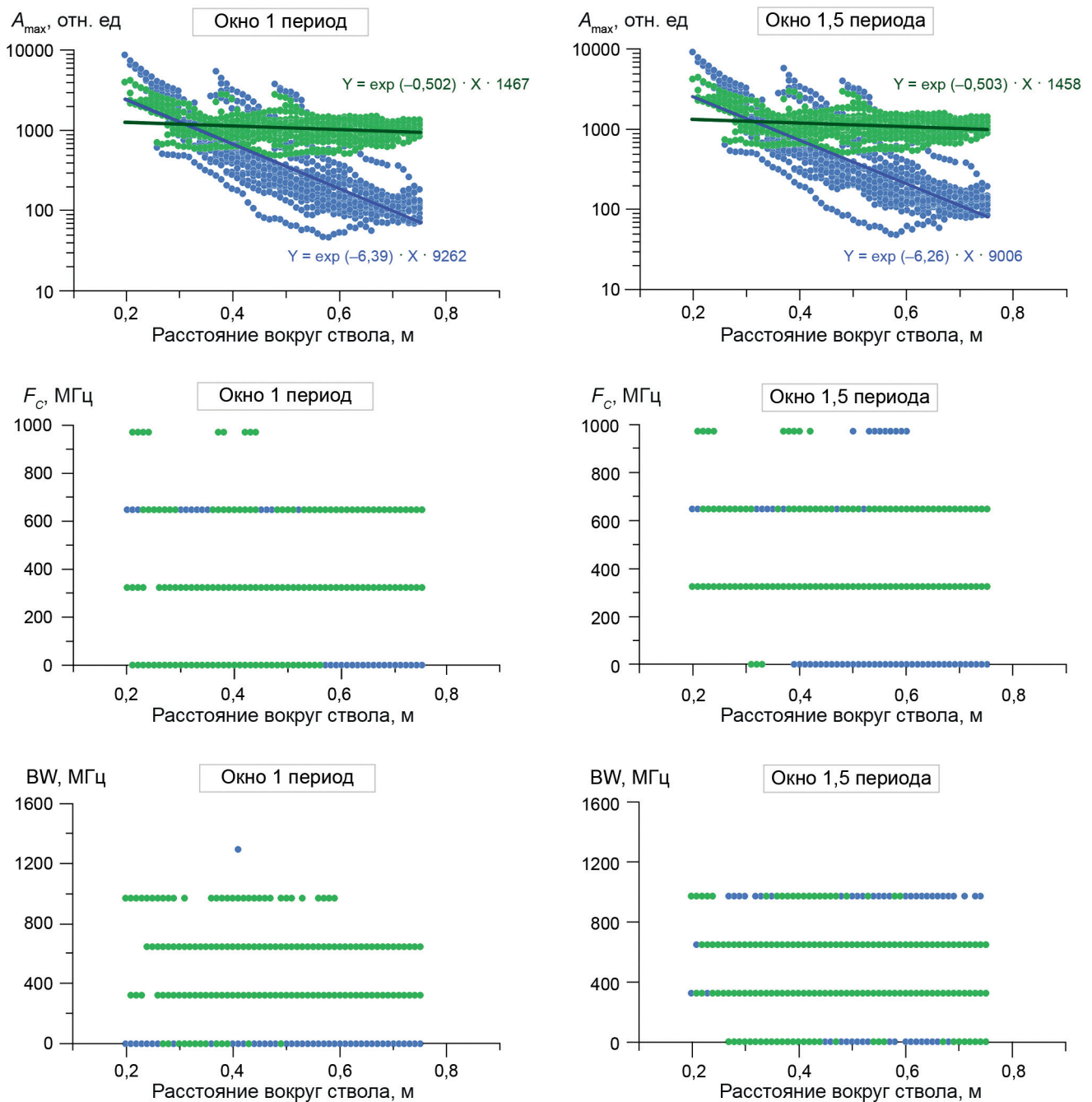


Рис. 7. Графики зависимости атрибутов воздушной и прямой волн от расстояния между источником и приемником по траектории вокруг здорового ствола ивы повислой:  $A_{\max}$  — максимальная абсолютная амплитуда (а),  $F_c$  — частота максимума спектра (б),  $BW$  — частотный диапазон (в)

в стволах которых не было выявлено каких-либо особенностей, параметр  $\beta(A_{\max} \cdot D)$ , посчитанный для всех положений источников и приемников, был больше 0; а для деревьев с выявленной гнилью, пустотой или уменьшением плотности к сердцевине — ниже нуля. То есть, данный атрибут, посчитанный для всех положений источников и приемников согласно методике, позволяет однозначно отличить здоровый ствол дерева.

Для выяснения, какого числа положений источников достаточно для получения такого результата, параметр  $\beta(A_{\max} \cdot D)$  был рассчитан для всех данных,

полученных при одном положении источника. Результаты приведены в следующем разделе.

**Результаты.** Значения атрибута  $\beta(A_{\max} \cdot D)$  для всех деревьев представлены на рис. 10. Кружками показаны значения, полученные для всех положений источников и приемников. Планками показаны предельные значения, полученные для ситуации одного обхода. Цветом показан результат кернения: зеленый — здоровая древесина, красный — выявлена пустота, синий — выявлена гниль, белый — тополь (выявлено уменьшение плотности к сердцевине).

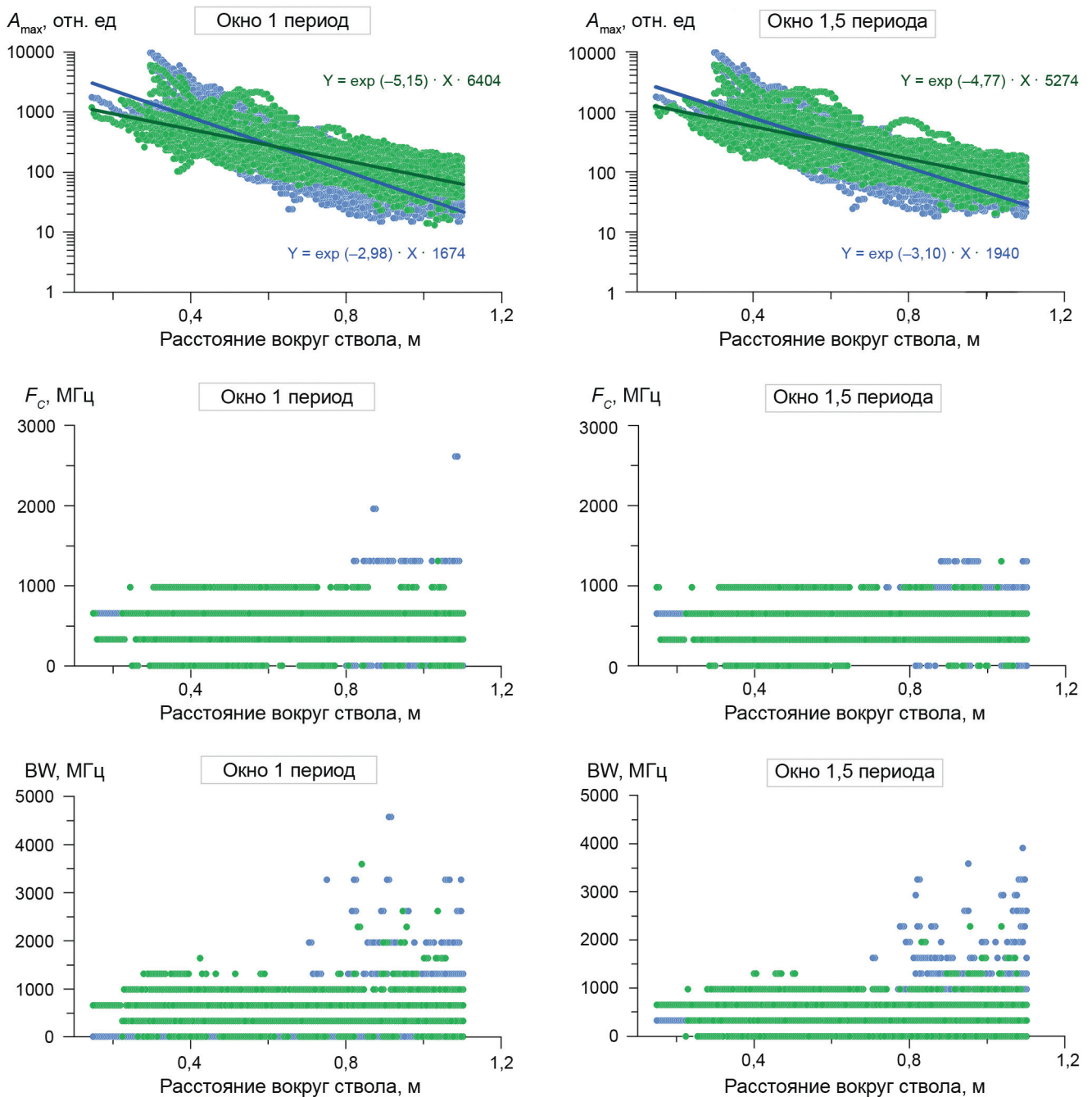


Рис. 8. Графики зависимости атрибутов воздушной и прямой волн от расстояния между источником и приемником по траектории вокруг большого ствола ивы повислой:  $A_{max}$  — максимальная абсолютная амплитуда ( $a$ ),  $F_c$  — частота максимума спектра ( $b$ ), BW — частотный диапазон ( $\theta$ )

Почти все здоровые деревья, за исключением одного, имеют стволы радиусом меньше 30 см. Это частично объясняется непосредственной связью между возрастом дерева, толщиной его ствола, и подверженности болезням [Fu, et al., 2024].

Для всех деревьев со здоровыми стволами значения атрибута  $\beta(A_{max}; D)$  для всех точек измерений больше нуля, для 9 деревьев из 12 этот результат сохраняется и для всех одиночных проходов. Среднее значение числа проходов для всех деревьев с положительным значением атрибута составляет порядка 90%.

Для всех деревьев с выявленными воздушными полостями значения атрибута  $\beta(A_{max}; D)$  меньше нуля и это значение получено для всех одиночных атрибутов. Для березы с выявленной внутренней гнилью значение атрибута  $\beta(A_{max}; D)$ , рассчитанного для всех положений источников и приемников, также отрицательно, однако такое значение получено только для 15 из 20 проходов (75%).

Для трех тополей из 5 значение атрибута  $\beta(A_{max}; D)$ , рассчитанного для всех точек измерений, также отрицательно, однако оно может быть другого знака при одиночных проходах. Среднее значение

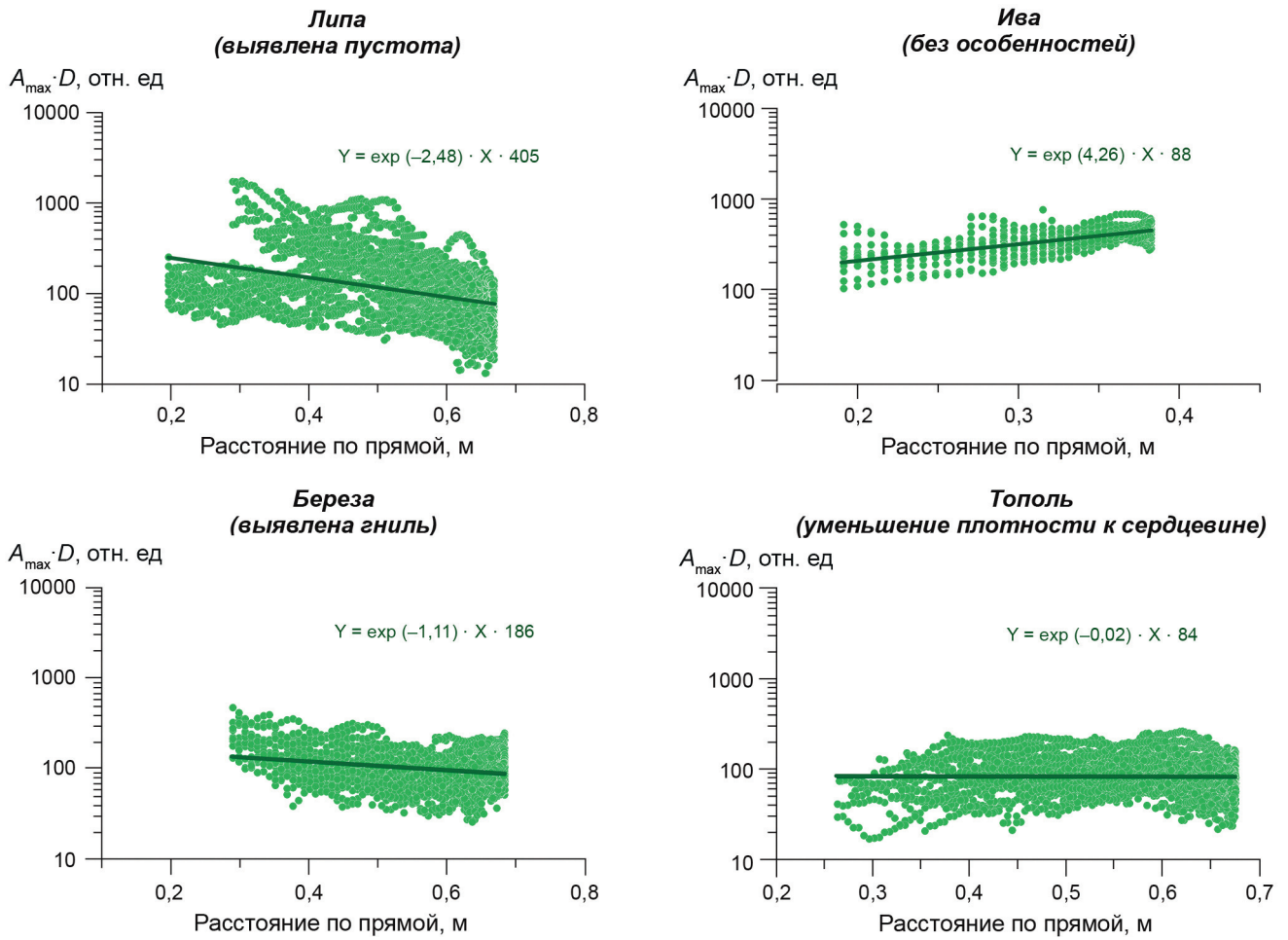


Рис. 9. Графики зависимости максимальной абсолютной амплитуды в окне, равном одному периоду, умноженной на расстояние между источником и приемником напрямую ( $A_{\max} \cdot D$ ) от расстояния между источником и приемником напрямую ( $D$ )

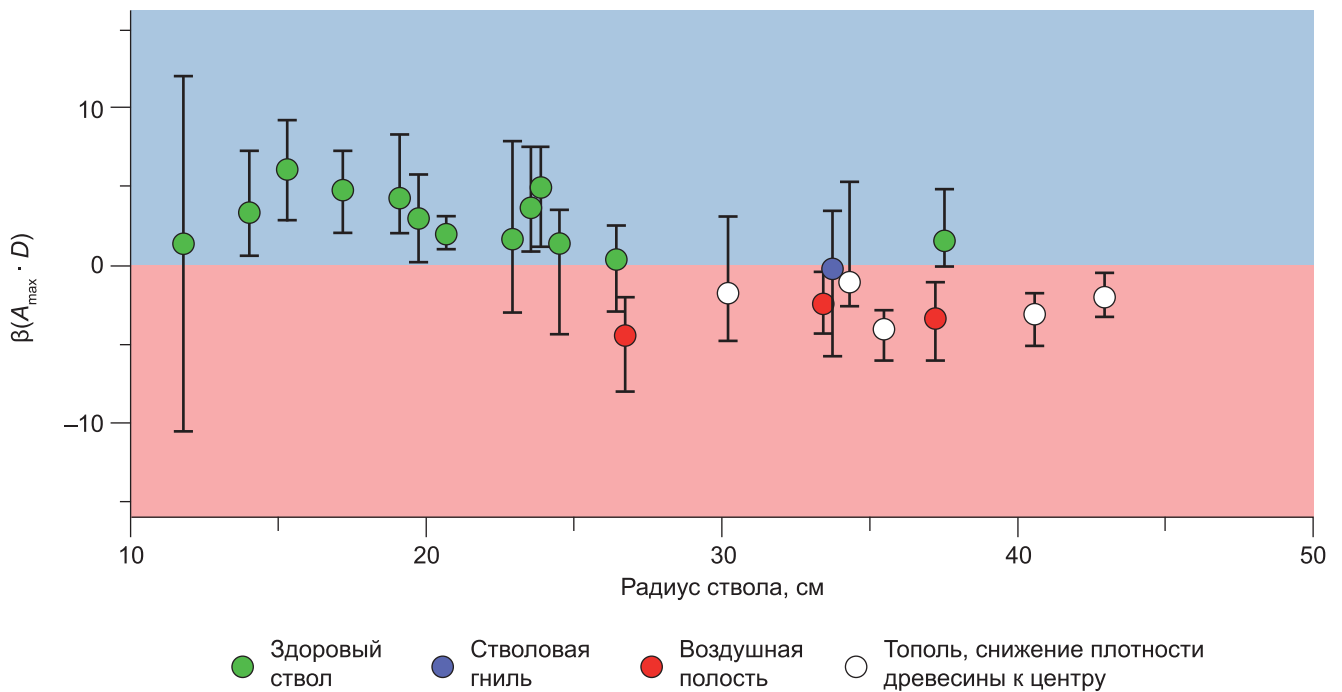


Рис. 10. Степень экспоненты зависимости амплитуды прямой волны от расстояния между источником и приемником для стволов деревьев разной толщины. Кружком показано значение, полученное для всех положений источников и приемников. Линиями показаны предельные значения, полученные для ситуации одного обхода

числа проходов для всех тополей с отрицательным значением атрибута составляет порядка 85%.

**Выводы.** В данной работе анализировались атрибуты записи георадарной томографии: центральная частота, полоса пропускания и максимальная абсолютная амплитуда.

Результаты показали, что спектральные атрибуты не могут быть приняты в дальнейшую работу, так как качество данных не позволяет адекватно определять спектральные характеристики сигналов на необработанных записях в окне в автоматическом режиме.

Из атрибута максимальная амплитуда в окне, равном одному периоду сигнала, были рассчитаны значения параметра затухания для прямой волны, прошедшей через ствол деревьев с выявленными дефектами (гниль, пустоты и уменьшение плотности древесины) на порядок больше (около  $-5$ ), чем значение параметра затухания для здоровых деревьев (около  $-0,5$ ), что позволяет использовать этот атрибут для ранжирования стволов. Однако, диапазоны рассчитанного параметра поглощения для полностью здоровых стволов и стволов деревьев с особенностями перекрываются, поэтому был рассмотрен атрибут значение максимальной

абсолютной амплитуды в окне, равном одному периоду, умноженное на расстояние между источником и приемником напрямую  $\beta(A_{\max} D)$ .

Результаты исследования показали, что значения атрибута  $\beta(A_{\max} D)$ , рассчитанные для всех положений источников и приемников, однозначно свидетельствуют об отсутствии дефектов внутри ствола дерева. В случае одного прохода вокруг ствола здорового дерева вероятность положительного значения атрибута  $\beta(A_{\max} D)$  составляет порядка 90%.

Отрицательные значения атрибута  $\beta(A_{\max} D)$ , рассчитанные для всех положений источников и приемников, соответствуют стволам деревьев с выявленными дефектами по кернению. Причем, это могут быть как и терминальные дефекты (гниль, воздушная полость), так и дефекты, соответствующие живой древесине (уменьшение плотности к центру). Полученное для одного прохода отрицательное значение, не может однозначно свидетельствовать о наличии дефекта внутри ствола дерева.

Таким образом, в случае получения отрицательного значения атрибута  $\beta(A_{\max} D)$  на полевой записи одиночного прохода рекомендуется проведение полного цикла георадарной томографии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Порядка 2 тыс. поваленных деревьев ликвидировали в Подмосковье за сутки // Новости Подмосковья. 3 мая 2025 г. 14:35. <https://mosreg.ru/sobytiya/novosti/news-submoscow/poryadka-2-tys-povalennykh-derevev-likvidirovano-v-podmoskove-za-sutki> (дата обращения: 24.12.2025).

Темнухин В.Б. Как лечить раны у деревьев. Методическое пособие. Н. Новгород: НОСЭОО «Зеленый мир», 2019. 28 с.

Терентьева Е.Б., Судакова М.С., Калашиников А.Ю. Опыт применения георадарной томографии при изучении стволов деревьев // Лесоведение. 2020. № 3. С. 274–286.

Alani A.M., Soldovieri F., Catapano I., et al. The use of ground penetrating radar and microwave tomography for the detection of decay and cavities in tree trunks // Remote Sens. 2019. Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/rs11182073>.

Arciniegas A., Prieto F., Brancheriau L., et al. Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees // Trees. 2014. Vol. 28. P. 1559–1567.

Butnor J.R., Doolittle J.A., Kress L., et al. Use of groundpenetrating radar to study tree roots in the southeastern United States // Tree Physiol. 2001. Vol. 21. P. 1269–1278.

Byard R.W. Tree failure — A natural phenomenon with forensic implications // Forensic Sci. Med. Pathol. 2024. Vol. 31. P. 624–627.

Chen S.L., Liu S.T., Lin C.H., Liu C.C. Application of ground-penetrating radar for living trees detection // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 706 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/706/1/012008>.

Coder K.D. Should you or shouldn't you fill tree hollows? // Grounds Maint. 1989. Vol. 24(9). P. 68–70.

dos Reis M.N., Gonçalves R., Brazolin S., de Assis Palma S.S. Strength loss inference due to decay or cavities in tree trunks using tomographic imaging data applied to equations proposed in the literature // Forests. 2022. Vol. 13. <https://doi.org/10.3390/f13040596>

Fu Q., Qiu E., Zhang Y., et al. Mechanisms of trunk cavity formation of large old trees in urban landscapes: A case study

on four tree species in Beijing // Ecological Indicators. 2024. Vol. 158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111388>.

Hagrey A.S. Electrical resistivity imaging of tree trunks // Near Surface Geophysics. 2006. Vol. 4. № 3. P. 179–187.

Hakakian D., Del Rosario A.G., Bogdanovski D.A., et al. Analysis of injury patterns due to tree-related trauma // Am. Surg. 2018. Vol. 84 (9). P. 407–410.

Heineman K.D., Russo S.E., Baillie I.C., et al. Evaluation of stem rot in 339 Bornean tree species: implications of size, taxonomy, and soil-related variation for aboveground biomass estimates // Biogeosciences. 2015. Vol. 12. P. 5735–5751.

Helliwell D.R. A short note on effects of boring holes in trees // Arboricult. J. 2007. Vol. 30 (3). P. 245–248.

Goh C.L., Abdul Rahim R., Fazalul Rahiman M.H., et al. Sensing wood decay in standing trees: A review // Sensors Actuators A Phys. 2018. Vol. 269. P. 276–282.

Kane B., Ryan D., Bloniarz D.V. Comparing Formulas that assess strength loss due to decay in trees // J. Arboric. 2001. Vol. 27. P. 78–86.

Koltunov E.V. Features of the stem and root rot distribution in urban woody plants and forest parks // Forests of Russia and economy in them. Ural State Forestry University. 2019. № 2 (69). P. 37–44.

Martin T., Gunther T. Complex resistivity tomography for fungus detection on standing oak trees // Eur. J. For. Res. 2013. Vol. 132 (5–6). P. 765–766.

Mattheck C., Breloer H. The body language of trees: a handbook for failure analysis. The Stationery Office. London, England, 1998. 240 p.

Morris I., Abdel-Jaber H., Glisic B. Quantitative attribute analyses with GPR for concrete characterization // Sensors. 2019. Vol. 11. doi:10.3390/s19071637.

Mullaney J., Lucke T., Trueman S.J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments // Landsc. Urban Plan. 2015. Vol. 134. P. 157–166.

*Parnow S., Lantini L., Uzor S., Tosti F.* Enhancing Tree Management Practices by Extracting GPR Attributes for the Evaluation of Tree Trunk Internal Structures // EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, EGU24-11475, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-11475>.

*Portoghesi L., Masini E., Tomao A., Agrimi M.* Could climate change and urban growth make Europeans regard urban trees as an additional source of danger // *Front. For. Glob. Chang.* 2023. Vol. 6. P. 1–12.

*Roy S., Byrne J., Pickering C.* A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones // *Urban For. Urban Green.* 2012. Vol. 11 (4). P. 351–363.

*Schroeder H.W., Zube E.H., Moore G.T.* Environment, behaviour, and design research on urban forests // *Adv. Environ. Behav. Des.* 1989. P. 87–117.

*Shi F., Meng Q., Pan L., Wang J.* Root damage of street trees in urban environments: An overview of its hazards, causes, and prevention and control measures // *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166728>.

*Soge A.O., Popoola O.I., Adetoyinbo A.A.* A four-point electrical resistivity method for detecting wood decay and hollows in living trees // *European Journal of Wood and Wood Products.* 2019. Vol. 77. P. 465–474.

*Sudakova M., Terentyeva E., Kalashnikov A.* Assessment of health status of tree trunks using ground penetrating radar tomography // *AIMS Geosci.* 2021. Vol. 7. P.162–179.

*Sudakova M.S., Terentyeva E.B., Soldatenko A.M., et al.* Determining the size of internal air cavities in linden (*Tilia Europaea*) trunks via ground penetrating radar // *Journal of Applied Geophysics.* 2025. Vol. 240. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2025.105761>.

*Tippner J., Praus L., Brabec M., Sebera V., et al.* Using 3D digital image correlation in an identification of defects of trees subjected to bending // *Urban For. Urban Green.* 2019. Vol. 46. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126513>.

*Tosti F., Gennarelli G., Lantini L., et al.* Assessing the Internal Structure of Hollow Trees Using GPR and Microwave Tomography // 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Milan, Italy, 2020, P. 453–456. doi: 10.1109/TSP49548.2020.9163459.2020.

*Ulrich R.S.* Human responses to vegetation and landscapes // *Landsc. Urban Plan.* 1986. Vol. 13. P. 29–44.

*van Haaften M., Liu Y., Wang Y., et al.* Understanding tree failure—A systematic review and meta-analysis // *PLoS One.* 2021. Vol. 16 (2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246805>.

*Weyrauch D., Gill J.R.* Accidental deaths involving trees: professional and nonprofessional woodcutting and tree failures with autopsy findings // *Am. J Forensic Med Pathol.* 2021. Vol. 42 (4), P. 350–353.

Статья поступила в редакцию 29.10.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 550.8.01: 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-73-85

## ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ

Кирилл Владимирович Сыромятников<sup>1</sup>✉, Михаил Аркадьевич Левитан<sup>2</sup>, Александр Сергеевич Ульянов<sup>3</sup>, Руслан Рустемович Габдуллин<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; sykirv@gmail.com ✉, <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8798-4425>

<sup>2</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; m-levitan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0012-3708>

<sup>3</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия; uleg85@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова; Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия; gabdullin@geokhi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

**Аннотация.** В статье представлены результаты литолого-геохимического анализа донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. На основании анализа геохимического и гранулометрического состава, соотношений элементов (Si/Al, Ti/Al, Fe+Ti, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni)), содержания органического углерода и метана (CH<sub>4</sub>) проведено районирование исследуемой акватории на четыре литолого-геохимические зоны. В результате проведения однофакторного дисперсионного и одномерного регрессионного анализов установлены связи между глубиной моря и геохимическими показателями. Выявлено влияние редокс-условий на процессы седиментации. Особое внимание уделено анализу условий анаэробного осадконакопления, и распределения органического вещества в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

**Ключевые слова:** Восточно-Сибирское море, шельф, донные осадки, современные осадки, литолого-геохимический анализ, геохимическое районирование, органический углерод, метан, терригенный материал, окислительно-восстановительные условия, анаэробность осадков, V/(V+Ni), дисперсионный анализ, регрессионный анализ

**Для цитирования:** Сыромятников К.В., Левитан М.А., Ульянов А.С., Габдуллин Р.Р. Литолого-геохимическая зональность донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 73–85.

## LITHOLOGIC AND GEOCHEMICAL ZONALITY OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE SOUTHEASTERN PART OF THE EAST SIBERIAN SEA

Kirill V. Syromyatnikov<sup>1</sup>✉, Mikhail A. Levitan<sup>2</sup>, Alexander S. Ulyantsev<sup>2</sup>, Ruslan R. Gabdullin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; sykirv@gmail.com ✉

<sup>2</sup> Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; m-levitan@mail.ru

<sup>3</sup> Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia; uleg85@gmail.com

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University; Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia; gabdullin@geokhi.ru

**Abstract.** The article presents the results of lithological and geochemical analysis of bottom sediments in the southeastern part of the East Siberian Sea. Based on the analysis of geochemical and granulometric composition, element ratios (Si/Al, Ti/Al, Fe+Ti, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni)), organic carbon and methane (CH<sub>4</sub>) content, the studied water area was divided into four lithological and geochemical zones. As a result of single-factor dispersion and one-dimensional regression analyses, correlations between sea depth and geochemical indicators were established. The influence of redox conditions on sedimentation processes was revealed. Particular attention was paid to the analysis of anaerobic sedimentation conditions and the distribution of organic matter in bottom sediments in the southeastern part of the East Siberian Sea.

**Keywords:** East Siberian Sea, shelf, bottom sediments, modern sediments, lithological and geochemical analysis, geochemical zoning, organic carbon, methane, terrigenous material, redox conditions, sediment anaerobicity, V/(V+Ni), analysis of variance, regression analysis

**For citation:** Syromyatnikov K.V., Levitan M.A., Ulyantsev A.S., Gabdullin R.R. Lithologic and geochemical zonality of bottom sediments of the southeastern part of the East Siberian Sea. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 73–85. (In Russ.).

**Введение.** Несмотря на многочисленные проведенные исследования [Пресов, Обжиров и др., 2009; Шакиров, Сорочинская и др., 2013; Левитан, Сы-

ромятников и др., 2014; Мирошников, Флинт и др., 2020; Ульянов, Чаркин, Семин и др., 2021; Швалова, Зарубина, 2022; Ульянов, Стрельцова, Чаркин, 2024;

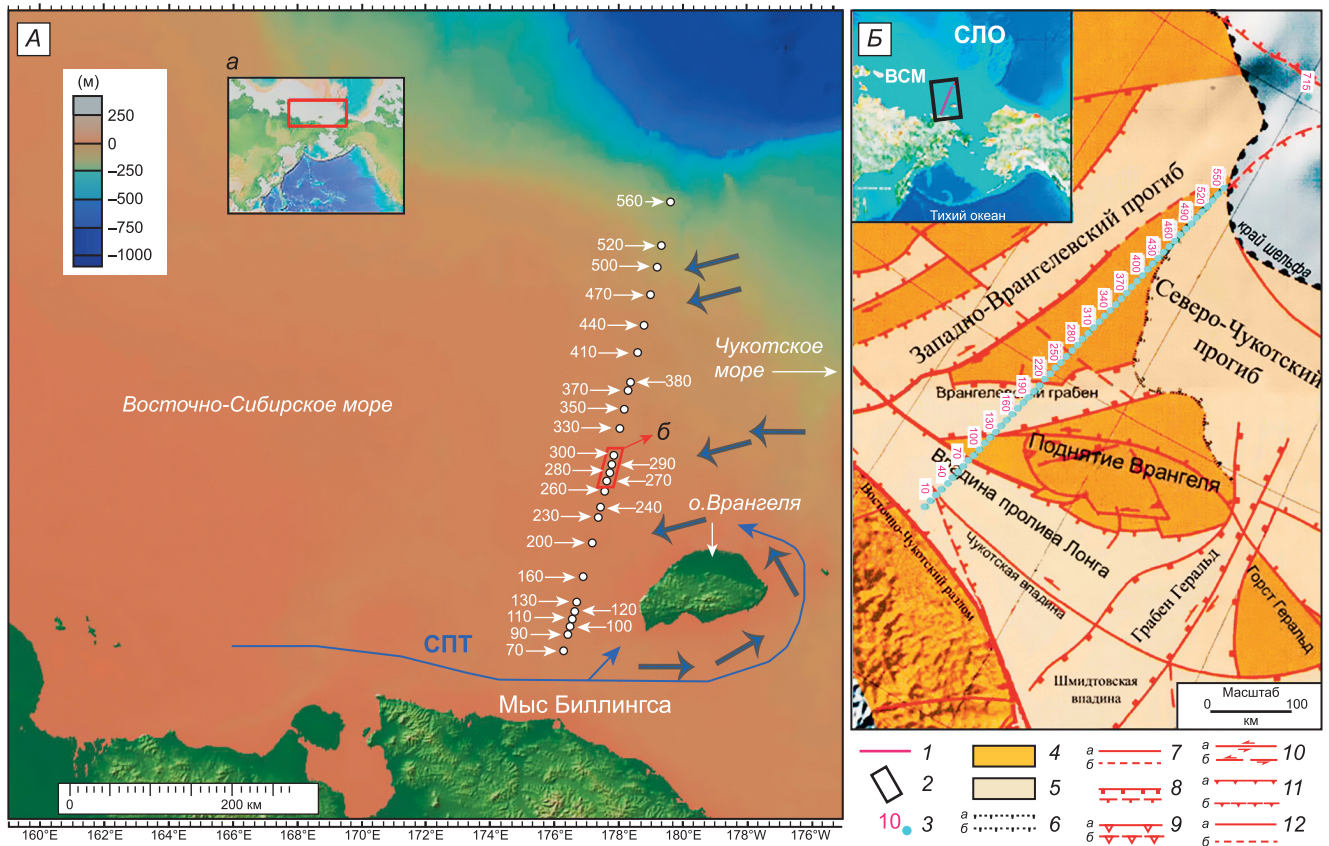


Рис. 1. А. Обзорная карта района исследования с положением пикетов опробования [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]: а — расположение меридионального профиля от мыса Биллингса к хребту Менделеева; б — красным выделены станции, где были зарегистрированы повышенные содержания метана [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]. Б. Регион исследований. Положение станций отбора донных осадков Восточно-Сибирского моря на карте неотектонических структур, выраженных в рельефе арктического шельфа по [Неотектонические ..., 2004] с изменениями. Синими стрелками показана циркуляция поверхностных течений по данным [Атлас океанов..., 1980; Маслов, 2021]. СПТ — Сибирское прибрежное течение [Маслов, 2021]. Условные обозначения: 1 — профиль работ 2008 г.; 2 — полигон работ; 3 — пикеты опробования; 4 — поднятия и горсты; 5 — впадины, грабены, рампы; 6 — границы достоверные — (а), предполагаемые — (б) (штрихи направлены в сторону впадин). Активные разломы: (главные разломы показаны утолщенными линиями): 7 — достоверные (а), предполагаемые (б); 8 — сбросы (штрихи на опущенном крыле); 9 — взбросы (треугольники на приподнятом крыле) достоверные (а), предполагаемые (б); 10 — сдвиги (стрелками показано направление смещения) достоверные (а), предполагаемые (б); 11 — неустановленного типа (штрихи на опущенном крыле) достоверные (а), предполагаемые (б); 12 — без установленного смещения достоверные (а), предполагаемые (б). СЛО — Северный Ледовитый океан. ВСМ — Восточно-Сибирское море

Rachold, 1999; Viscosi-Shirley, Mammone et al., 2003], Восточно-Сибирское море является одной из наименее изученных акваторий Арктического региона. Геохимические характеристики осадков пока исследованы в недостаточной мере.

Восточно-Сибирское море — окраинное море Северного Ледовитого океана, расположенное между островом Врангеля и Новосибирскими островами. Площадь составляет около 945 тыс. км<sup>2</sup>. Море связано проливами с Чукотским морем и морем Лаптевых. Восточно-Сибирское море лежит на шельфе. Глубина в восточной части моря не превышает 54 м, а в западной и центральной до 20 м, к северу глубины возрастают до 200 м. Западное и центральное побережья плоские, представлены чередующимися термо-абразионными и аккумулятивными участками. Восточная часть характеризуется выходами Чукотского нагорья и скалистыми обрывами, высота которых на о. Врангеля достигает 400 м. На побережье расположены крупные низменности

(Яно-Индибирская, Нижне-Колымская) и заливы (в т.ч. Колымская и Чаунская губы) [Data Access Viewer, 2025].

Гидрологический режим определяется многолетним ледовым покровом, сохраняющимся почти весь год. В восточной части до 10 месяцев в году сохраняется ледовый покров и южная граница льдов проходит совсем близко к берегу. Основные реки — Индибирка, Алазея, Колыма. Соленость варьирует от 5‰ вблизи устьев до 30‰ в открытом море.

Восточная часть Восточно-Сибирского моря характеризуется сложным геологическим строением, контрастным рельефом дна и мозаичным распределением донных отложений различного гранулометрического состава. Основные источники осадочного материала — абразия берегов, размыв дна и речной сток; дополнительный вклад возможен за счет эоловых процессов. На условия седиментации влияние оказывают теплые тихоокеанские воды, поступающие через Берингов пролив и Чукотское море,

а также течения атлантического происхождения из Северного Ледовитого океана [Рябчук, Прищепенко и др., 2020].

Цель настоящей статьи — провести литолого-геохимический анализ состава поверхностного слоя донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря в зоне максимальной разгрузки метана (CH<sub>4</sub>) и смежных зон на основе результатов одномерного регрессионного и однофакторного дисперсионного методов статистики; выявить

Таблица 1

**Расположение станций поверхностного слоя донных осадков в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря и их гранулометрический состав [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]**

Зоны шельфа*	Станция	Координаты		Глубина, м	Гранулометрические типы		
		с.ш.	в.д.		Песок, %	Алеврит, %	Пелит, %
1	70	70°34'58"	176°18'11"	43	2,65	50,37	46,97
1	90	70°44'43"	176°25'34"	39	2,44	49,52	48,03
1	100	70°49'59"	176°29'31"	39	1,8	51,53	46,67
1	110	70°54'29"	176°33'32"	38	1,71	54,34	43,96
1	120	70°58'59"	176°37'30"	37	0,9	52,92	46,18
1	130	71°4'14"	176°41'28"	37	0,3	50,11	49,59
1	160	71°19'15"	176°53'24"	31	3,29	55,44	41,27
1	200	71°39'30"	177°9'54"	25	33,09	43,58	23,32
1	230	71°54'31"	177°21'18"	33	4,09	56,39	39,52
1	240	71°59'46"	177°25'48"	34	0,25	45,34	48,49
1	260	72°9'31"	177°33'47"	35	1,24	40,86	48,65
2	270	72°14'46"	177°38'20"	41	0	47,27	50,88
2	280	72°20'11"	177°42'18"	45	0	40,89	59,11
2	290	72°24'32"	177°46'19"	45	0	43,92	56,08
2	300	72°29'47"	177°50'17"	46	0	49,63	50,18
3	330	72°44'47"	178°2'13"	61	0,01	52,34	45,93
3	350	72°55'18"	178°10'12"	54	0,19	51,52	46,47
3	370	73°5'3"	178°18'43"	55	0	51,01	48,72
3	380	73°9'33"	178°22'41"	55	0,17	25,84	72,51
3	410	73°25'18"	178°34'37"	56	0,91	49,34	39,51
3	440	73°39'34"	178°47'10"	63	0,34	51,71	45,34
3	470	73°55'20"	178°59'6"	70	0,08	58,44	39,29
4	500	74°9'35"	179°11'35"	99	0	54,12	45,69
4	520	74°20'5"	179°19'34"	127	0	51,99	47,76
4	560	74°42'36"	179°36'36"	200	0	44,05	55,27

*Примечание:* Фациальные зоны: 1 — мелководная прибрежная (внутреннего шельфа) со средней глубиной 35,6 м (станции с 70 по 260), 2 — приразломная (среднего шельфа) со средней глубиной 44,3 м и повышенным содержанием CH<sub>4</sub> в осадках (станции с 270 по 300), 3 — относительного глубоководья (внешнего шельфа) со средней глубиной 84 м (станции с 330 по 470), 4 — верхней части континентального склона (станции: 500, 520, 560).

особенности седиментации с помощью таких геохимических индикаторов, как содержание метана (CH<sub>4</sub>), органического углерода C<sub>орг</sub> и распределение отношений V/V+Ni, Mn/Al, Mn/Fe в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. Исследование направлено на расширение геохимической базы данных для восточного сектора российской Арктики, в частности, на получение строго достоверных данных по границам литолого-фациальных зон.

**Материалы и методы исследований.** В статье использованы данные по геохимическому и гранулометрическому составу донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря, опубликованные в работе [Шакиров, Сорочинская и др., 2013] (рис. 1; табл. 1, 2). Отбор проб донных осадков осуществлялся с борта научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» с применением ударной прямооточной трубки (длина 4 м, внутренний диаметр 60 мм). Методы анализа осадков в рейсе и, затем, в лабораторных условиях подробно описаны в статье [Шакиров, Сорочинская и др., 2013].

Перед нами стояли две основных задачи: 1) изучить распределение метана CH<sub>4</sub> (в интервале отбора 0–20 см), C<sub>орг</sub> (%), Fe (%), некоторых оксидов: MgO (%), CaO (%), Na<sub>2</sub>O (%), ряда микроэлементов: Co (г/т), Ni (г/т), Zn(г/т), Pb (г/т) и отношений: Si/Al, V/(V+Ni) в области максимальной концентрации метана (CH<sub>4</sub>) и смежных зон в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря на основе однофакторного дисперсионного анализа; 2) с помощью одномерного регрессионного анализа исследовать взаимосвязи пелитовой фракции, содержания органического углерода, в %, суммы Fe и Ti, в %, а также отношений: Si/Al, Ti/Al, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni) с глубиной моря для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Анализ значений изотопного состава углерода метана и этана, полученных в Восточно-Сибирском море, указывает на их принадлежность к категории газов смешанного происхождения (сочетание термогенного и бактериального генезиса), при этом наблюдается доминирование термогенного компонента [Шакиров, Сорочинская и др., 2013].

**Результаты исследования и их обсуждение.** На основе анализа данных по среднему содержанию метана — CH<sub>4</sub>, в ppm, средним содержаниям оксидов MgO, CaO, Na<sub>2</sub>O, Fe, в % и ряда микроэлементов: Co, Ni, Zn, Pb, в г/т, отношений Si/Al, V/(V+Ni), органического углерода, в % по данным [Шакиров, Сорочинская и др., 2013] в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря (рис. 1, А) выделены четыре основные зоны, простирающиеся с юга на север (рис. 1): 1 — прибрежная мелководная зона внутреннего шельфа, прослеживается на профиле по станциям с 70 по 260, частично охватывает пролив Лонга (станция — 70), поднятие Врангеля (90–120), далее Врангельский грабен (станции — 130, 160, 200) со средней глубиной моря — 35,6 м и средним

Таблица 2

Содержание отношений Si/Al, V/(V+Ni), Mn/Al,  $C_{\text{орг}}$ , оксидов CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, а также Cr, Co, Ni, Zn, Pb поверхностного слоя донных осадков в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря [Шакиров, Сорочинская и др., 2013]

Фациальные зоны	Станция	Si/Al	V/(V+Ni)	Mn/Al	Mn/Fe	$C_{\text{орг}}$ %	CH <sub>4</sub> (0–20 см), %	CaO, %	MgO, %	Na <sub>2</sub> O, %	Ti, %	Fe, %	Cr, г/г	Co, г/г	Ni, г/г	Zn, г/г	Pb, г/г
1	70	4,63	0,83	0,004	0,008	1,72	3,80	1,46	2,12	3,73	0,34	3,48	67,56	8,4	25,94	90,6	12,72
1	90	4,45	0,84	0,004	0,008	1,58	3,60	1,51	2,17	3,48	0,35	3,71	73,1	10,0	28,05	88,44	18,73
1	100	4,45	0,83	0,004	0,008	1,39	3,00	1,33	2,12	3,46	0,35	3,78	68,09	9,2	28,5	100,7	15,25
1	110	4,45	0,84	0,043	0,077	1,74	9,10	1,46	2,18	3,45	0,34	3,71	67,66	8,7	27,82	99,2	14,51
1	120	4,45	0,84	0,004	0,007	1,65	2,40	1,49	2,15	3,28	0,35	3,90	71,62	9,0	27,96	102,5	14,74
1	130	4,54	0,83	0,004	0,007	1,46	6,60	1,4	2,15	3,32	0,35	3,64	68,71	8,8	27,87	97,3	14,54
1	160	5,11	0,80	0,004	0,008	1,27	3,10	1,19	1,71	3,22	0,32	3,17	59,23	8,1	30,96	79,9	12,86
1	200	8,18	0,84	0,004	0,010	0,5	9,70	1,14	0,9	2,56	0,23	1,62	31,23	4,8	11,59	37,7	9,64
1	230	4,89	0,83	0,004	0,007	1,44	5,90	1,25	1,83	3,51	0,32	3,46	58,8	8,2	27,45	96	13,37
1	240	5,04	0,84	0,004	0,008	1,23	3,70	1,16	1,85	3,68	0,32	3,10	61,85	7,7	26,52	84,8	13,79
1	260	5,32	0,85	0,004	0,007	1,12	5,60	1,11	1,71	3,39	0,29	3,10	54,64	7,4	22,29	84,5	13,25
2	270	3,93	0,86	0,004	0,006	1,62	41,90	1,13	2,5	4,69	0,34	4,59	81,59	9,4	30,91	108,9	17,48
2	280	4,07	0,86	0,004	0,006	2,15	13,00	1,31	2,57	4,66	0,31	4,37	77,78	9,1	29,08	106,3	16,47
2	290	4,08	0,86	0,004	0,006	2,08	4,50	1,27	2,58	4,43	0,34	4,50	82,74	9,6	29,98	111,9	16,23
2	300	4,36	0,86	0,004	0,007	2,06	4,50	1,39	2,43	4,45	0,33	4,17	76,16	9,3	28,93	107,8	16,70
3	330	4,22	0,87	0,006	0,008	2,13	2,60	1,51	2,6	4,66	0,32	5,15	75,29	10,7	29,23	113,6	17,57
3	350	4,36	0,86	0,005	0,007	1,92	3,30	1,59	2,48	4,49	0,32	4,41	73,08	9,9	29,39	106,3	16,80
3	370	4,36	0,82	0,005	0,007	1,94	0,00	1,46	2,31	3,82	0,32	4,59	76,38	10,6	39,88	127,4	19,12
3	380	3,33	0,77	0,007	0,013	1,48	2,60	1,2	2,14	2,86	0,38	4,51	73,26	13,3	45,96	173,4	19,91
3	410	4,68	0,81	0,004	0,008	1,47	3,80	1,44	2,08	3,41	0,32	3,50	66,3	9,8	38,48	103	15,42
3	440	4,59	0,83	0,004	0,008	1,79	6,10	1,51	2,2	3,41	0,32	3,76	72,94	10,6	35,41	112,7	16,57
3	470	4,63	0,78	0,005	0,008	1,76	5,80	1,48	2,21	3,34	0,34	3,79	70,96	11,8	46,6	112,5	15,34
4	500	3,82	0,83	0,041	0,057	2,27	13,80	1,39	3,08	5,46	0,33	4,66	79,19	25,6	45,02	146,8	18,81
4	520	3,83	0,81	0,110	0,159	2,12	3,80	1,47	2,97	5,09	0,32	4,55	74,82	29,4	49,17	160	18,45
4	560	3,41	0,80	0,046	0,068	1,77	4,70	1,42	3,12	6,91	0,32	4,73	82,17	34,0	67,11	185,9	19,78

Таблица 3

Корреляционная матрица Пирсона данных по взаимосвязи Mn, Fe, Al, Cr, V, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Pb для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

	Mn	Fe	Al	Cr	V	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Pb
Mn	1,00	0,31	0,15	0,23	0,52	0,80	0,56	-0,01	0,57	0,27	0,36
Fe		1,00	0,64	0,92	0,85	0,52	0,60	0,20	0,78	0,55	0,87
Al			1,00	0,68	0,48	0,32	0,57	0,69	0,74	0,42	0,69
Cr				1,00	0,84	0,46	0,59	0,10	0,71	0,56	0,83
V					1,00	0,80	0,82	0,03	0,85	0,60	0,83
Co						1,00	0,86	0,09	0,82	0,47	0,62
Ni							1,00	0,28	0,90	0,49	0,72
Cu								1,00	0,47	0,12	0,37
Zn									1,00	0,56	0,84
Ag										1,00	0,63
Pb											1,00

Примечание: Курсивом показаны значения коэффициентов корреляции с уровнем достоверности 95%.

содержанием CH<sub>4</sub> — 5,14 ppm; 2 — приразломная зона среднего шельфа, распространена с юга на север и расположена поблизости с предполагаемым разломом (станции с 270 по 300) со средней глубиной моря 44,3 м и средним содержанием CH<sub>4</sub> (в интервале отбора от 0 до 20 см) — 15,98 ppm; 3 — относительно глубоководная зона внешнего шельфа (станции с 330 по 470) распространена вдоль Западно-Врангельского прогиба, имеет среднюю глубину 84 м, со средним содержанием метана (CH<sub>4</sub>) — 3,46 ppm; 4 — верхняя часть континентального склона со средней глубиной 142 м и средним содержанием CH<sub>4</sub> 7,43 ppm (рис. 1).

Результаты корреляционного анализа Пирсона в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря (для 4-х фациальных зон) позволили выявить сильные положительные корреляции Mn с V ( $r=+0,52$ ), Co ( $r=+0,8$ ), Ni ( $r=+0,56$ ) и Zn ( $r=+0,57$ ) (табл. 3), что указывает на их совместную взаимосвязь в процессе диагенеза. Марганец легко реагирует на изменения окислительно-вос-

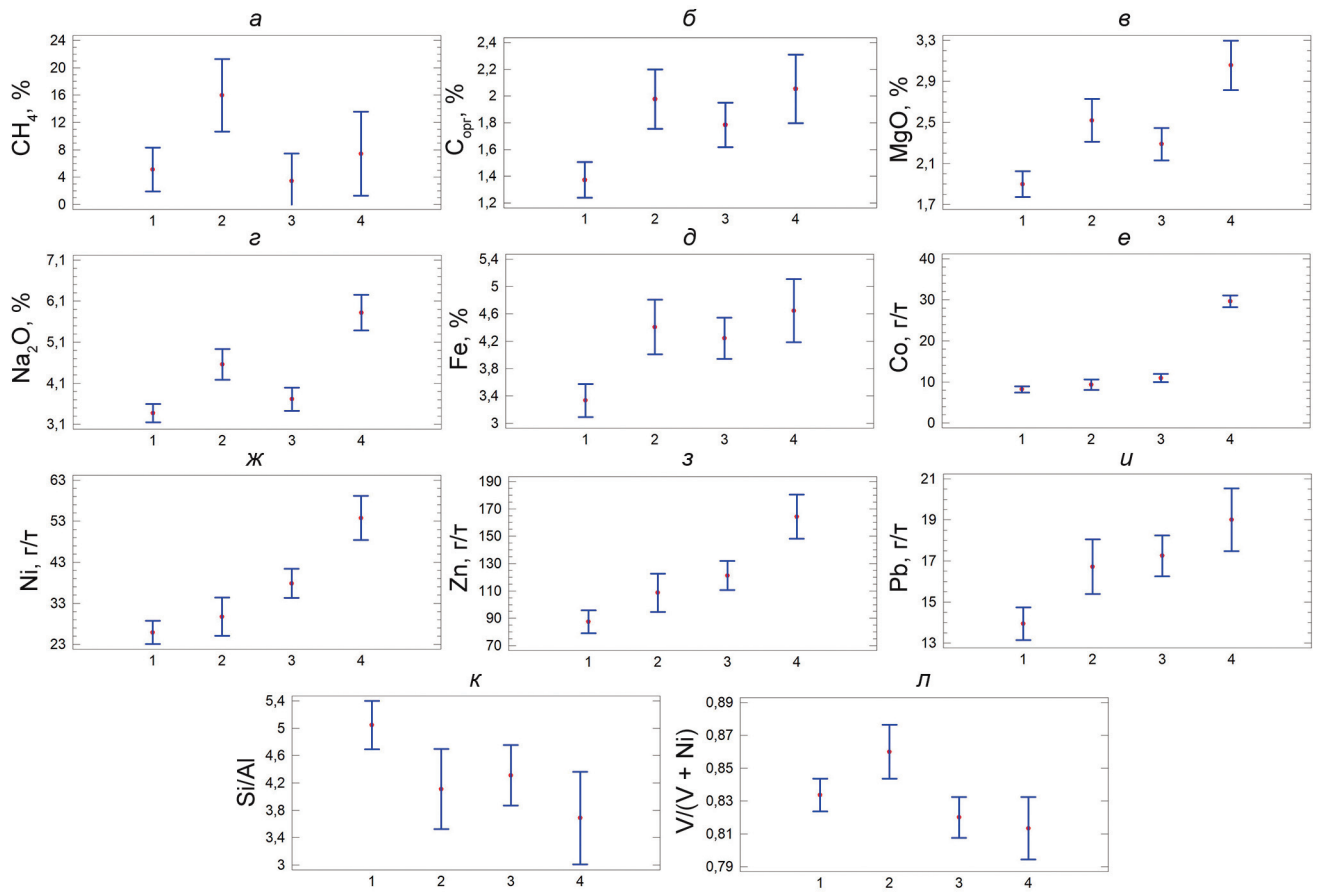


Рис. 2. Средние и 95% доверительные интервалы распределения: а — CH<sub>4</sub>, б — органического углерода (C<sub>орг</sub>), в — MgO, г — Na<sub>2</sub>O, д — Fe, е — Co, ж — Ni, з — Zn, и — Pb, к — Si/Al, л — V/(V+Ni) в донных осадках четырех выделенных зон шельфа юго-восточной части Восточно-Сибирского моря: 1 — мелководная прибрежная зона внутреннего шельфа; 2 — приразломная зона среднего шельфа (с повышенным содержанием метана (CH<sub>4</sub>) в осадках); 3 — зона относительного глубоководья внешнего шельфа; 4 — зона верхней части континентального склона

становительных условий. В ходе транспортировки и осаднения из водной толщи происходят сорбция и соосаждение Co, Ni, Zn и V на поверхности оксидно-гидроксидных фаз Mn, что характерно для шельфовых и склоновых обстановок Арктики. Особенно показательной является корреляция Mn–Co ( $r=+0,80$ ), свидетельствующая о связывании кобальта преимущественно с марганцевыми фазами. Это указывает на активные процессы диагенетической миграции металлов в пределах восстановительно-окислительных барьеров, характерных для зон флюидного воздействия и повышенной биогеохимической активности. Установлены сильные положительные корреляционные связи Fe с Al ( $r=+0,64$ ), Cr ( $r=+0,92$ ), V ( $r=+0,85$ ), Co ( $r=+0,52$ ) и Ni ( $r=+0,60$ ), что отражает роль железа, как главного носителя терригенного и глинистого материала. Высокая корреляция Fe с Al и Cr указывает на их совместную локализацию в алюмосиликатной матрице осадков, тогда как связи Fe с V, Co и Ni свидетельствуют о дополнительном контроле со стороны редокс-чувствительных фаз железа и органо-минеральных комплексов.

Дисперсионный анализ позволяет с достаточно высокой точностью диагностировать фаціальную

природу осадков с учетом их геохимического состава [Сыромятников, Габдуллин, 2022<sub>а,б</sub>]. В процессе проведения однофакторного дисперсионного анализа (табл. 4; 5; рис. 2, а-л) были проанализированы распределения органического углерода C<sub>орг</sub> в %, некоторых оксидов MgO, Na<sub>2</sub>O, Fe, в %, ряда микроэлементов Co, Ni, Zn, Pb, в г/г, а также отношений Si/Al, V/(V+Ni) в пределах выделенных зон для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Установлено (табл. 4, 5; рис. 2, а), что средние содержания метана (CH<sub>4</sub>, %) в мелководной прибрежной зоне (внутреннего шельфа) составляют 5,14% (стандартная ошибка (SE) равна 2,18), возрастают в приразломной зоне среднего шельфа до 15,98% (SE = 3,61), резко уменьшаясь в относительно более глубоководной зоне внешнего шельфа до 3,46% (SE = 2,73) и затем вновь увеличивается в зоне верхней части континентального склона до 7,43% (SE = 4,17). Однако, достоверность распределения CH<sub>4</sub> не доказана статистически, так как P-значение более 0,05, что вероятно связано с тем, что 4-я зона, несмотря на контрастность геохимического состава по сравнению с остальными тремя зонами, прослеживается только по трем точкам. Таким об-

Таблица 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа по распределению  $\text{CH}_4$  (ppm);  $C_{\text{орг}}$ , MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$ , Fe (мас.%), Co, Ni, Zn, Pb (г/т), отношения Si/Al, V/(V+Ni) в изученных донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

Параметры	Источник	Сумма квадратов, SS	Степени свободы, Df	Средние квадраты	F-отношение	P-значение (p)
$\text{CH}_4$ , г/т	Между группами	446,2	3	178,7	2,86	0,06
	Внутри групп	1093,4	21	52,07		
	Общая	1539,65	24			
$C_{\text{орг}}$ , %	Между группами	1,88	3	0,63	6,92	0,002
	Внутри групп	1,90	21	0,09		
	Общая	3,79	24			
MgO, %	Между группами	3,61	3	1,21	14,92	>0,01
	Внутри групп	1,69	21	0,08		
	Общая	5,30	24			
$\text{Na}_2\text{O}$ , %	Между группами	16,05	3	5,34	20,69	>0,01
	Внутри групп	5,43	21	0,26		
	Общая	21,48	24			
Fe, %	Между группами	7,05	3	2,35	8,02	>0,01
	Внутри групп	6,16	21	0,29		
	Общая	13,21	24			
Co, г/т	Между группами	1126,72	3	375,58	126,13	>0,01
	Внутри групп	62,53	21	2,98		
	Общая	1189,25	24			
Ni, г/т	Между группами	2054,08	3	684,69	16,99	>0,01
	Внутри групп	846,27	21	40,3		
	Общая	2900,35	24			
Zn, г/т	Между группами	15321,5	3	5107,16	14,11	>0,01
	Внутри групп	7599,2	21	361,87		
	Общая	22920,70	24			
Pb, г/т	Между группами	86,48	3	28,83	8,89	>0,01
	Внутри групп	68,11	21	3,24		
	Общая	154,59	24			
Si/Al	Между группами	6,11	3	2,04	3,22	0,0434
	Внутри групп	13,28	21	0,63		
	Общая	19,39	24			
V/(V+Ni)	Между группами	0,005	3	0,0017	3,47	0,034
	Внутри групп	0,0107	21	0,0005		
	Общая	0,0157	24			

Таблица 5

Распределение  $\text{CH}_4$  (ppm);  $C_{\text{орг}}$ , MgO, CaO,  $\text{Na}_2\text{O}$ , Fe (мас.%), Co, Ni, Zn, Pb (г/т), отношения Si/Al, V/(V+Ni) в изученных донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря (составлено авторами на основе данных [Шакиров, Сорочинская и др., 2013])

Параметры	Зоны <sup>а</sup> шельфа	Количество образцов (n)	Среднее значение	Стандартная ошибка (SE)	Минимальное значение	Максимальное значение	95% доверительный интервал для среднего <sup>б</sup>	
							Нижняя граница	Верхняя граница
$\text{CH}_4$ , ppm	1	11	5,14	2,18	2,4	9,7	1,94	8,34
	2	4	15,98	3,61	4,5	41,9	10,67	21,28
	3	7	3,46	2,73	0	6,1	-0,55	7,47
	4	3	7,43	4,17	3,8	13,8	1,31	13,56
	Общее	25	6,68	-	0	41,9		
$C_{\text{орг}}$ , %	1	11	1,37	0,09	0,50	1,74	1,24	1,51
	2	4	1,98	0,15	1,62	2,15	1,76	2,20
	3	7	1,78	0,11	1,47	2,13	1,62	1,95
	4	3	2,05	0,17	1,77	2,27	1,797	2,31
	Общее	25	1,67	-	0,50	2,27		

Параметры	Зоны <sup>а</sup> шельфа	Количество образцов (n)	Среднее значение	Стандартная ошибка (SE)	Минимальное значение	Максимальное значение	95% доверительный интервал для среднего <sup>б</sup>	
							Нижняя граница	Верхняя граница
MgO, %	1	11	1,90	0,09	0,9	2,18	1,77	2,03
	2	4	2,52	0,14	2,43	2,58	2,31	2,73
	3	7	2,29	0,11	2,08	2,6	2,13	2,45
	4	3	3,06	0,16	2,97	3,12	2,82	3,30
	Общее	25	2,25	–	0,9	3,12		
Na <sub>2</sub> O, %	1	11	3,37	0,15	2,56	3,73	3,15	3,596
	2	4	4,56	0,25	4,43	4,69	4,18	4,93
	3	7	3,71	0,19	2,86	4,66	3,43	3,996
	4	3	5,82	0,29	5,09	6,91	5,39	6,25
	Общее	25	3,95	–	2,56	6,91		
Fe, %	1	11	3,33	0,16	1,62	3,90	3,09	3,57
	2	4	4,41	0,27	4,17	4,59	4,01	4,81
	3	7	4,24	0,21	3,50	5,15	3,94	4,55
	4	3	4,65	0,31	4,55	4,73	4,19	5,11
	Общее	25	3,92	–	1,62	5,15		
Co, г/т	1	11	8,20	0,52	4,81	9,95	7,44	8,97
	2	4	9,34	0,86	9,14	9,58	4,93	10,61
	3	7	10,96	0,65	9,81	13,26	13,78	11,92
	4	3	29,64	0,996	25,55	34,02		
	Общее	25	11,73	–	4,81	34,02		
Ni, г/т	1	11	25,91	1,91	11,59	30,96	23,09	28,72
	2	4	29,73	3,17	28,93	30,91	25,06	34,39
	3	7	37,85	2,40	29,23	46,6	34,32	41,38
	4	3	53,77	3,67	45,02	67,11	48,38	59,16
	Общее	25	33,20	–	11,59	67,11		
Zn, г/т	1	11	87,42	5,73	37,7	102,5	78,98	95,86
	2	4	108,73	9,51	106,3	111,9	94,74	122,71
	3	7	121,27	7,19	103,0	173,4	110,7	131,84
	4	3	164,23	10,98	146,8	185,9	148,08	180,34
	Общее	25	109,53	–	37,7	185,9		
Pb, г/т	1	11	13,95	0,54	9,64	18,73	13,15	14,74
	2	4	16,72	0,90	16,23	17,48	15,4	18,04
	3	7	17,25	0,68	15,34	19,91	16,25	18,25
	4	3	19,01	1,04	9,64	19,78	17,48	20,54
	Общее	25	15,92	–	9,64	19,91		
Si/Al	1	11	5,05	0,24	4,45	8,18	4,69	5,40
	2	4	4,11	0,40	3,93	4,36	3,52	4,70
	3	7	4,31	0,30	3,33	4,68	3,89	4,75
	4	3	3,69	0,46	3,41	3,83	3,01	4,36
	Общее	25	4,53	–	3,33	8,18		
V/(V+Ni)	1	11	0,83	0,007	0,8	0,85	0,82	0,84
	2	4	0,86	0,01	0,86	0,86	0,84	0,88
	3	7	0,82	0,009	0,77	0,87	0,81	0,83
	4	3	0,81	0,01	0,8	0,83	0,79	0,83
	Общее	25	0,83	–	0,77	0,87		

Примечание: <sup>а</sup> — зоны шельфа (табл. 1): 1 — мелководная прибрежная (внутреннего шельфа) со средней глубиной 35,6 м (станции с 70 по 260), 2 — приразломная (среднего шельфа) со средней глубиной 44,3 м и повышенным содержанием CH<sub>4</sub> в осадках (станции с 270 по 300), 3 — относительного глубоководья (внешнего шельфа) со средней глубиной 84 м (станции с 330 по 470); 4 — верхней части континентального склона со средней глубиной 142 м (станции 500, 520, 560). <sup>б</sup> — при большом числе выборок из генеральной совокупности 95% средних значений этих выборок попадут в интервал, определяемый нижней и верхней границами.

разом, отсутствие статистической значимости не опровергает геологическую интерпретацию, а отражает специфику газогеохимических параметров в морских осадках, которые редко демонстрируют нормальное распределение.

Максимальное среднее значение органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) наблюдается в верхней части континентального склона (2,05%; SE=0,17) и приразломной зоне (1,98%; SE=0,15), несколько меньше в зоне внешнего шельфа (1,78%; SE=0,11) и заметно ниже в прибрежно-морской зоне внутреннего шельфа (1,37%; SE=0,09) (табл. 4, 5; рис. 2, б). *P*-значение меньше 0,01 свидетельствует о распределении органического углерода в пределах выделенных зон с уровнем достоверности 95%. Максимальные значения, зафиксированные в верхней части континентального склона, интерпретируются, как результат: 1) повышенной биопродуктивности и лучшей сохранности органического вещества; 2) замедленной гидродинамики осадконакопления; 3) восстановительных условий, подтвержденных значениями V/(V+Ni) (табл. 2).

Низкие стандартные ошибки свидетельствуют об относительной однородности условий аккумуляции органического вещества в пределах каждой из выделенных зон.

Содержание MgO в донных осадках демонстрирует тенденцию увеличения от прибрежной зоны внутреннего шельфа (1,90%; SE = 0,09) к приразломной зоне среднего шельфа (2,52%; SE = 0,14) и зоне внешнего шельфа (2,29%; SE = 0,11), достигая максимальных значений в зоне верхней части континентального склона (3,06%; SE = 0,16). Статистически значимая разница средних значений, подтвержденная однофакторным дисперсионным анализом, указывает на систематический характер распределения Mg. Повышение MgO в направлении от мелководных к более глубоководным зонам интерпретируется авторами, как результат увеличения доли тонкодисперсной глинистой компоненты (смектит, хлорит, иллит-смектитовые ассоциации), обогащенной Mg. Относительно низкие стандартные ошибки свидетельствуют об однородности условий накопления Mg-содержащих фаз в пределах каждой зоны и подтверждают устойчивость выявленной тенденции (табл. 4, 5; рис. 2, в).

Содержание  $Na_2O$  демонстрирует выраженную зональную изменчивость и является одним из наиболее чувствительных индикаторов изменения минерального состава осадков. В прибрежной зоне внутреннего шельфа среднее содержание  $Na_2O$  составляет 3,37% (SE = 0,15), увеличиваясь в приразломной зоне среднего шельфа до 4,56% (SE = 0,25). В зоне внешнего шельфа отмечается резкое снижение  $Na_2O$  до 3,71% (SE = 0,19), после чего в зоне верхней части континентального склона наблюдается значительный рост до 5,82% (SE = 0,29). Повышенные содержания  $Na_2O$  в приразломной зоне и зоне континентального склона рассматриваются

нами как следствие возможного увеличения доли натрийсодержащих полевых шпатов и/или морских глинистых минералов, а также возможного участия морской воды и флюидов в процессах постседиментационных изменений. Резкое снижение  $Na_2O$  во внешней зоне шельфа может отражать вымывание натрийсодержащих минералов в условиях более активной циркуляции водной среды, либо смену минерального состава в сторону Al- и Fe-богатых глин. Достаточно высокие стандартные ошибки для  $Na_2O$  указывают на чувствительность Na к локальным минералогическим вариациям и диагенетическим процессам (табл. 4, 5; рис. 2, г).

Содержание Fe возрастает от прибрежной зоны внутреннего шельфа (3,33%; SE = 0,16) к приразломной зоне среднего шельфа (4,41%; SE = 0,28), несколько уменьшается во внешней зоне шельфа (4,24%; SE = 0,21) и вновь увеличивается в зоне верхней части континентального склона (4,65%; SE = 0,31) (табл. 4, 5; рис. 2, д). Подобное распределение Fe отражает совокупное влияние терригенного поступления, редокс-условий в водной толще и диагенетических процессов. Повышенные содержания Fe в приразломной зоне связаны с аккумуляцией Fe в восстановительных условиях и активной фиксацией его в виде сульфидных и оксидно-гидроксидных фаз. Рост Fe в зоне континентального склона может быть обусловлен вторичным накоплением железа в условиях замедленного осадконакопления. Умеренные значения стандартных ошибок свидетельствуют о сочетании фонового накопления Fe и локальных зон обогащения, особенно в зонах тектонического и флюидного контроля.

Средние содержания Co демонстрируют резкое его увеличение: от 8,2 г/т (SE = 0,52) в прибрежной зоне внутреннего шельфа до 9,34 г/т (SE = 0,86) в приразломной зоне среднего шельфа, 10,96 г/т (SE = 0,65) во внешней зоне шельфа и экстремально высоких значений в зоне верхней части континентального склона — 29,64 г/т (SE = 1,00) (табл. 4, 5; рис. 2, е). Эти данные свидетельствуют о наличии дополнительного механизма концентрации Co в глубоководной части профиля. Высокие содержания Co в зоне континентального склона интерпретируются как результат его накопления в восстановительных условиях в ассоциации главным образом с марганцевыми фазами (табл. 3), а также с диагенетическими сульфидами.

Ni демонстрирует сходную с Co тенденцию, увеличиваясь от 25,91 г/т (SE = 1,91) в прибрежной зоне до 53,77 г/т (SE = 3,67) в зоне верхней части континентального склона (табл. 4, 5; рис. 2, ж). Устойчивое возрастание содержания Ni указывает на возрастающую роль окси-гидроксидных и сульфидных фаз в более глубоководных и восстановительных условиях. Высокие стандартные ошибки для Ni отражают многокомпонентность его носителей и сильную зависимость от локальных диагенетических условий. Ni активно ассоциируется также и с органическим

веществом, что подтверждается его ростом в зонах с повышенными значениями  $C_{\text{орг}}$  и высокими величинами отношения  $V/(V+Ni)$  (табл. 2).

Следует отметить, что Co и Ni могут быть связаны с отличающимися между собой фазами (сульфиды, органика, глинистые минералы), различно распределенными в пространстве.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа демонстрируют статистически значимую зональную изменчивость содержания Zn в донных осадках юго-восточной части Восточно-Сибирского моря. Средние концентрации Zn последовательно возрастают от прибрежной зоны внутреннего шельфа (87,42 г/т; SE = 5,73) к зоне верхней части континентального склона (164,23 г/т; SE = 10,98) (табл. 4, 5; рис. 2, з). Минимальные значения Zn в прибрежной зоне отражают условия интенсивной гидродинамики и периодической оксидации, неблагоприятные для его фиксации. Повышение содержания Zn связано с усилением относительной роли терригенного глинистого вещества (табл. 3). Относительно высокие стандартные ошибки указывают на пространственную неоднородность распределения Zn.

Результаты однофакторного дисперсионного анализа показывают статистически значимое увеличение среднего содержания Pb от прибрежной зоны внутреннего шельфа (13,95 г/т; SE = 0,54) к зоне верхней части континентального склона (19,01 г/т; SE = 1,04) (табл. 4, 5; рис. 2, и). Такой тренд отражает рост роли тонкодисперсных фракций, особенно содержащихся в них железистых окси-гидроксидов. Минимальные значения Pb в прибрежной зоне обусловлены высокой гидродинамической активностью и его слабой фиксацией в осадках, тогда как повышенные концентрации в глубоководных зонах связаны с его накоплением в восстановительных условиях, преимущественно в составе железистых и сульфидных фаз. Низкие стандартные ошибки указывают на относительную однородность распределения Pb в пределах выделенных зон.

Отношение Si/Al является индикатором терригенности и изменения литологического состава осадков. В прибрежно-морской зоне внутреннего шельфа значение Si/Al максимальное — 5,05, тогда как в приразломной зоне (2) и внешней зоне шельфа (3) — оно практически одинаковое: 4,11 и 4,12 (табл. 4, 5; рис. 2, к). В зоне верхней части континентального склона (4) отношение Si/Al уменьшается до 3,69 (SE = 0,46) (табл. 3, 4; рис. 2, л). Эти данные указывают на большее поступление кремнеземистого материала (возможно, песчаной фракции) в прибрежной зоне. Уменьшение Si/Al может свидетельствовать о возрастающем содержании глинистых компонентов на более удаленных от берега участках шельфа.

Отношение  $V/(V+Ni)$  используется как индикатор редокс-условий в осадках: значения выше 0,80 характерны для анокисической среды [Маслов, Ишерская, 2004; Hatch, Leventhal, 1992]. Все зоны характеризуются значениями выше 0,80, при этом

наибольшее значение отмечено во 2-й зоне (0,86), что может быть дополнительным признаком восстановительных условий в зоне флюидного влияния (табл. 4, 5; рис. 2, л). При этом в 4-й зоне верхней части континентального склона отношение  $V/(V+Ni)$  уменьшается до 0,81 (SE = 0,01) за счет относительного обогащения Ni по сравнению с V, что подтверждается резким ростом средних концентраций Ni в этой зоне. Замедленное осадконакопление и высокая сохранность органики также приводят к увеличению доли Ni в сумме (V+Ni) и, как следствие, к снижению индекса  $V/(V+Ni)$ .

Высокие значения стандартных ошибок (SE) и перекрывающиеся 95% доверительные интервалы между зонами по ряду показателей (например,  $CH_4$ , Co, Zn,  $Na_2O$ ) обусловлены как относительно небольшим количеством наблюдений в выборках, так и, прежде всего, внутренней геохимической неоднородностью самих зон. Пространственная изменчивость геохимических параметров, обусловленная различиями в осадконакоплении, флюидодинамике, литологии и влиянии локальной тектоники (неотектонические разломы) [Шакиров, Сорочинская и др., 2013], приводит к высокой дисперсии данных, что снижает статистическую значимость различий по отдельным признакам. Тем не менее, даже при наличии пересечения интервалов, большая разница в средних значениях и их геологическая интерпретация позволяют уверенно говорить о неодинаковых условиях в пределах выделенных зон шельфа юго-восточной части Восточно-Сибирского моря.

Вероятная связь 2-ой приразломной зоны среднего шельфа с активным неотектоническим разломом усиливает гипотезу о наличии глубинного источника метана, в большей степени термогенного [Шакиров, Сорочинская и др., 2013] и в меньшей степени бактериального происхождения.

В целях выявления пространственной зависимости между глубиной моря и ключевыми геохимическими и гранулометрическими показателями донных осадков Восточно-Сибирского моря нами проведен одномерный регрессионный анализ по 25 пробам для четырех рассматриваемых зон.

Установлена статистически значимая положительная связь между глубиной и содержанием глинистой фракции ( $P = 1/(0,015 + 0,307/D)$ ,  $P$ -значение = 0,0006,  $R^2 = 67,09\%$ ) (табл. 6; рис. 3, а). С увеличением глубины наблюдается рост доли тонкодисперсного материала, что отражает закономерности седиментации: в условиях пониженной гидродинамики (характерных для большей глубины) осаждаются более мелкие частицы. Высокая степень детерминации указывает на устойчивость этой зависимости и подтверждает, что глубина является одним из главных факторов, контролирующих гранулометрический состав осадков.

Регрессионный анализ выявил отрицательную связь между глубиной и отношением Si/Al ( $Si/Al = 1/(0,30 - 3,33/D)$ ,  $P$ -значение = 0,0006,

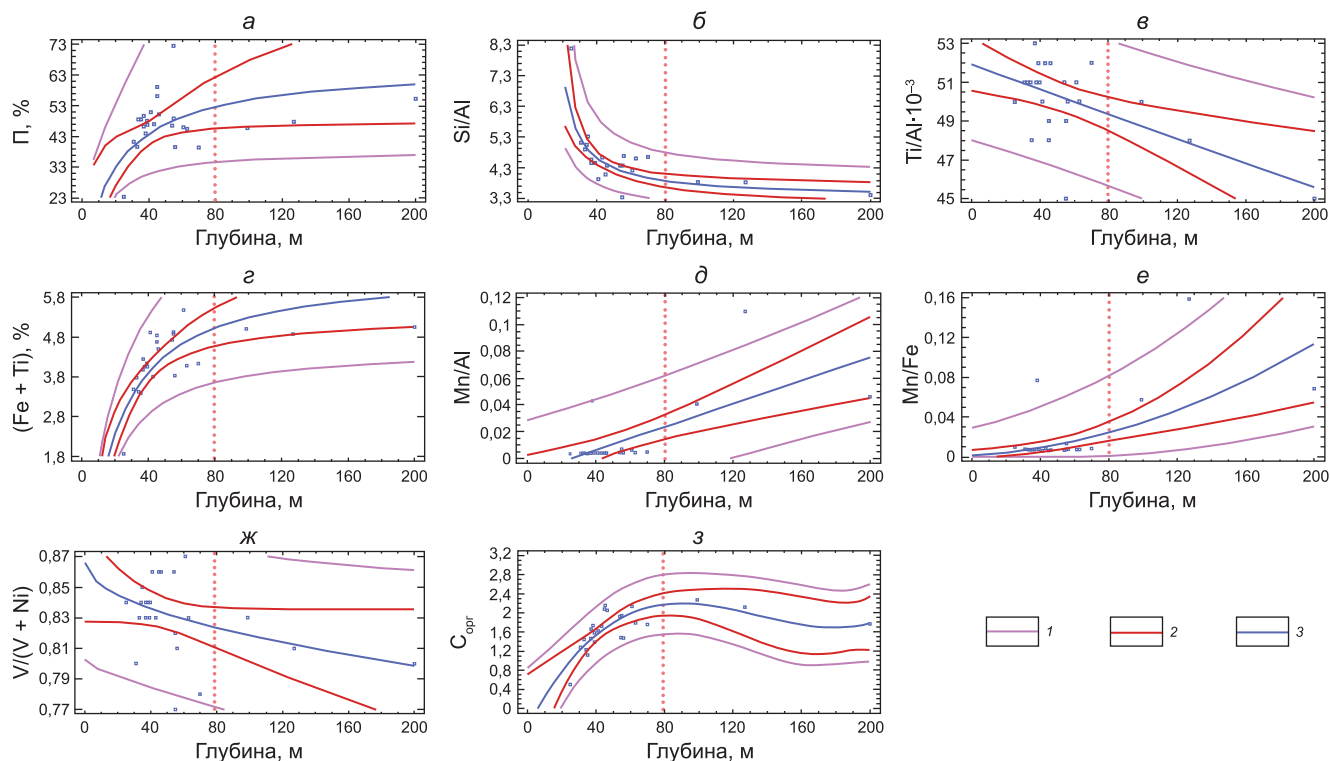


Рис. 3. Результаты одномерного регрессионного анализа для донных осадков Восточно-Сибирского моря взаимосвязи глубины: а — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и пелита; б — обратной нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Si/Al; в — обратной нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Ti/Al; г — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и суммы Fe и Ti; д — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Mn/Al; е — прямой нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения Mn/Fe; ж — обратной нелинейной взаимосвязи глубины моря и отношения V/(V+Ni); з — полиномиальной взаимосвязи глубины моря и содержание  $C_{\text{орг}}$ ; 1 — доверительный интервал, соответствующий предсказанному значению регрессии; 2 — доверительный интервал для среднего значения предсказанных значений регрессии; 3 — линия регрессии

Таблица 6

Уравнения регрессии по взаимосвязи пелитовой фракции (П), содержания органического углерода, в %, суммы Fe и Ti, в %, а также отношений: Si/Al, Ti/Al, Mn/Al, Mn/Fe, V/(V+Ni) с глубиной для донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря

Уравнение регрессии	Количество исследуемых образцов	Коэффициент корреляции, R, %	Коэффициент детерминации, $R^2$ , %	Стандартная ошибка регрессии	p-value
$\text{П} = 1/(0,015 + 0,307/D)$	25	0,5	67,09	0,02	0,0006
$\text{Si/Al} = 1/(0,30 - 3,33/D)$	25	-0,76	67,09	0,02	0,0006
$\text{Ti/Al} = (0,228 - 0,0000716 \cdot D)^2$	25	-0,57	62,06	0,02	0,001
$\text{Fe+Ti} = \exp(1,87 - 20,05/D)$	25	-0,74	55,02	0,2	0,000
$\text{Mn/Al} = -0,01 + 0,00043 \cdot D$	25	0,7	45,46	0,02	0,000
$\text{Mn/Fe} = (0,036 + 0,0015 \cdot D)^2$	25	0,7	46,96	0,06	0,000
$\text{V}/(\text{V}+\text{Ni}) = 0,87 - 0,0048 \cdot \sqrt{D}$	25	-0,04	13,62	0,02	0,07
$\text{C}_{\text{орг}} = 2,47 - 36,71/D$	25	-0,7	53,96	0,3	0,000

Примечание: П — содержание пелитовой фракции (мас. %); D — глубина моря, в м.

$R^2 = 67,09\%$ ,  $R = -0,76$ ) (табл. 6; рис. 3, б), что свидетельствует о снижении содержания кремнеземистого (существенно кварцевого) материала с удалением от береговой зоны. Это согласуется с литологическим анализом: в прибрежной зоне оседает песчаная и алевритовая фракция, обогащенная кварцем, тогда как в более глубоких частях бассейна преобладают глинистые осадки, бедные Si. В то же время оксиды Al в исследованных осадках не установлены.

Отношение Ti/Al ( $\text{Ti/Al} = (0,228 - 0,0000716 \cdot D)^2$ ,  $P$ -значение = 0,001,  $R^2 = 62,06\%$ ) (табл. 6; рис. 3, в) также демонстрирует статистически значимую отрицательную зависимость от глубины, что отражает преимущественное осаждение титансодержащих тяжелых минералов (рутил, ильменит, сфен) в более прибрежных зонах с крупнозернистыми осадками. Это отношение может быть использовано как дополнительный показатель гранулометрического состава и гидродинамического режима осадконакопления.

Увеличение суммы (Fe + Ti), с ростом глубины (уравнение:  $\text{Fe+Ti} = \exp(1,87 - 20,05/D)$ ,  $P$ -значение < 0,001,  $R^2 = 55,02\%$ ), связано с увеличением доли глинистой фракции в зоне внешнего шельфа и верхней части континентального склона, с которой связано Fe.

Положительная корреляция между глубиной и отношениями Mn/Al ( $\text{Mn/Al} = -0,01 +$

0,00043·D,  $P$ -значение  $< 0,001$ ,  $R^2 = 45,46\%$ ) (табл. 6; рис. 3, д) и Mn/Fe (Mn/Fe =  $(0,036 + 0,0015 \cdot D)^2$ ,  $P$ -значение  $< 0,001$ ,  $R^2 = 46,96\%$ ) (табл. 6; рис. 3, е) указывает на преобладание окислительных условий по мере увеличения глубины. В поверхностных слоях донных осадков марганец легко мобилизуется в восстановительной среде, тогда как в более окислительной — образует устойчивые оксиды. Таким образом, рост этих соотношений с глубиной может отражать более окислительные условия в придонных слоях водной толщи и пониженные скорости седиментации. Следует отметить, что в приразломной зоне (2) отношение Mn/Al  $< 0,005$ , что говорит о наличии здесь восстановительных условий седиментации [Эдер, 2020; Hofmann, Ricken et al., 1999].

Отношение  $V/(V+Ni)$  слабо зависит от глубины ( $V/(V+Ni) = 0,87 - 0,0048 \cdot D$ ,  $P$ -значение = 0,07,  $R^2 = 13,62\%$ ) (табл. 6; рис. 3, ж), что может свидетельствовать о влиянии локальных факторов (органическая продуктивность, флюидоразряды), преобладающих над фактором глубины. При этом общие значения  $V/(V+Ni)$  во всех зонах шельфа превышают 0,80, что характерно для аноксических или слабоокислительных условий, типичных для современной седиментации в Восточно-Сибирском море.

Взаимосвязь органического углерода с глубиной выражается уравнением полиномиальной регрессии третьей степени ( $C_{орг} = -0,39 + 0,069 \cdot D - 0,0006 \cdot D^2 + 14 \cdot 10^{-5} \cdot D^3$ ; где  $D$  — глубина моря, в м;  $R^2 = 57,95\%$ ,  $SE = 0,3$ ) (табл. 6; рис. 3, з). Полученная кривая демонстрирует сложную зависимость  $C_{орг}$  от глубины: в движении от береговой линии наблюдается увеличение содержания органического вещества с глубиной до отметки 80 м, далее содержание  $C_{орг}$  начинает постепенно снижаться до глубины 180 м и до 200 м постепенно увеличивается.

Изменения содержания  $C_{орг}$  на мелководье, в приразломной зоне и отчасти в глубинной зоне внешнего шельфа (до 80 м) обусловлены активным поступлением терригенного органического вещества, в том числе за счет рек Колыма, Индигирка и других более мелких рек, а также снижением содержания крупных гранулометрических фракций в северном направлении. Уменьшение концентраций на глубинах 80–180 м связано с ослаблением терригенного потока. Повторный рост  $C_{орг}$  на глубинах около 200 м, вероятно, обусловлен осаждением органического вещества в зоне ослабления гидродинамической активности, а также существенным возрастанием относительной роли планктоногенного ОВ [Ветров и др., 2008; Дударев и др., 2025].

Результаты однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) по ключевым геохимическим показателям между 4-мя зонами показали, что различия по содержанию  $C_{орг}$ , Si/Al, Co, Ni, Zn и Ti/Al являются статистически значимыми ( $P$ -значение  $< 0,05$ ), что подтверждает различие геохимического состава донных осадков в пределах исследуемых зон и условий седиментации.

Таким образом, глубина моря оказывает важное влияние на гранулометрический и геохимический состав донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского шельфа. Полученные регрессионные зависимости позволяют обосновать пространственную дифференциацию осадконакопления в пределах изученных зон, а также влияние редокс-условий. Обнаруженные зависимости могут быть использованы в качестве критериев при интерпретации палеоусловий седиментации.

С помощью одномерного регрессионного анализа удалось установить на более высоком уровне фаціальную дифференциацию в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря с выделением шельфовой зоны (до глубины 80 м) и зоны континентального склона (табл. 6; рис. 3).

Эта дифференциация подтверждается геохимическими данными по распределению Hg [Иванов и др., 2025], Li, Sc, Ga,  $\Sigma P3Э$ , Ni, Co, Ti в поверхностном слое донных осадков восточной Арктики [Аксентов, Саттарова и др., 2025].

**Заключение.** На основании комплексного литолого-геохимического исследования донных осадков юго-восточной части Восточно-Сибирского моря установлены выраженные пространственные различия в геохимическом составе и осадконакоплении, позволившие выделить четыре литолого-фаціальные зоны. 1 — мелководная прибрежная зона внутреннего шельфа. Характеризуется преобладанием алевритово-песчаных фракций, высокими отношениями Si/Al и Ti/Al, низким содержанием  $C_{орг}$  и слабоокислительными условиями седиментации (повышенные значения Mn/Fe и Mn/Al). Осадки обеднены органикой, характерен активный гидродинамический режим, способствующий выносу мелкодисперсного материала.

Зона 2 — приразломная зона среднего шельфа. Здесь выявлены максимальные значения содержания  $C_{орг}$  (до 2,2%). Наблюдается повышенное содержание  $CH_4$  и наличие индикаторов восстановительной среды осадконакопления (повышенные значения  $V/(V+Ni) > 0,8$ ). Терригенный поток умеренный, показатель Ti/Al снижен, а суммы Fe+Ti повышенные. Вероятно, зона связана с влиянием тектонических структур и анаэробным режимом.

Зона 3 — относительно глубоководная (внешнего шельфа); здесь преобладают глинистые осадки, характерны низкие значения Si/Al и Ti/Al, повышенные Mn/Fe и Mn/Al, что свидетельствует о более окислительных условиях. Наблюдаются колебания в содержании  $C_{орг}$ , обусловленные снижением интенсивности поставки терригенного органического вещества в пелагическом направлении и возрастанием первичной продукции за счет планктоногенного органического вещества.

Зона 4 — зона верхней части континентального склона — характеризуется максимальными значениями MgO,  $Na_2O$ , Fe, Co, Ni, Zn и Pb, Mn/Fe, а также повышенными концентрациями планктоногенного

органического углерода вследствие влияния теплых и более соленых тихоокеанских вод, проникающих через Берингов пролив и Чукотское море. Значения  $V/(V+Ni)$  остаются выше 0,80, что указывает на сохранение восстановительных условий, хотя и менее выраженных, чем во 2-ой приразломной зоне среднего шельфа. Низкие значения  $Si/Al$  свидетельствуют о преобладании тонкодисперсного глинистого и органо-минерального материала и замедленном осадконакоплении. Повышенные стандартные ошибки по ряду микроэлементов указывают на геохимическую неоднородность и наличие локальных зон концентрации, характерных для склоновых обстановок. В целом зона верхней части континентального склона рассматривается как область эффективного захоронения органического вещества и аккумуляции редокс-чувствительных элементов.

Дисперсионный анализ выявил статистически значимые различия между зонами по ключевым геохимическим индикаторам ( $CH_4$ ,  $C_{org}$ ,  $Ti/Al$ ,  $Si/Al$ ,  $Co$ ,  $Ni$ ,  $Zn$ ), подтверждая достоверность геохимического районирования.

Регрессионный анализ подтвердил существенную зависимость ряда геохимических показателей от глубины: содержание пелитовой фракции,  $C_{org}$ , отношения  $Si/Al$ ,  $Ti/Al$ ,  $Mn/Al$ ,  $Mn/Fe$  демонстрируют высокие коэффициенты детерминации ( $R^2 > 45\%$ ), что указывает на контролируемую роль глубины, как фактора седиментации и формирования геохимических фаций. Одномерный регрессионный ана-

лиз позволил установить на более высоком уровне фаціальную дифференциацию в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря с выделением шельфовой зоны (до глубины 80 м) и зоны континентального склона (табл. 6; рис. 3).

Таким образом, литологический состав четырех изученных зон шельфа определяется воздействием следующих основных факторов: 1) интенсивностью терригенного стока, включая поступление как минерального материала, так и аллохтонного органического углерода (в том числе, реками Колыма и Индигирка); 2) тектонической структурой региона, в частности, неотектоническими разломами; 3) окислительно-восстановительными условиями седиментации; 4) морфологией дна; 5) локальным увеличением первичной продукции в зоне континентального склона, что, вероятно, связано с поступлением более теплых и соленых тихоокеанских вод через Берингов пролив и Чукотское море.

**Финансирование.** Финансирование работы К.В. Сыромятникова и М.А. Левитана происходило по теме государственного задания Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского Российской академии наук ГЕОХИ РАН № FMMZ-2024-0028. Финансирование работы Р.Р. Габдуллина происходило при поддержке государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова. Финансирование работы А.С. Ульянцева происходило при поддержке государственного задания Института океанологии им. П.П. Шишова (ИО РАН) по теме № FMWE-2024-0019.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксентов К.И., Саттарова В.В., Астахов А.С. Стратегические металлы в позднеголоценовых донных отложениях окраинных морей северо-востока Азии // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. М.: ИО РАН, 2025. С. 243–247.

Астахов А.С., Босин А.А., Ши С. и др. Осадконакопление и вариации ледовых условий Восточно-Арктических морей РФ в последние тысячелетия // Глобальные проблемы Арктики и Антарктики: Сб. мат.-лов. Архангельск, 2020. С. 59–63.

Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М.: Управление навигации и океанографии МО РФ, 1980. 184 с.

Ветров А.А., Семилетов И.П., Дударев О.В. и др. Исследование состава и генезиса органического вещества донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2008. № 2. С. 183–195.

Винникова А.И., Душенко Н.В., Севастьянов В.С. и др. Геохимические исследования морских осадков на территории Восточно-Сибирского моря вблизи стока реки Индигирки // Труды IX Междунар. научно-практической конф. «Морские исследования и образование (Maresedu-2020)». Сборник. Т. II (III). М., 2020. С. 142–145.

Гресов А.И., Обжиров А.И., Шакиров Р.Б. Метаноресурсная база угольных бассейнов Дальнего Востока России и перспективы ее промышленного освоения. Т. 1. Углеметановые бассейны Приморья, Сахалина и Хабаровского края. Владивосток: Дальнаука, 2009. 246 с.

Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Мелузов А.А., Ульянцев А.С. Исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в морях восточной Арктики в 78-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик М.А. Лаврентьев» // Океанология. 2018. Т. 58, № 1. С. 166–168.

Дударев О.В., Чаркин А.Н., Черных Д.В. и др. Литологические и биохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. III. М.: ИО РАН, 2025. С. 74–76.

Иванов М.В., Алаторцев А.В., Аксентов К.И. Распределение ртути в донных осадках восточной Арктики // Геология морей и океанов: Материалы XXVI Междунар. науч. конференции (Школы) по морской геологии. Т. I. М.: ИО РАН, 2025. С. 129–133.

Конторович А.Э., Эпов М.И., Буриштейн Л.М. и др. Геология, ресурсы углеводородов шельфов Арктических морей России и перспективы их освоения // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 1. С. 7–17.

Левитан М.А., Сыромятников К.В., Рощина И.А., Штайн Р. Соотношение цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2014. № 3. С. 233–248.

Маслов А.В. Источники материала поверхностных донных осадков востока Восточно-Сибирского моря (реконструкция по геохимическим данным) // Океанология. 2021. № 4. С. 592–608.

Маслов А.В., Ишерская М.В. Генетическая интерпретация вариаций некоторых петро- и геохимических параметров аргиллитов в разрезе венда Шкаповско-Шиханской впадины // Региональная геология, литология, геотектоника. 2004. С. 87–97.

Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др. Экологическое состояние и минералого-геохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2020. Т. 60. № 4. С. 595–610.

Неотектонические структуры и активные разломы шельфа // Геология и полезные ископаемые шельфов России: Атлас. М.: Научный мир, 2004. Лист 3-4.

Рябчук Д.В., Прищепенко Д.В., Ковалева О.А. и др. Литология поверхностных отложений Восточно-Сибирского моря по результатам геологического картирования акваториальной части листов r-56–60 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 7. СПб.: ВСЕГЕИ, 2020. С. 188–197.

Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Закономерности распределения гранулометрических типов современных донных осадков и органического углерода по глубине в западной части Баренцева моря на основе методов математической статистики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022а. № 4. С. 52–62.

Сыромятников К.В., Габдуллин Р.Р. Основные факторы седиментогенеза и раннего диагенеза в донных осадках Карского моря на основе методов математической статистики // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022б. № 5. С. 99–113.

Талденкова Е.Е., Шманяк А.В., Кассенс Х. и др. Геологические исследования в морях Лаптевых и Восточно-Сибирском в рамках 4-го этапа экспедиции «Трансарктика-2019» // Итоги экспедиционных исследований в 2019 г. в Мировом океане, внутренних водах и на архипелаге Шпицберген. Материалы конф. 26–27 февраля 2020. М.: СевастопольФИЦ, 2020. С. 53–56.

Ульянцев А.С., Стрельцова Е.А., Чаркин А.Н. Гранулометрические характеристики поверхностных донных осадков Чаунской губы // Океанология. 2024. Т. 64, № 3. С. 509–525.

Ульянцев А.С., Чаркин А.Н., Семин В.Л. и др. Геологические исследования верхней осадочной толщи Чаунской

губы в 60-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Опарин» // Океанология. 2021. Т. 61, № 4. С. 666–668.

Хахенберг Х., Шмидт А. Газохроматографический анализ равновесной паровой фазы. М.: Мир, 1979. 160 с.

Шакиров Р.Б., Сорочинская А.В., Обжиров А.И. Газогеохимические аномалии в осадках Восточно-Сибирского моря // Вестник Краунц. Науки о Земле. 2013. № 1. Вып. 21. С. 98–110.

Швалова Д.А., Зарубина Н.В. Геохимические исследования плейстоценовых отложений окраинно-шельфовой зоны Восточно-Сибирского моря и Северного Ледовитого океана // Геохимия. 2022. Т. 67, № 10. С. 961–977.

Эдер В.Г. Пиритизация пород зон перехода черносланцевой толщи к вмещающим отложениям на примере баженовской свиты Западной Сибири // Литол. и полез. ископ. 2020. № 3. С. 257–271.

Anderson L.G., Bjork G., Jutterstrom S., et al. East Siberian Sea, an Arctic region of very high biogeochemical activity // Biogeoscience. 2011. Vol. 8. Is. 8. P. 1745–1754.

Data Access Viewer (DAV). URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>. 25.05.2025.

Hatch J.R., Leventhal J.S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. // Chem. Geol. 1992. Vol. 99. P. 65–82.

Hofmann P., Ricken W., Schwark L. Leythaeuser coupled oceanic effects of climatic cycles from late Albian deep-sea sections of the North Atlantic // Evolution of the Cretaceous Ocean Climate System, Geological Society of America. 1999. Special Paper 332. P. 143–160.

Rachold V. Major, trace and rare earth element geochemistry of suspended particulate material of East Siberian rivers draining to the Arctic Ocean // In Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. P. 199–222.

Viscosi-Shirley C., Mammone K., Piasias N., et al. Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic shelf: implications for sediment provenance and grain size sorting // Continental Shelf Research. 2003. Vol. 23, № 11–13. P. 1175–1200.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 550.8.01: 550.85

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-86-90

## МИНЕРАЛОГИЯ ЗОЛОТО-ВИСМУТ-ТЕЛЛУРИДНЫХ РУД ПРОЯВЛЕНИЯ ЛОСИХА, ЗАПАДНАЯ ЧУКОТКА

Евгений Алексеевич Власов<sup>1</sup>✉, Юрий Николаевич Николаев<sup>2</sup>,  
Иван Андреевич Бакшеев<sup>3</sup>, Ирина Владимировна Балыкова<sup>4</sup>,  
Сергей Владимирович Кузин<sup>5</sup>, Марина Федоровна Вигасина<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; user420@geol.msu.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nikolaev@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; iab\_68@mail.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; irin701@gmail.com

<sup>5</sup> Стенмикс Холдинг Лимитед, Москва, Россия; Sergey.Kuzin@russdragmet.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vigasina55@mail.ru

**Аннотация.** Изложены результаты исследования золото-висмут-теллуридных руд проявления Лосиха (Западная Чукотка), которое по многим параметрам отвечает объектам, связанным с гранитоидными интрузивами. В составе руд выделены следующие минеральные ассоциации — кварц-шеелитовая, сульфидная, золото-висмут-теллуридная (продуктивная) и гипергенная. Предполагается, что высокая активность Те на начальном этапе формирования продуктивной ассоциации привела к полному замещению раннего самородного висмута теллуридами Bi или непосредственно к кристаллизации теллуrowисмутита. Образование теллуридов Bi обусловило отсутствие самородного висмута и формирование высокопробного самородного золота, а не мальдонита.

**Ключевые слова:** самородное золото, теллуриды и сульфотеллуриды висмута, Лосиха, Западная Чукотка

**Для цитирования:** Власов Е.А., Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Балыкова И.В., Кузин С.В., Вигасина М.Ф. Минералогия золото-висмут-теллуридных руд проявления Лосиха, Западная Чукотка // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 86–90.

## GOLD-BISMUTH-TELLURIDE MINERALIZATION AT LOSIKHA PROSPECT, WESTERN CHUKCHI PENINSULA

Evgeniy A. Vlasov<sup>1</sup>✉, Yuri N. Nikolaev<sup>2</sup>, Ivan A. Baksheev<sup>3</sup>, Irina V. Balykova<sup>4</sup>,  
Sergey V. Kuzin<sup>5</sup>, Marina F. Vigasina<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; user420@geol.msu.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nikolaev@geol.msu.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; iab\_68@mail.ru

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; irin701@gmail.com

<sup>5</sup> Stenmix Holding Limited, Moscow, Russia; Sergey.Kuzin@russdragmet.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vigasina55@mail.ru

**Abstract.** This paper is focused on the gold-bismuth-telluride mineralization from the Losikha prospect in the Western Chukchi Peninsula, which exhibits many features similar to the intrusion related gold deposits. The mineralization includes mineral quartz-scheelite, sulfide, gold-bismuth-telluride (productive), and supergene assemblages. It is assumed that a high Te activity at the beginning of formation of productive assemblage resulted in the complete replacement of early native bismuth by Bi tellurides or directly to the crystallization of tellurobismuthite. The formation of Bi tellurides resulted in the absence of native bismuth and crystallization of high-fineness native gold rather than maldonite.

**Keywords:** Native gold, tellurides and sulfotellurides of bismuth, Losikha, Western Chukchi Peninsula

**For citation:** Vlasov E.A., Nikolaev Yu.N., Baksheev I.A., Balykova I.V., Kuzin S.V., Vigasina M.F. Mineralogy of gold-bismuth-telluride ores in Losikha prospect, Western Chukchi Peninsula. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 86–90 (In Russ.).

**Введение.** Чукотский автономный округ (ЧАО) является одним из лидеров по добыче золота в России. Ведущую роль играют вулканогенные золото-серебряные месторождения, расположенные в пределах Охотско-Чукотского вулканического пояса (Купол и др.), а также орогенные золото-кварцевые (Каральвеем) и золото-мышьяковые (Майское) месторождения. Другим потенциально

значимым источником золота являются месторождения, связанные с интрузивами гранитоидов, которые в отечественной литературе рассматриваются как плутоногенные, а в англоязычной получили название “intrusion related gold deposits” (IRGD). К данному типу, по многим признакам, можно отнести золоторудные объекты Стадухинского рудно-россыпного района, включая среднее по за-

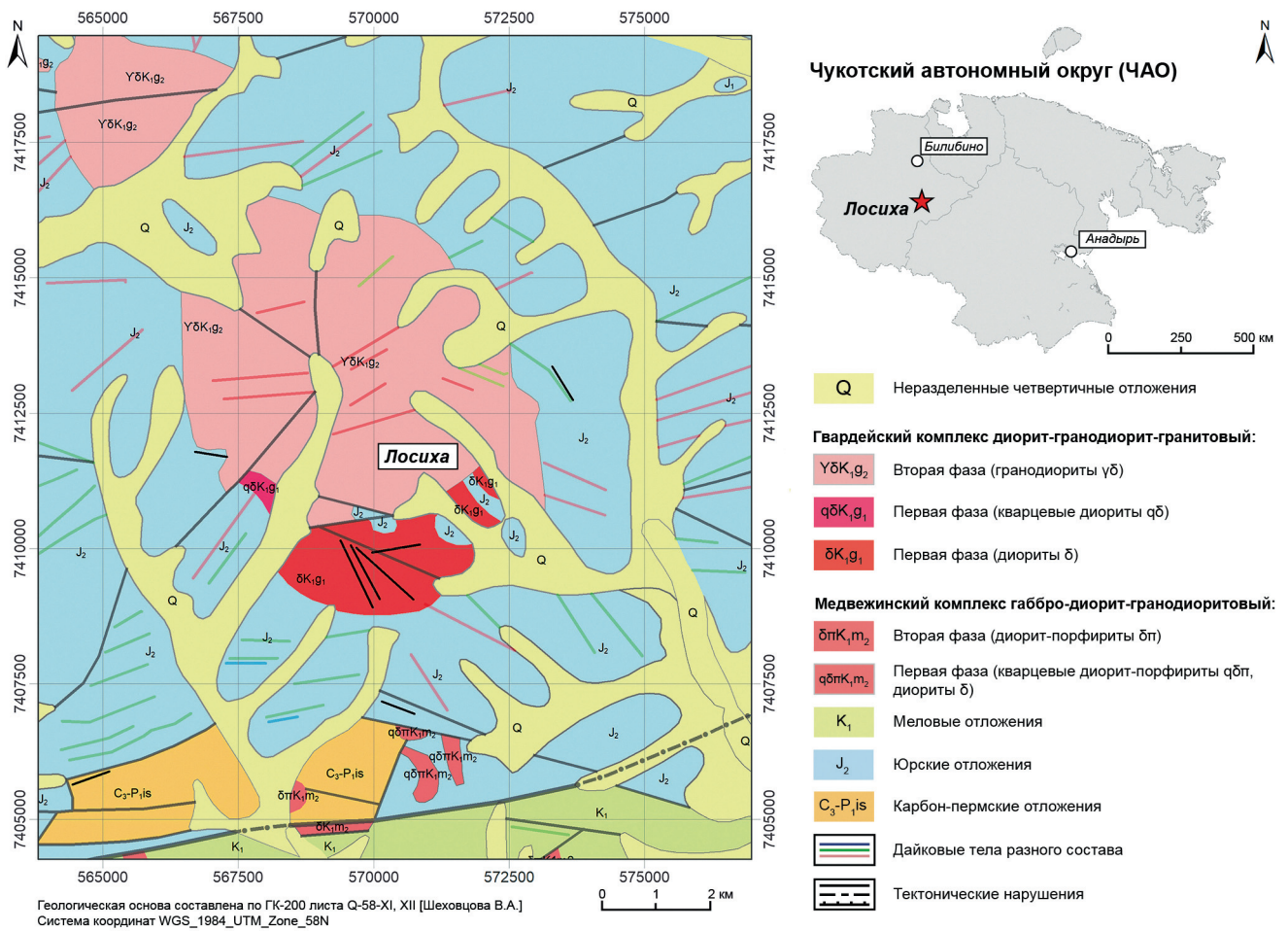


Рис. 1. Схема геологического строения рудопоявления Лосиха

пасам месторождение Кекура. Целью данной статьи является характеристика минерального состава руд золото-висмут-теллуридного проявления Лосиха, входящего в Стадухинский район.

**Геологическое строение.** Рудопоявление Лосиха расположено в Билибинском районе ЧАО (рис. 1). Оно относится к Стадухинскому рудно-россыпному району, выделенному в границах развития интрузивного магматизма и широко проявленной россыпной золотоносности в пределах Южно-Ануйской структурной зоны [Шеховцов, 2001]. Проявление приурочено к плутону пика Советской Гвардии (рис. 1), принадлежащего к дифференцированным массивам раннемелового гвардейского комплекса. Ранняя фаза внедрения представлена диоритами и кварцевыми диоритами, поздняя — гранодиоритами. По данным U-Pb датирования циркона возраст внедрения ранней и поздней фазы 110–112 и 97–101 млн лет соответственно [Шеховцов, 2001, Николаев и др., 2023]. Породы плутона пика Советской Гвардии прорывают среднеюрские осадочные толщи (песчаники, алевропесчаники, алевролиты) с прослоями туфов.

Рудопоявление Лосиха в структурном отношении представляет собой полосу дробления северо-западного простирания (протяженность около 800 м при ширине до 500 м) в диоритах с тонкими зонами

(мощность 0,5–1,5 м) кварцевого и карбонат-кварцевого прожилкования. Вмещающие диориты вне минерализованных зон гидротермальным изменением не затронуты.

**Методы исследования.** Изучение прозрачно-полированных шлифов и аншлифов в проходящем и отраженном свете проведено с помощью поляризационного оптического микроскопа «AxioPlan» фирмы «Carl Zeiss» с цифровой фотокамерой AxioCam MRc. Для получения изображений в отраженных электронах и проведения количественного анализа составов минералов использовался электронный микроскоп «Jeol» JSM-IT500 с энергодисперсионным спектрометром «Inca Energy-350» (Геологический факультет МГУ, кафедра петрологии и вулканологии, аналитики Н.Н. Коротаева, Ф.Д. Сандалов, В.О. Япаскурт). Определение составов минералов производилось при ускоряющем напряжении 20 кВ и постоянном токе электронного зонда 0,7 нА. Для оптимизации условий измерений (приведения условий анализа к условиям измерения стандартов) использовался металлический кобальт.

**Минеральный состав руд проявления Лосиха.** Рудные прожилки сложены массивным средне-крупнокристаллическим кварцем. В отдельных образцах отмечается слабо выраженная грубая полосчатость,

Т а б л и ц а

Химический состав (масс.%) теллуровисмутита (1–3), тетрадимита (4–6), ингодита (7), сульфоцумоита (8), жозеита-В (9) и пильзенита (10)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bi	50,87	52,94	50,62	59,65	58,89	55,76	66,90	69,61	75,37	68,85
Pb	–	–	–	–	–	–	2,08	–	–	–
Sb	0,61	–	1,84	–	0,33	3,13	–	–	–	–
S	–	–	–	4,50	4,25	4,33	5,30	3,31	2,72	–
Te	48,00	48,79	49,95	35,91	37,00	37,93	22,96	27,91	23,03	31,97
Сум- ма	99,47	101,72	102,41	100,06	100,46	101,16	97,24	100,83	101,13	100,81
Атомов на формулу										
Bi	1,95	1,99	1,87	2,02	1,99	1,84	1,90	3,05	4,03	3,98
Pb							0,06			
Sb	0,04		0,12		0,02	0,18				
S				0,99	0,94	0,93	0,98	0,95	0,95	
Te	3,01	3,01	3,02	1,99	2,05	2,05	1,07	2,00	2,02	3,02

Примечание: «–» — ниже предела обнаружения.

связанная с вариацией зернистости кварца. Второстепенные жильные минералы: кальцит, серицит, хлорит и гейландит-Са. Рудные минералы в прожилках распределены неравномерно (небольшими «пятнами», плохо выраженными полосами), их количество, как правило, не превышает 1 об.%. Проведенные исследования позволяют выделить кварц-шеелитовую, сульфидную, золото-висмут-теллуридную (продуктивную) и гипергенную минеральные ассоциации.

**Кварц-шеелитовая ассоциация.** Шеелит представлен редкими неправильной формы зернами (до 0,2 мм) в кварце; сростаний с другими рудными минералами он не образует. Предполагается, что шеелит является наиболее ранним рудным минералом проявления Лосиха.

**Сульфидная ассоциация** сложена арсенопиритом, халькопиритом, пирротинном, кубанитом и кобальтином. Арсенопирит образует редкие отдельные плохо ограненные кристаллы (50–150 мкм) в кварце. Кристаллы арсенопирита неоднородны по химическому составу: отношение S/As в одном кристалле и от кристалла к кристаллу варьирует от 0,87 до 1,14. Арсенопирит содержит Со (до 0,6 масс.%) и Sb (до 0,1 масс.%). Халькопирит представлен небольшими (до 150 мкм) изометричными вросками в кварце. Кобальтин, пирротин и кубанит редки. Кобальтин образует тонкие каймы вокруг выделений халькопирита, пирротин и кубанит встречены в виде отдельных зерен в жильном кварце. Кобальтин содержит примесь Ni (6,6 масс.%) и Fe (4,0 масс.%).

**Золото-висмут-теллуридная (продуктивная) ассоциация** включает теллуровисмутит, тетрадимит, самородное золото, более редкие галенит, висмутин, сульфоцумоит, жозеит-В, пильзенит, ингодит, фазы  $Bi_5Te_4$ ,  $Bi_4Te_5$ ,  $Bi_4Te_3S_2$ ,  $Bi_6Te_4S_3$  и  $(Bi,Pb)_6Te_5S_3$ .

Минералы образуют в жильном кварце ксеноморфные зерна, нередко они развиваются по трещинам в кварце, формируя уплощенные выделения. Следует отметить, что с ранними сульфидами и сульфидарсенидами минералы золото-висмут-теллуридной ассоциации сростаний не образуют.

В исследованных образцах наиболее распространены теллуровисмутит и тетрадимит; размер их выделений варьирует от 0,1 до 2 мм. Как правило, зерна теллуровисмутита замещаются более поздним тетрадимитом (рис. 2, а). Для теллуровисмутита характерна примесь Sb — до 1,8 масс.% (таблица, ан. 1,3). При замещении теллуровисмутита тетрадимит «наследует» эту примесь. В каймах тетрадимита отмечаются признаки его перекристаллизации. При этом минерал «очищается» от Sb с ее «отгонкой» к границам зерен, где концентрация Sb достигает 3,1 масс.% (таблица, ан. 4-6); такие участки на изображениях в отраженных электронах приобретают более темную окраску (рис. 2, а).

Сульфоцумоит, жозеит-В, пильзенит и ингодит в изученных образцах редки. Размер их выделений составляет 0,1–0,5 мм. Пильзенит и ингодит представлены единичными ксеноморфными зернами в кварце, иногда пильзенит вместе с самородным золотом образует сростки с фазой  $Bi_4Te_3S_2$ . Отмечается замещение ингодита жозеитом-В и фазой  $Bi_6Te_4S_3$ . Представительные химические составы ингодита, жозеита-В и пильзенита приведены в таблице. Помимо известных теллуридов и сульфотеллуридов Bi, в кварцевых жилах установлены разнообразные неназванные фазы, составы которых хорошо рассчитываются на формулы  $Bi_4Te_3S_2$ ,  $(Bi,Pb)_6Te_5S_3$ ,  $Bi_5Te_4$ ,  $Bi_4Te_5$  и  $Bi_6Te_4S_3$ . Первые две фазы, образующие уплощенные зерна размером до 0,5 мм с выраженной спайностью в одном направлении (рис. 2, б, г) наиболее распространены.

Сульфиды продуктивной ассоциации редки и представлены висмутином и галенитом. Первый образует редкие включения округлой формы (до 30 мкм) в кварце и содержит примесь Sb (до 2,0 масс.%). Сростаний с другими рудными минералами ассоциации висмутин не образует, поэтому определить его место в общем порядке отложения минералов затруднительно. Однако в некоторых образцах висмутин тяготеет к почти полностью окислившимся зернам сульфотеллуридов Bi, что позволяет предположить их синхронное отложение. Галенит слагает включения неправильной формы (до 10 мкм) в пильзените (рис. 2, г).

Самородное золото в большинстве случаев образует агрегаты с минералами Bi (рис. 2, б-г) или находится в продуктах их окисления. Помимо этого, свободное самородное золото отлагается в микротрещинах в жильном кварце; также тонкие зерна самородного золота встречаются в измененных обломках вмещающих пород, изредка отмечающихся в рудных прожилках. Как правило, выделения самородного золота имеют неправильные формы,

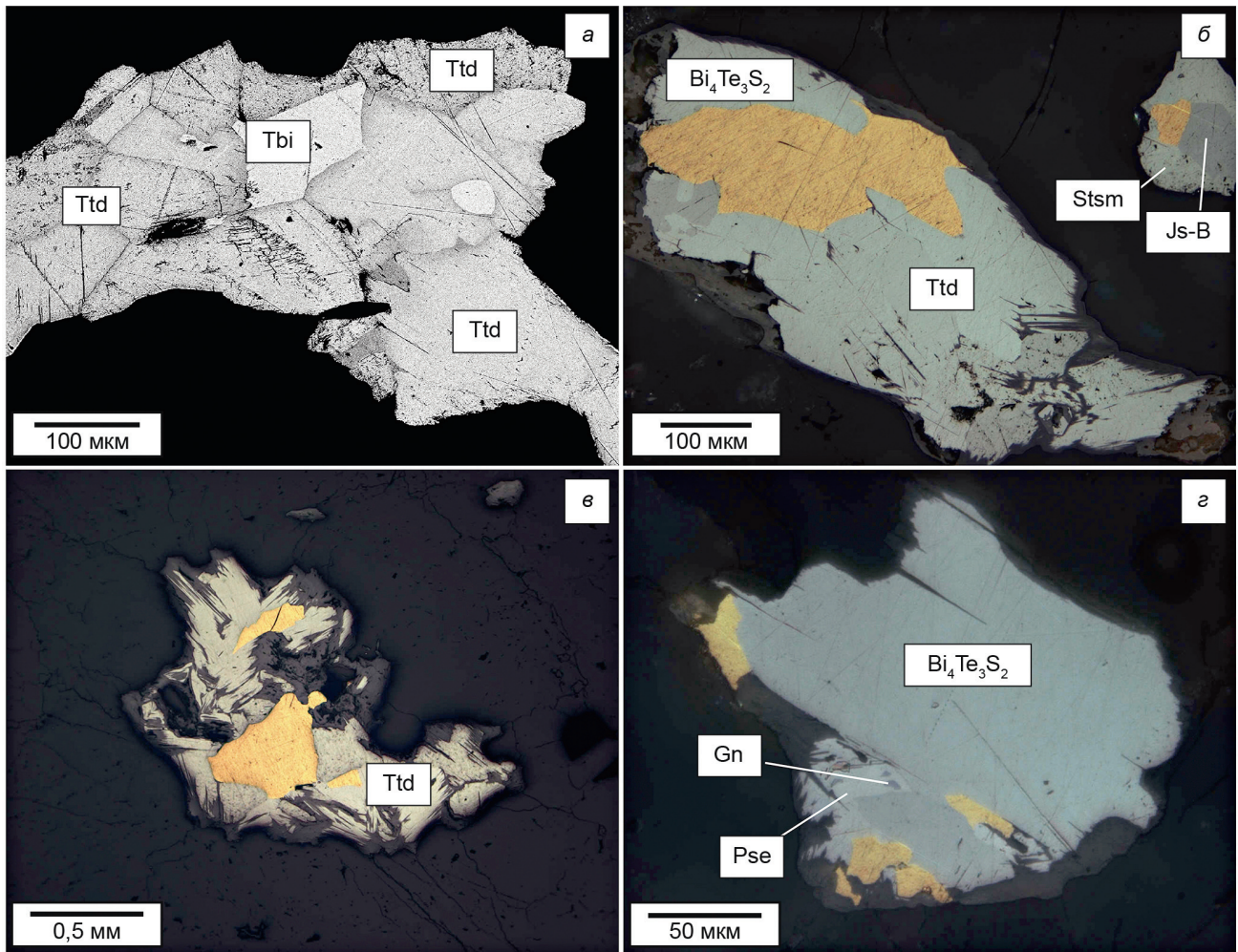


Рис. 2. Самородное золото и минералы висмута рудопроявления Лосиха: а — сросток теллуrowисмутита (Tbi) и тетрадимита (Ttd) в кварце; б — сростки тетрадимита, жозеита-В (Js-B), сульфоциноита (Stsm), фазы  $\text{Bi}_4\text{Te}_3\text{S}_2$  и самородного золота в кварце; в — самородное золото в сростании с тетрадимитом; г — пильзенит (Pse) с включениями галенита (Gn) и самородное золото развивающиеся на краю зерна минерала с составом  $\text{Bi}_4\text{Te}_3\text{S}_2$ . Фото в отраженных электронах (а), фото в отраженном свете при одном никеле (б-г)

их размер варьирует от 10 мкм до 1,5 мм. В случае сростаний с фазами состава  $(\text{Bi,Pb})_6\text{Te}_5\text{S}_3$  и  $\text{Bi}_4\text{Te}_3\text{S}_2$  золото приобретает уплощенную форму согласно их слоистой структуре. Пробность самородного золота в изученных образцах варьирует от 949 до 982 (в среднем 969 по 39 анализам), из примесей в минерале установлена только Cu (до 0,5 масс.%). Самородное золото однородно — в пределах одного зерна пробность меняется не более чем на 1–2 единицы. По составу свободное самородное золото в кварце и золото в сростаниях с минералами Bi не отличается друг от друга.

**Гипергенная ассоциация.** Гипергенные минералы Bi развиваются по плоскостям спайности в теллуридах и сульфотеллуридах Bi или формируют каймы замещения, нередко полностью замещая их. Как правило, гипергенные минералы Bi образуют тонкие минеральные смеси, что делает их диагностику затруднительной. Предварительно были определены пингвит, монтанит и эвлитин.

**Обсуждение и выводы.** Рудопроявление Лосиха по многим параметрам отвечает объектам, связанным с гранитоидными интрузивами (IRGD). Их от-

личительными особенностями являются: убогосульфидный или малосульфидный тип руд [Thompson et al., 1999], слабое проявление метасоматических околожильных образований, морфология рудных тел в виде системы тонких параллельных прожилков [Hart, 2007], широкое развитие минералов Bi — самородного висмута, мальдонита, висмутина, сульфотеллуридов и теллуридов Bi, Bi-Pb сульфосолей, тесная связь высокопробного золота с минералами Bi [Волков, Сидоров, 2018; McCoy et al., 1997, 2002; Hitchens, Orssich, 1995].

Шеелит, как ранний минерал, описан на ряде плутоногенных золото-висмутовых месторождений Северо-Востока России. Согласно работе [Vikent'eva et al., 2018] наличие в рудах шеелита указывает на относительно глубинные (более ~1 кбар) обстановки формирования проявления Лосиха.

Отложение минералов слабо проявленных кварц-шеелитовой и сульфидной ассоциаций предшествовало формированию продуктивной золото-висмут-теллуридной ассоциации. Наиболее ранним минералом последней является теллуrowисмутит, другие минералы Bi отлагались позднее, нередко

путем замещения теллурувисмутита. Их кристаллизация происходила на фоне увеличения активности сульфидной S, что привело к образованию сульфотеллуридов  $\text{Vi}$  и редких поздних сульфидов, включая висмутин. Подобная закономерность, но более выраженная, отмечается на других рудных объектах Стадухинского рудного района [Николаев, 2022]. Высокопробное самородное золото осаждалось на завершающем этапе формирования продуктивной ассоциации, видимо, совместно с жозеитом-В и совместно или несколько позднее — с сульфоцумоитом и фазами  $(\text{Bi,Pb})_6\text{Te}_5\text{S}_3$  и  $\text{Bi}_4\text{Te}_3\text{S}_2$ .

Обращает на себя внимание отсутствие в рудах мальдонита, характерного минерала месторождений IRGD-типа. Его появление связывают с реакцией золотоносных растворов с более ранним самородным висмутом [Спиридонов и др., 2022]. Изменение условий (в частности, увеличение активности сульфидной S) приводит к распаду мальдонита с образованием очень высокопробного (пробность близка к 1000) самородного золота и минералов  $\text{Vi}$ . Не исключено, что самородное золото проявления Лосиха могло сформироваться по такому механизму. Косвенным подтверждением этому является ассоциация самородного золота с разнообразными теллуридами и сульфотеллуридами  $\text{Vi}$ . Однако самородное золото высокой пробности наблюдается и вне агрегатов этих минералов, его пробность меняется в интервале 949–982 и оно может содержать примесь  $\text{Cu}$ . Данные факты позволяют рассматривать иной механизм образования высокопробного золота в рудах проявления и объяснить отсутствие

в них мальдонита. Предполагается, что высокая активность  $\text{Te}$  на начальном этапе формирования продуктивной ассоциации привела к полному замещению раннего самородного висмута теллуридами  $\text{Vi}$  или непосредственно к кристаллизации теллурувисмутита. Отсутствие в рудах самородного висмута может являться причиной отложения  $\text{Au}$  исключительно в самородной форме (без образования реакционного мальдонита) как в сростании с минералами  $\text{Vi}$ , так и в свободном виде. При этом  $\text{Ag}$ , присутствующее в небольшом количестве в растворах, распределялось в самородное золото, а не входило состав теллуридов (например, гессита), из-за большего сродства  $\text{Te}$  с  $\text{Vi}$ , чем с  $\text{Ag}$ , как это показано, например, в работе [Пиджян, 1967].

**Благодарности.** Химические составы минералов были получены в Центре коллективного пользования «Электронно-зондовый микроанализ минерального вещества» (Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, кафедра петрологии и вулканологии) при помощи микронзондового комплекса с комбинированной системой микроанализа на базе СЭМ JSM-IT500, приобретенного за счет средств «Программы развития Московского университета». Авторы выражают признательность Н.Н. Коротаевой, Ф.Д. Сандалову и В.О. Япаскурту за практическую помощь в проведении исследований.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке госбюджетной темы МГУ имени М.В. Ломоносова «Минералогическое изучение месторождений Арктической зоны России с целью их комплексного освоения» № ЦИТИС 121061600049-4.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Волков А.В., Сидоров А.А. Прогнозно-поисковая модель месторождений золота, связанных с интрузивами гранитоидов Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. 2018. № 3(31). С. 84–99.

Николаев Ю.Н. Сводный отчет по результатам поисковых и разведочных работ, выполненных в пределах Стадухинского рудно-россыпного района в период 2018–2022 гг. М., 2022.

Николаев Ю.Н., Балыкова И.В., Кузин С.В. и др. Состав, условия формирования, закономерности размещения и зональность золотого оруденения в Стадухинском рудно-россыпном районе (Западная Чукотка) // Руды и металлы. 2023. № 3. С. 87–105.

Пиджян Г.О. Закономерности распределения селена и теллура в рудах медно-молибденовых месторождений Армянской ССР // Известия АН Армянской ССР. 1967. Наука о Земле. № 5–6. С. 81–95.

Спиридонов Э.М., Кривицкая Н.Н., Кочетова К.Н. и др. Мальдонит и продукты его замещения — беспримесное золото, джонасонит, висмутистый аурустибит в золотых рудах месторождения Дарасун (Восточное Забайкалье) // Записки российского минералогического общества. 2022. Ч. CLI. № 2. С. 1–22.

Шеховцов В.А. Отчет о геологическом доизучении ранее заснятых площадей масштаба 1:200 000 листов Q-58-XI, XII, XVII, XVIII (Стадухинская геологосъемочная партия). Билибино, 2001.

Hart C.J.R. Reduced intrusion-related gold systems // Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Spec. Publ. 2007. № 5. P. 95–112.

Hitchins A.C., Orssich C.N. The Eagle zone gold-tungsten sheeted vein porphyry deposit and related mineralization, Dublin Gulch, Yukon Territory: Canadian Institute of Mining and Metallurgy. 1995. Special Volume 46. P. 803–810.

McCoy D., Newberry R.J., Layer P.W., et al. Plutonic-related gold deposits of interior Alaska // Economic Geology. 1997. 9. P. 191–241.

McCoy D., Newberry R.J., Severin K., et al. Paragenesis and metal associations in interior Alaska gold deposits: An example from the Fairbanks district // Mining Engineering. 2002. Vol. 54. № 1. P. 33–38.

Thompson J.F.H., Sillitoe R.H., Baker T., et al. Intrusion related gold deposits associated with tungsten-tin provinces // Mineral. Dep. 1999. 34. P. 323–334.

Vikent'eva O.V., Prokofiev V.Yu., Gamyagin G.N., et al. Intrusion-related gold-bismuth deposits of North-East Russia: PTX parameters and sources of hydrothermal fluids // Ore Geol. Rev. 2018. Vol. 102. P. 240–259.

Статья поступила в редакцию 12.09.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 549

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-91-96

## АДСОРБЦИЯ КАДМИЯ НА ТАЛЬКЕ (КИНЕТИКА И РАВНОВЕСИЕ)

Ольга Николаевна Карасева<sup>1</sup>✉, Дмитрий Александрович Ханин<sup>2</sup>,  
Леонид Зиновьевич Лакштанов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского, Черноголовка, Россия; olga@iem.ac.ru ✉

<sup>2</sup> Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского, Черноголовка, Россия; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; mamontenok49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0463-0731>

<sup>3</sup> Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С. Коржинского, Черноголовка, Россия; leonid@iem.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2878-0884>

**Аннотация.** Исследована адсорбция ионов кадмия на поверхности природного талька. Получены зависимости величины адсорбции от pH раствора при 25 °С. Показано, что максимальное поглощение кадмия из раствора происходит при pH 7–8. Адсорбция наиболее интенсивно протекает в первые 5 мин, адсорбционное равновесие устанавливается примерно через 40 мин после контакта минерал/раствор. Установлен вклад в общую скорость процесса стадии химического взаимодействия ионов кадмия с поверхностью талька, что подтверждается соответствием экспериментальных данных и кинетической моделью псевдо-второго порядка. Изотермы адсорбции наиболее адекватно описываются моделью Фрейндлиха, что указывает на неоднородность поверхностных адсорбционных центров, обладающих различной энергией. Эффективное поглощение тальком ионов кадмия обуславливает возможность использования талька в качестве сорбента для очистки природных и промышленных сточных вод в широком диапазоне pH.

**Ключевые слова:** адсорбция, кадмий, тальк, кинетика, изотермы адсорбции

**Для цитирования:** Карасева О.Н., Ханин Д.А., Лакштанов Л.З. Адсорбция кадмия на тальке (Кинетика и равновесие) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 91–96.

## CADMIUM ADSORPTION ON TALC (KINETICS AND EQUILIBRIUM)

Olga N. Karaseva<sup>1</sup>✉, Dmitriy A. Khanin<sup>2</sup>, Leonid Z. Lakshtanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, Russia; olga@iem.ac.ru ✉

<sup>2</sup> D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, Russia; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; mamontenok49@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0463-0731>

<sup>3</sup> D.S. Korzhinskii Institute of Experimental Mineralogy, Chernogolovka, Russia; leonid@iem.ac.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2878-0884>

**Abstract.** The adsorption of cadmium ions on the surface of natural talc was studied. The dependences of the adsorption value on the pH of the solution at 25 °C were obtained. It was shown that the maximum absorption of cadmium from the solution occurs at pH 7–8. Adsorption is most intense in the first 5 min, the adsorption equilibrium is established approximately 40 min after the mineral/solution contact. The contribution of the stage of chemical interaction of cadmium ions with the talc surface to the overall rate of the process was established, which is confirmed by the agreement between the experimental data and the pseudo-second-order kinetic model. Adsorption isotherms are most adequately described by the Freundlich model, which indicates the heterogeneity of the surface adsorption centers with different energies. The effective sorption of cadmium ions by talc makes it possible to use talc as a sorbent for the purification of natural and industrial wastewater in a wide pH range.

**Keywords:** adsorption, cadmium, talc, kinetics, adsorption isotherms

**For citation:** Karaseva O.N., Khanin D.A., Lakshtanov L.Z. Adsorption of cadmium on talc (kinetics and equilibrium). *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 91–96. (In Russ.).

**Введение.** Загрязнение воды — серьезнейшая экологическая проблема современности, угрожающая здоровью живых организмов. Одними из наиболее токсичных загрязнителей являются ионы тяжелых металлов, которые накапливаются в почвах, отложениях, поверхностных и грунтовых водах, тем самым вызывая серьезный экологический кризис. Кадмий Cd (II) является одним из наиболее токсичных тяжелых металлов, который может накапливаться в организме человека и вызывать за-

болевания почек, костей и легких [Mehta et al., 2015; Mehta et al., 2016; Paesano et al., 2020; Sun et al., 2020].

Кадмий в условиях окружающей среды обычно присутствует в виде  $Cd^{2+}$ , и адсорбция Cd(II) на экологически значимых субстратах может снизить его концентрацию и подвижность в водных системах.

Основными кадмий-содержащими минералами, помимо собственно кадмия являются, такие широко распространенные минералы, как галенит, пирит и сфалерит. Обычно они встречаются в подавляю-

щей массе обрабатываемых золоторудных месторождений, где ассоциируют с тальк-карбонатными метасоматитами (Сухоложское, Вернинское, Берёзовское и Кочкарское месторождения). Рудная часть на этих месторождениях подвергается глубокому переделу с целью извлечения золота и других благородных металлов. В ходе процесса извлечения расходуется большое количество воды, которая сливается в шламоотстойники, часто естественным путем, тем самым контактируя с ювенильными водами и разгружая в них различные химические элементы в том числе и кадмий. При обогащении рудной составляющей тальк вместе с другими нерудными минералами накапливается в большом количестве в хвостохранилищах и остается там без использования долгие десятилетия, хотя мог бы использоваться в качестве эффективного барьера по ограничению подвижности кадмия. Тальк, как глинистый минерал, за счет своей слоистой структуры обладает достаточно высокой адсорбционной способностью и может быть потенциальным аккумулятором кадмия.

Эффективные методы удаления кадмия, такие как адсорбция на глинистых минералах, активно изучаются благодаря низкой стоимости и доступности материалов. Глинистые минералы повсеместно распространены в геосфере и считаются доминирующими поглотителями Cd(II) в водных средах [Oakley et al., 1981]. Адсорбция кадмия была детально исследована на многих минералах (серпентин, каолинит, палыгорскит и др. [Hamidpour et al., 2019; Cao et al., 2017; Wang et al., 2016; Ruyter-Hooley et al., 2017; Hizal et al., 2006; Fu et al., 2012]), кроме талька, которому посвящено только одно исследование [Huang, Fuerstenau, 2001], где изучено влияние адсорбции кадмия на электроповерхностные свойства и устойчивость суспензии талька. Кроме того, данные по адсорбции кадмия [Huang, Fuerstenau, 2001] выше pH 8,7, по видимому, относятся к осаждению Cd(OH)<sub>2</sub>s.

Таким образом, учитывая близость нахождения потенциальных источников кадмия и талька, приуроченных к золоторудным месторождениям, мы предприняли попытку всестороннего изучения адсорбции кадмия на тальке с дальнейшими выводами об эффективности использования талька в качестве барьера для миграции кадмия в природных водах. Для понимания механизмов адсорбции кадмия на тальке были исследованы кинетика и равновесие адсорбции в широком диапазоне pH и концентрации кадмия.

**Объекты и методы исследования.** В качестве адсорбента использовался природный тальк Шабровского месторождения Среднего Урала. Минеральный состав был подтвержден с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре D2 Phaser (Bruker). По результатам микронзондового анализа усредненная формула талька имеет вид  $(Mg_{2,85}Al_{0,04}Fe_{0,01})_{2,90}Si_{4,02}O_{10}(OH)_2$ . В тальке отмечается незначительная примесь Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 1,7 мас.%, FeO до 0,5 мас.%, содержания Ca, V, Cr, Mn, Ni, Co,

Zn ниже предела обнаружения, который больше 0,2 мас.% на элемент.

Подготовка порошка талька с размером частиц 30–100 мкм подробно описана в работе Карасевой с соавторами [2024]. Величины удельной поверхности талька были измерены низкотемпературным методом БЭТ по адсорбции азота с использованием сорбционного анализатора QUADRASORB SI (Федеральный исследовательский центр проблем физической химии и медицинской химии РАН) и составили 6,1 м<sup>2</sup>/г.

При проведении экспериментов использовались 0,01 М растворы HCl и NaOH. Раствор HCl готовили из стандарт-титра *соляной кислоты* 0,1 н (осч), а раствор NaOH — путем растворения навески твердого NaOH (осч) и стандартизации раствора по известной концентрации HCl. Исходный раствор Cd<sup>2+</sup> (0,1 М) был приготовлен из реактива Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · xH<sub>2</sub>O (ООО «Баум-Люкс»). Растворы с меньшими концентрациями металла готовили разбавлением исходного с приведением к ионной силе 0,01 М.

Исследования зависимости адсорбции Cd<sup>2+</sup> на тальке от pH раствора проводили методом потенциометрических титрований при 25 °С. Для этого в герметичную термостатируемую ячейку, в отверстия крышки которой были вставлены комбинированный электрод и трубка для подачи аргона, помещали 100 мл 0,01 М NaCl, добавляли 2 мл 0,01 М HCl и навеску талька массой 0,2–1,0 г. При интенсивном перемешивании суспензии и после установления pH 3,9–4,1 добавляли аликвоту 1 мМ раствора, содержащего Cd<sup>2+</sup> (I=0,01 М). Начальная концентрация кадмия в растворе составляли от 0,1 до 10 мкмоль/л. Через 40 минут отбирали аликвоту исследуемой суспензии и проводили титрование путем добавления 0,01 М NaOH с одновременным отбором проб с шагом 40 минут. Как будет показано ниже, в течение этого времени происходит установление адсорбционного равновесия. В ходе опыта применялась продувка ячейки аргоном для предотвращения попадания атмосферной углекислоты.

При изучении кинетики адсорбции ионов кадмия на поверхности талька в термостатируемую ячейку помещали 100 мл 0,01 М NaCl, добавляли 0,5 г талька, с помощью HCl или NaOH при постоянном перемешивании доводили раствор до нужного pH в диапазоне от 6 до 8,5 и вводили аликвоту раствора Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>. Исходная концентрация кадмия в растворе задавалась от 10<sup>-7</sup> до 10<sup>-5</sup> М. Пробы отбирали через определенные промежутки времени после начала контакта фаз: через 2, 20, 40 и 120 минут.

Концентрацию Cd в растворе после центрифугирования измеряли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Относительная погрешность метода 5%.

Состав раствора и показатели насыщения рассчитывались с помощью программы PHREEQC [Parkhurst and Appelo, 1999].

**Обработка данных.** Для описания изотерм адсорбции и расчетов параметров адсорбционного

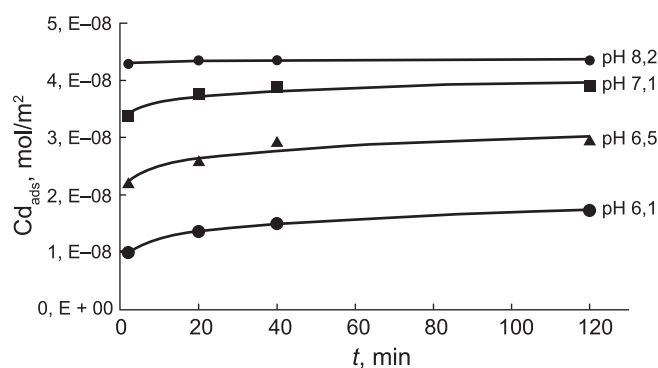


Рис. 1. Кинетика адсорбции кадмия на тальке при разных рН раствора. Исходные концентрации ионов кадмия 0,97–1,33 μmol/L, T = 25 °C

равновесия были использованы модели Ленгмюра и Фрейндлиха. Модель Ленгмюра предполагает, что на поверхности сорбента образуется мономолекулярный слой адсорбата, а все активные центры обладают равной энергией [Douven et al., 2015; Paez et al., 2011]. Уравнение Ленгмюра имеет следующий вид:

$$q = \frac{K_L Q_{\max} c}{1 + K_L c}, \quad (1)$$

где  $q$  — величина адсорбции,  $Q_{\max}$  — величина предельной адсорбции,  $K_L$  — константа адсорбционного равновесия,  $c$  — равновесная концентрация ионов.

Модель Фрейндлиха применяется для описания адсорбции на гетерогенной поверхности, адсорбционные центры которой обладают различными величинами энергии, поэтому в первую очередь происходит заполнение активных центров с максимальной энергией [Douven et al., 2015; Paez et al., 2011]. Уравнение Фрейндлиха можно представить в виде:

$$q = K_F c^{1/n}, \quad (2)$$

где  $q$  — величина адсорбции,  $K_F$  — константа Фрейндлиха, характеризующая адсорбционную емкость,  $1/n$  — интенсивность адсорбции, которая определяет энергию и неоднородность адсорбционных центров.

Для описания кинетических закономерностей адсорбции было использовано уравнение псевдо-второго порядка Хо и Маккея [Ho, McKay, 1999], которое может быть представлено в интегрированной форме следующим образом:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{kq_e^2} + \frac{t}{q_e}, \quad (3)$$

где  $k$  — это константа скорости, г/мг мин, где  $q_e$  и  $q_t$  — количество металла, сорбированное при равновесии и за определенный промежуток времени  $t$  (мин), мг/г.

**Результаты экспериментов и их обсуждение.** На рис. 1 представлены кинетические кривые адсорбции ионов кадмия на тальке в виде зависимости количества поглощенного кадмия ( $Cd_{ads}$ , mol/m<sup>2</sup>) от

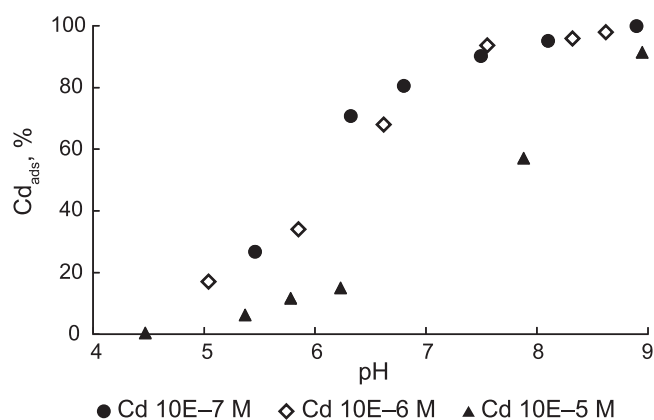


Рис. 2. Зависимость адсорбции кадмия на тальке от рН при 25 °C. Концентрация суспензии 5 г/л

времени ( $t$ , мин) в интервале рН 6–8. Адсорбция  $Cd^{2+}$  с высокой скоростью протекает в первые 1–5 минут, равновесие достигается примерно через 40–60 минут после начала контакта минерал/раствор. В связи с этим, при проведении кислотно-основных титрований поверхности талька отбор пробы и введение новой порции раствора щелочи производили через каждые 40 минут.

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе потенциометрических титрований показал, что адсорбция ионов кадмия ( $Cd$ , %) увеличивается с ростом рН раствора, что типично для адсорбции катионов (рис. 2).

Из литературных данных известно [Burdukova et al., 2007], что рН точки нулевого заряда поверхности талька приблизительно равен 7,7. Таким образом, адсорбция катионов  $Cd$  происходит преимущественно в области ниже  $pH_{\text{ТНЗ}}$ , где преобладают положительно заряженные поверхностные группы, участвующие в адсорбционном взаимодействии. Очевидно, что в данном случае вклад электростатических сил в процесс адсорбции минимален, поэтому можно предположить, что поглощение ионов кадмия происходит за счет его хемосорбции на поверхности с образованием прочных ковалентных связей.

Для описания вклада химического взаимодействия в общую скорость процесса, была применена модель реакций псевдо-второго порядка [Ho, McKay, 1999], которая позволяет учитывать взаимодействия сорбат–сорбент, а также межмолекулярные взаимодействия адсорбированных частиц. Если модель кинетики скорости псевдо-второго порядка (уравнение 3) применима для сорбционного процесса, то построение в координатах « $t/q_t$  —  $t$ » должно иметь линейную зависимость, из которой по тангенсу угла наклона и свободному члену уравнения (3) можно вычислить  $q_e$  и  $k$  [Хамизов, 2020]. Как видно на рис. 3, полученные зависимости являются прямолинейными при всех рН и во всем диапазоне времени процесса адсорбции.

На основании полученных графических зависимостей (рис. 3) были рассчитаны константы

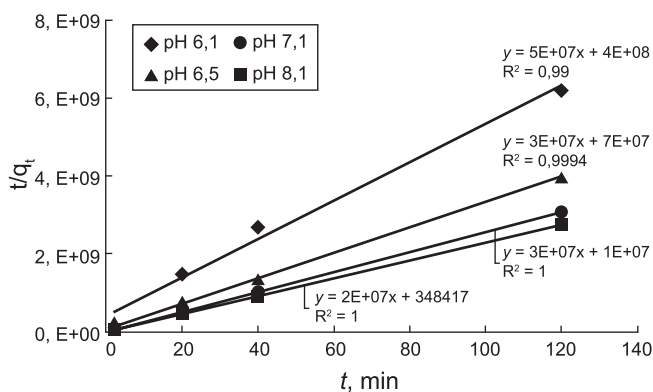


Рис. 3. Кинетика адсорбции ионов  $\text{Cd}^{2+}$  в координатах уравнения псевдо-второго порядка.  $T = 25^\circ\text{C}$

скорости процесса  $k$  и значения равновесной адсорбции  $q_e$ . Экспериментальные данные по кинетике адсорбции  $\text{Cd}^{2+}$  на природном тальке и результаты расчетов представлены в табл. 1. Нужно отметить, что расчетные значения  $q_e$  дают хорошие совпадения с экспериментальными данными.

Таблица 1

Кинетические параметры процесса адсорбции ионов кадмия

pH	Исходная концентрация $\text{Cd}$ , $\times 10^{-8}$ моль/м <sup>2</sup>	Равновесная величина адсорбции $q_e \times 10^{-8}$ , моль/м <sup>2</sup>		$k$ , м <sup>2</sup> /моль мин	$R^2$
		эксперимент	расчет		
6,1	3,20	1,94	2,0	$6,3 \cdot 10^6$	0,99
6,5	3,73	3,01	3,33	$1,3 \cdot 10^7$	0,99
7,1	4,26	3,90	3,33	$9,0 \cdot 10^7$	1,0
7,5	4,00	3,84	3,33	$2,3 \cdot 10^8$	1,0
8,1	4,36	4,35	5,00	$1,1 \cdot 10^9$	1,0

Таким образом, высокие значения коэффициентов корреляции ( $R^2 \geq 0,99$ ; табл. 1) и линейная зависимость (рис. 3) позволяют судить в пользу применимости модели псевдо-второго порядка для описания химической стадии процесса адсорбции, а также для возможности учета межмолекулярных взаимодействий в системе « $\text{Cd}^{2+}$  — тальк».

Как показано на рис. 2, максимальная адсорбция кадмия на тальке при заданных исходных концентрациях ионов металла происходит при pH 7–8. Экспериментальные данные, полученные в ходе кислотно-основных титрований суспензии талька, относящиеся к данному интервалу pH, были использованы для описания изотерм адсорбции и расчетов параметров адсорбционного равновесия с применением уравнений Ленгмюра и Фрейндлиха. Процесс адсорбции кадмия на тальке не описывается моделью Ленгмюра, о чем свидетельствуют низкие значения коэффициентов корреляции  $R^2$  (0,6–0,8).

На рис. 4 представлены изотермы адсорбции ионов кадмия из водных растворов с исходной

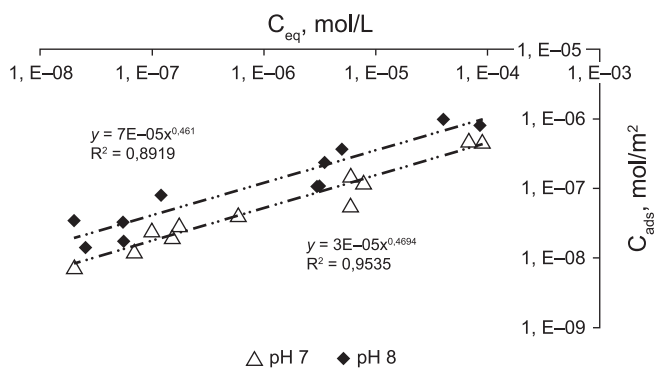


Рис. 4. Изотермы адсорбции ионов кадмия на природном тальке по модели Фрейндлиха при  $25^\circ\text{C}$

концентрацией от 0,1 до 10 мкмоль/л при pH 7–8 на природном тальке в логарифмических координатах уравнения Фрейндлиха, в котором величина  $C_{ads}$  (mol/m<sup>2</sup>) была рассчитана следующим образом:

$$C_{ads} = \frac{C_0 - C_{eq}}{S \cdot l}, \quad (4)$$

где  $C_{ads}$  — равновесная концентрация ионов кадмия в твердой фазе, mol/m<sup>2</sup>,  $C_0$  — исходная концентрация кадмия в растворе, mol/L,  $C_{eq}$  — равновесная концентрация кадмия в растворе, mol/L,  $S$  — удельная поверхность талька, м<sup>2</sup>/г,  $l$  — концентрация суспензии талькового порошка, г/L.

Значения коэффициентов корреляции  $R^2$  (0,89 и 0,95) свидетельствуют об адекватном описании экспериментальных данных изотермой Фрейндлиха, предполагающей, что поверхность природного талька содержит активные центры с различной энергией сродства к ионам кадмия. Кадмий, вероятно, адсорбируется на плоскости Mg-OH, образуя прочные ковалентные связи, в то время как адсорбция на Si-O центрах связана только с электростатическим притяжением с образованием слабых внешнесферных комплексов [Pivovarov, 2008; Wang et al., 2023].

Константы уравнения Фрейндлиха  $K_F$  и  $n$ , представленные в табл. 2, были рассчитаны из наклона и пересечения прямой с осью ординат.

Таблица 2

Значения констант в уравнениях изотермы Фрейндлиха для адсорбции ионов кадмия на тальке при  $25^\circ\text{C}$

pH	$K_F$ , mol/m <sup>2</sup> · 10 <sup>5</sup>	1/n	Коэффициент корреляции, $R^2$
7	3,43	0,469	0,954
8	6,78	0,461	0,892

Величина  $K_F$  существенно зависит от pH раствора, в то время как параметр  $1/n$ , указывающий на интенсивность адсорбционного процесса и распределение активных центров, остается практически неизменным. Значение  $1/n$  приблизительно равно 0,5, что свидетельствует о высоком сродстве по-

верхности талька к ионам кадмия. При увеличении pH раствора на 1, величина  $K_F$  возрастает примерно в два раза, что, согласуется с увеличением адсорбции кадмия при увеличении pH (рис. 2).

Коэффициент  $K_F$  в уравнении изотермы Фрейндлиха является по сути аналогом обычного коэффициента распределения ( $K_d = C_{ads}/C$ ), зависящего от pH. Наблюдаемая высокая корреляция значений  $K_d$  с pH раствора подразумевает простую связь между относительной подвижностью этих металлов и pH водоносного слоя.

Значения  $K_d$  можно упрощенно связать с относительной скоростью миграции (скоростью кадмия,  $V_{Cd}$ , относительно скорости потока воды в порах,  $V_w$ ) по формуле (Freeze, Cherry, 1979):

$$\frac{V_{Cd}}{V_w} = \left( 1 + \frac{\rho}{\varepsilon K_d} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность материала водоносного горизонта,  $\varepsilon$  — пористость.

На рис. 5 показано, что подвижность кадмия экспоненциально уменьшается с ростом pH и очень ограничена в водоносных горизонтах с высоким содержанием талька. Даже при pH 5 относительная скорость кадмия составляет около 1%, а при более высоких значениях pH гораздо меньше. Относительная скорость миграции уменьшается примерно в 6–7 раз при увеличении pH на единицу.

**Заключение.** Адсорбция кадмия на тальке показывает типичное поведение для адсорбции катионов: быстрое увеличение процента адсорбции, от незначительной до почти полной, в достаточно узком интервале pH 5–7. При увеличении концентрации кадмия интервал pH адсорбции существенно увеличивается.

Результаты исследования показывают, что адсорбционное равновесие описывается изотермой Фрейндлиха, предполагающей, что на поверхности талька содержатся активные центры с различной энергией сродства к ионам кадмия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Карасева О., Лакишанов Л., Ханин Д. и др. Влияние pH, CO<sub>2</sub> и органических лигандов на кинетику растворения талька и лизардита // Геохимия. 2024. Т. 69, № 4. С. 393–403.

Карасева О., Лакишанов Л., Ханин Д. и др. Кинетика растворения талька в присутствии органических комплексообразователей // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 3. С. 59–64.

Хамизов Р. О кинетическом уравнении псевдо-второго порядка в сорбционных процессах // Журнал физической химии. 2020. Т. 94, № 1. С. 125–130.

Burdukova E., Becker M., Bradshaw D., et al. Presence of negative charge on the basal planes of New York talc // Journal of Colloid and Interface Science. 2007. V. 315. P. 337–342.

Cao C., Liang C., Yin Y., et al. Thermal activation of serpentine for adsorption of cadmium // Journal of Hazardous Materials. 2017. Vol. 329. P. 222–229.

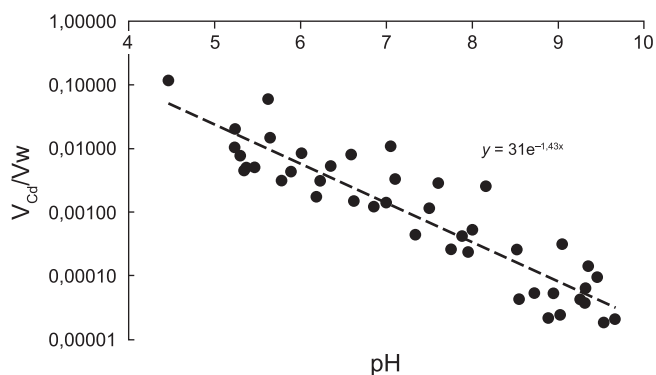


Рис. 5. Относительная скорость миграции кадмия, как функция pH. Символы • — рассчитанные по уравнению (4) ( $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ,  $\varepsilon = 0,3$ ) значения относительной подвижности кадмия из экспериментально полученных значений  $K_d$  для всех концентраций кадмия и концентраций суспензии. Пунктирная прямая — линейная аппроксимация

Адсорбционное равновесие устанавливается в течение 40 минут. Адсорбция ионов кадмия на тальке подчиняется кинетической модели псевдо-второго порядка, и лимитирующей стадией адсорбционного процесса является химическое взаимодействие между ионами кадмия и функциональными группами на поверхности талька с образованием прочных ковалентных связей.

При pH > 5 подвижность кадмия в водоносных горизонтах с высоким содержанием талька сильно ограничена. Эффективное поглощение тальком ионов кадмия обуславливает возможность использования талька в качестве сорбента для очистки природных и промышленных сточных вод в широком диапазоне pH.

**Финансирование.** Исследования выполнены за счет средств Российского научного фонда, проект № 22-27-00035. Аналитические работы выполнены в рамках госбюджетной темы «Экспериментальное и теоретическое моделирование растворимости и форм переноса компонентов во флюидно-магматических и гидротермальных системах (№ FMUF-2022-0003).

Douven S., Paez C., Gommès C. The range of validity of sorption kinetic models // Journal of Colloid and Interface Science 2015. Vol. 448. P. 437–450.

Freeze R.A., Cherry J.A. Groundwater // Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs. 1979. Vol. 7632. P. 604.

Fu C., Zhu X., Dong X., Zhao P., et al. Study of adsorption property and mechanism of lead(II) and cadmium(II) onto sulfhydryl modified attapulgite // Arabian Journal of Chemistry. 2012. Vol. 14. P. 1–10.

Hamidpour M., Karamooz M., Akhgar A., et al. Adsorption of Cadmium and Zinc onto Micaceous Minerals: Effect of Siderophore Desferrioxamine // Pedosphere. 2019. Vol. 29. P. 590–597.

Hizal J., Apak R. Modeling of cadmium (II) adsorption on kaolinite-based clays in the absence and presence of humic acid // Applied Clay Science. 2006. Vol. 32. P. 232–244.

Ho Y.S., McKay G. Pseudo-second order model for sorption processes // *Process Biochemistry*. 1999. Vol. 34. P. 451–465.

Huang P., Fuerstenau D. The effect of the adsorption of lead and cadmium ions on the interfacial behavior of quartz and talc // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2001. Vol. 177. P.147–156.

Mehta V., Basu H., Singhal R., et al. Simple and sensitive colorimetric sensing of Cd<sup>2+</sup> ion using chitosan dithiocarbamate functionalized gold nanoparticles as a probe // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2015. Vol. 220. P. 850–858.

Mehta J., Bhardwaj S., Bhardwaj N., et al. Progress in the biosensing techniques for trace-level heavy metals // *Biotechnology Advances*. 2016. Vol. 34. P. 47–60.

Oakley A. Interviewing women: A contradiction in terms? // *Doing Feminist Research* / Ed. H. Roberts. London: Routledge and Kegan Paul, 1981. P. 30–61.

Paesano L., Marmiroli M., Bianchi M., et al. Differences in toxicity, mitochondrial function and miRNome in human cells exposed in vitro to Cd as CdS quantum dots or ionic Cd // *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. P. 1–15.

Paez C., Lambert S., Poelman D., et al. Improvement in the methylene blue adsorption capacity and photocatalytic activity of H<sub>2</sub>-reduced rutile-TiO<sub>2</sub> caused by Ni(II)porphyrin preadsorption // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2011. Vol. 106. P. 220–227.

Parkhurst D., Appelo C. User's Guide to PHREEQC (Version 2) — A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations // U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report. 99–4259; Washington DC. 1999. P. 327.

Pivovarov S. Adsorption of ions onto amorphous silica: Ion exchange model // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2008. Vol. 319. P. 374–376.

Ruyter-Hooley M., Johnson B., Morton D., et al. The adsorption of myo-inositol hexaphosphate onto kaolinite and its effect on cadmium retention // *Applied Clay Science*. 2017. Vol. 135. P. 405–413.

Sun Y., Ye H., Wei Z., et al. Root cell walls and phytochelatins in low-cadmium cultivar of *Brassica parachinensis* // *Pedosphere*. 2020. Vol. 30. P. 426–432.

Wang X., Huang Y., Zhong Z., et al. Theoretical investigation of cadmium vapor adsorption on kaolinite surfaces with DFT calculations // *Fuel*. 2016. Vol. 166. P. 333–339.

Wang Z., Tian H., Liu J., et al. Cd(II) adsorption on earth-abundant serpentine in aqueous environment: Role of interfacial ion specificity // *Environmental Pollution*. 2023. Vol. 331. 121845.

Статья поступила в редакцию 31.10.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 55; 504.05; 504.5

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-97-107

## ОСОБЕННОСТИ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Виктор Титович Трофимов<sup>1</sup>, Марина Анатольевна Харьковина<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; trofimov@rector.msu.ru

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; kharkina@mail.ru ✉

**Аннотация.** Описаны виды техногенных воздействий оборонно-промышленных комплексов на компоненты эколого-геологических систем (ЭГС). Дана характеристика абиотических компонент ЭГС оборонно-промышленных комплексов, включающая информацию по технолитотопам и техноэдафотопам. На конкретных примерах показано влияние абиотических компонент ЭГС территорий военно-производственных комплексов, военных складов и испытательных полигонов России и сопредельных государств на биотические компоненты ЭГС, включая техномикроценоз, технофитоценоз и технозооценоз. Показано, что изменения в абиотической части ЭГС оборонно-промышленных комплексов приводят к снижению численности микроорганизмов и подавлению жизненных процессов у растений при загрязнении грунтов и почв ракетным топливом, к тугоухости летчиков истребительно-бомбардировочной авиации при возникновении техногенных акустических аномалий, к гибели людей и всего живого при возникновении техногенных температурных аномалий и последующих пожарах при взрывах при взлете ракет-носителей.

**Ключевые слова:** технолитотоп, техноэдафотоп, техномикроценоз, технофитоценоз, технозооценоз, военные полигоны, взрывы, почвы, грунты, подземные воды, загрязнение, акустические аномалии, температурные аномалии

**Для цитирования:** Трофимов В.Т., Харьковина М.А. Особенности эколого-геологических систем оборонно-промышленных комплексов на территории России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 97–107.

## PECULIARITIES OF ECOLOGICAL-GEOLOGICAL SYSTEMS OF DEFENSE -INDUSTRIAL COMPLEXES IN RUSSIA

Viktor T. Trofimov<sup>1</sup>, Marina A. Kharkina<sup>2</sup>✉

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; trofimov@rector.msu.ru

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, kharkina@mail.ru ✉

**Abstract.** The types of technogenic impacts of defense-industrial complexes on the components of ecological-geological systems (EGS) are described. Abiotic components of EGS of defense-industrial complexes are characterized, including information on technolithotopes and technoedaphotopes. Specific examples are used to demonstrate the influence of abiotic components of EGS of military-production complexes, military depots, and test sites in Russia and neighboring countries on the biotic components of EGS, including technomicrocoenosis, technophytocoenosis, and technozoocenosis. It has been shown that changes in the abiotic part of the EGS of defense-industrial complexes lead to a decrease in the number of microorganisms and the suppression of vital processes in plants when soils and grounds are contaminated with rocket fuel, to hearing loss in fighter-bomber pilots when man-made acoustic anomalies occur, to the death of people and all living things when man-made temperature anomalies occur and subsequent fires during explosions under takeoff of launch vehicles.

**Keywords:** technolithotope, technoedaphotope, technomicrocoenosis, technophytocoenosis, technozoocenosis, military test sites, explosions, soils, grounds, groundwater, pollution, acoustic anomalies, temperature anomalies

**For citation:** Trofimov V.T., Kharkina M.A. Peculiarities of ecological-geological systems of defense-industrial complexes in Russia. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 97–107. (In Russ.).

**Введение.** Эколого-геологическая система оборонно-промышленных комплексов — это открытая динамическая система, возникающая на техногенно освоенной территории и включающая три подсистемных блока: абиотический (технолитосфера и технопедосфера), биотический (техномикроценоз, технофитоценоз, технозооценоз) и источники техногенного воздействия, тесно связанные причинно-следственными связями, обуславливающими ее структурно-функциональное единство. По источ-

никам техногенного воздействия среди оборонно-промышленных ЭГС выделяют военно-производственные, военно-складские, военно-аэродромные и ЭГС военных полигонов. Если степень изменений оборонно-промышленных ЭГС меньше 50%, то возникают сухопутные техногенно-природные ЭГС [Королёв, Трофимов, 2025]. В большинстве случаев в эту категорию входят военно-производственные, военно-складские и военно-аэродромные ЭГС. Если степень изменений больше 50%, то образуются

природно-техногенные ЭГС, к ним в большинстве случаев относятся ЭГС военных полигонов.

Оборонно-промышленные комплексы оказывают сильнейшие воздействия как на абиотическую, так и биотическую часть экосистем (табл. 1). Воздействия на абиотическую часть ЭГС связано, в первую очередь, с механическим и физическим воздействием, с загрязнением почв, грунтов, подземных вод химическими веществами и элементами, включая радиоактивные. Особенно это касается военных полигонов по испытанию ядерного оружия, где происходит загрязнение радионуклидами. Одними из наиболее опасных радионуклидов являются долгоживущие продукты деления  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2} = 28,8$  года),  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30,1$  лет) и остаточное ядерное горю-

чее — изотопы плутония, периоды полураспада которых составляют для  $^{238}\text{Pu}$   $T_{1/2} = 87,7$  лет,  $^{239}\text{Pu}$   $T_{1/2} = 24065$  лет, а для  $^{240}\text{Pu}$   $T_{1/2} = 6537$  лет. Накопление  $^{241}\text{Am}$  ( $T_{1/2} = 432,6$  года) является следствием распада  $^{241}\text{Pu}$ , имеющего период полураспада 14,3 года, доля активности которого со временем только увеличивается, достигая 10% и более. Основные воздействия на эколого-геологические системы оказывают наземные ядерные взрывы, которые на поверхности литосферы оставляют радиоактивный след.

На Новоземельском испытательном полигоне, расположенном на архипелаге Новая Земля, преобладали воздушные ядерные испытания. Здесь был произведен лишь один небольшой по мощности наземный ядерный взрыв, локальный след от которого

Таблица 1

### Основные техногенные воздействия оборонно-промышленных комплексов на компоненты ЭГС

Виды ЭГС	Виды воздействий на компоненты ЭГС					
	На абиотические компоненты ЭГС		На биотические компоненты ЭГС			
	технолитотоп	техноэдафотоп	техно-микробо- ценоз	технофито- ценоз	технозоо- ценоз	человеческое сообщество
ЭГС военно-производственных комплексов	Механические изменения верхней части геологического разреза, воздействие загрязнения и трансформация геохимических полей на участках сброса стоков и аварийных утечек		Токсикологические воздействия		Нервно-паралитические воздействия, воспаление кожных покровов, удушающее воздействие, раздражение слизистых оболочек, психотропное воздействие в связи с накоплением токсичных веществ	
ЭГС военно-складских комплексов	Воздействие загрязнения нефтепродуктами на грунты и подземные воды, возникновение геохимических аномалий	Воздействие загрязнения нефтепродуктами на почвы, возникновение геохимических аномалий	Воздействие на численность микроорганизмов	Воздействие на биомассу растений	Деградация животного мира	Воздействие на здоровье человека в случае загрязнения водозаборов
ЭГС военно-аэродромных комплексов	Выравнивание поверхности, возникновение электромагнитных, тепловых и акустических аномалий; повышение электромагнитного фона	Загрязнение металлами, твердыми частицами топлива и компонентами антиобледенителей и противогололедных реагентов, возникновение электромагнитных и акустических аномалий	Воздействие на численность микроорганизмов	Воздействие на биомассу растений	Сердечно-сосудистые заболевания и расстройство центральной нервной системы из-за работы радиолокационных станций навигации, снижение слуховой чувствительности из-за шумовых воздействий работающих двигателей	
ЭГС военных полигонов	Изменение рельефа за счет создания фортификационных сооружений и образования воронок от взрывов; изменение структуры и физических показателей грунтов на участках взрыва, загрязнение грунтов и подземных вод, активизация сейсмической активности и ЭП, возникновение тепловых аномалий при запуске ракет	Возникновение геохимических аномалий в связи с загрязнением ТМ, радионуклидами и твердыми частицами топлива	Воздействие остатков ракетного топлива на численность микроорганизмов различных физиологических и таксономических групп	Воздействие разливов ракетного топлива, механические повреждения осколками снарядов наземной части растений	Физические воздействия: в случае ядерных испытаний: воздействие ударной волны, светового излучения, проникающей радиации. Термические воздействия при авариях при взлете ракетносителей	

в основном сформировался на территории полигона. При воздушных взрывах ядерных зарядов крупного и сверхкрупного калибров, которые в основном осуществлялись на этом полигоне, основная масса радиоактивных веществ поступала в стратосферу, откуда они попадали на поверхность земли в виде глобальных выпадений. После проведения этих испытаний в атмосфере и под водой отмечалось повышение гамма-фона на материковой части страны побережья Ледовитого океана, однако суммарные дозы облучения населения, как правило, не превышали санитарно-гигиенические нормативы [Логачев, 2004].

Характеристика абиотических компонент ЭГС оборонно-промышленных комплексов включает информацию по технолитотопам и техноэдафотопам, причем технолитотоп подразумевает описание геологического строения, рельефа, гидрогеологических условий, геохимических, геодинамических и геофизических полей. Полностью охарактеризовать технолитотоп удалось только для ЭГС военных полигонов. В связи с закрытостью темы абиотические компоненты эколого-геологических систем военно-производственных, военно-складских и военно-аэродромные охарактеризованы фрагментарно.

**Эколого-геологические системы военно-производственных комплексов.** Военно-производственные комплексы включают следующие отрасли оборонной промышленности: авиационную, судостроительную, электронную промышленности, производство боеприпасов и спецхимии ракетно-космической техники, промышленность вооружений, средств связи, радиопромышленность. Их создание потребовало строительство огромного комплекса не только специально ориентированных производств, но и гражданских сооружений, включая селитебные комплексы.

Создание военно-производственных комплексов приводит к возникновению техногенных геохимических полей в литотопе и эдафотопе. В местах производства различных боевых отравляющих веществ (БОВ или химического оружия) происходит трансформация природных геохимических полей литосферы, особенно это касается подземных вод [Александров, 1990]. Производство боевых отравляющих веществ связано с использованием для производственных нужд большого количества речной воды. В нашей стране военные химические предприятия располагаются исключительно на берегах полноводных рек — Волги, Оки и Камы. В случае аварий происходят существенные изменения в эколого-геологической обстановке. Так, в Волгограде на ПО «Химпром», производившем фосфорные отравляющие вещества зорин и заман в середине 1960-х годов имел место прорыв в Волгу высокотоксичных стоков цеха № 34 [Химия и жизнь, 1996].

Отметим, что оборонно-промышленные комплексы в первой половине XX века размещались в крупных городах России. Достаточно сказать, что даже в Москве размещались химические полигоны,

центральные склады химоружия, не менее четырех заводов по производству отравляющих веществ, двух головных научных институтов химической войны (военного и промышленного), военно-химического управления, медицинских служб (рис. 1), которые, безусловно, оказывали или могли оказать воздействие на условия существования живых организмов и населения. Понадобились десятилетия, чтобы наиболее опасная для большого города часть этой инфраструктуры оборонно-промышленного комплекса стала постепенно перемещаться из столицы вглубь страны.

**Эколого-геологические системы военно-складских комплексов.** В России известны места расположения крупнейших складов хранения химического оружия. Так, по состоянию на 1996 г. в пос. Горный (Саратовская обл.) на складах хранилось 225 т люизита, 690 т иприта и 210 т ипритно-люизитных смесей<sup>1</sup>, в городском поселении Камбарка (Удмурдия) на складах хранилось 6400 т люизита<sup>2</sup>, а в пос. Кизнер (Удмурдия) располагались склады боеприпасов (снарядов и мин) с фосфорными отравляющими веществами емкостью до 8 л для ствольной реактивной артиллерии<sup>3</sup> [Химия ..., 1996].

В районах расположения складов горюче-смазочных материалов при их утечке высока вероятность загрязнения нефтепродуктами подземных вод. Один из таких участков выявлен в районе г. Моздок (Республика Северная Осетия — Алания), где техническим керосином загрязнены воды нижне-среднеплейстоценового водоносного горизонта, которые используются для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения населением г. Моздок. Наблюдениями, проводимыми службами Государственного мониторинга состояния недр, в 2006 г. были выявлены линзы свободного керосина максимальной мощностью пленок до 36 см [Информационный бюллетень..., 2006]. Мощность пленок свободного керосина постепенно уменьшалась и составляла в 2009 г. 22–31 см, а начиная с 2015 г. сведения о линзах керосина отсутствуют в связи с введением особого режима на аэродроме и невозможностью обследования скважин. Содержание авиационного керосина в наблюдательных скважинах в 2008 г. составляло от 0,5 до 84,0 ПДК, причем присутствие нефтепродуктов периодически фиксировалось и в водозаборных скважинах. С течением времени концентрации керосина в нижне-средне-плейстоценовом водоносном горизонте падала и в 2014 г. составляла от 0,5 до 13,5 ПДК в бытовых колодцах, расположенных в южной части г. Моздок. Моздокский техногенный участок загрязнения нефтепродуктами сохранял свои пространственные границы и площадь (163 км<sup>2</sup>), начиная с 2008 г. до 2021 г. [Информационный ..., 2022].

<sup>1</sup> Склад уничтожен в 2005 г.

<sup>2</sup> Запасы люизита уничтожены в 2006–2010 гг.

<sup>3</sup> Химические боеприпасы уничтожены в 2017 г.

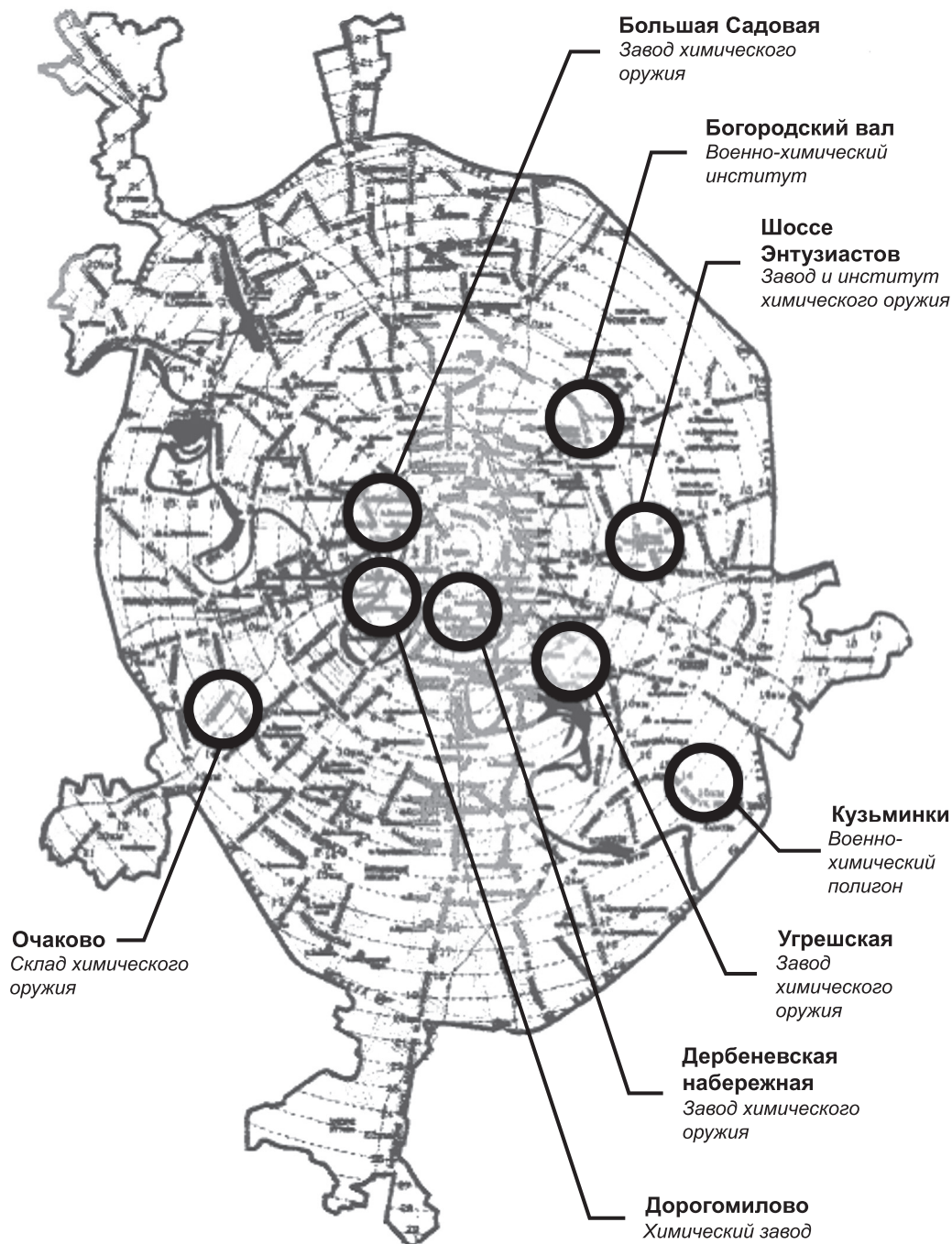


Рис. 1. Участки производства, испытаний и хранения химического оружия в Москве в первой половине XX века [Федоров, 2009]

**Эколого-геологические системы военно-аэродромных комплексов.** В абиотической части ЭГС военно-аэродромных комплексов отмечается техногенная трансформация рельефа. Военные аэродромы представляют собой выровненные площадки. В условиях Великой отечественной войны 1941–1945 гг. полевые аэродромы располагались в лесных массивах на выровненных и утрамбованных тяжелыми катками участках местности. Так, на аэродроме Павлово, относящимся к Юхновским аэродромам, большое летное поле имело размеры 1×2 км, где базировались тяжелые бомбардировщики ТБ-3, скоростные бомбардировщики СБ-2 и «пикиров-

щики» Пе-2 ВВС 24-й армии Резервного фронта, а также истребители МиГ-3 ПВО Московского военного округа. Сейчас площади военных аэродромов существенно выросли, только взлетно-посадочная полоса аэродрома Угольный в Анадыре (Чукотский АО) составляет 3,5 км.

В районе военных аэродромов происходит загрязнение воздушного бассейна, связанного с применением значительного количества разнообразных по химическому составу соединений. Вследствие осадения токсичных веществ из атмосферного воздуха и сброса сточных вод происходит загрязнение поверхностных вод и почвы аэродрома и прилега-

ющей к нему территории. Возникают *техногенные геохимические аномалии*. Выбросы газотурбинных двигателей военной авиации наиболее значительны при взлете-посадке, т.е. в непосредственной близости к аэродрому. Масса топлива, необходимого для обеспечения полета составляет от 30 до 60% взлетной массы самолета, а невырабатываемый остаток топлива, который военная авиационная техника при возвращении на аэродром должна «досжигать» на взлетно-посадочной полосе (ВВП) достигает 3–4% от ее полной заправки.

Анализ почвы приаэродромных территорий показал [Шевырев, 2004], что масса загрязнений твердыми частицами  $1 \text{ м}^2$  поверхности в центре летного поля в 4–6 раз ниже концевых участков взлетной полосы. Элементами-загрязнителями являются магний, алюминий, кремний, сера, калий, кальций, титан и железо в различных соединениях с кислородом. Проведенная на территории аэродрома оценка уровня загрязнения почвы твердыми частицами определила элементарный состав загрязнителей, который включает такие тяжелые металлы как свинец (Pb), кадмий (Cd), цинк (Zn), медь (Cu), никель (Ni), хром (Cr), при этом количественный анализ выявил превышение нормативного значения по Pb, Cd, Zn, Cu [Геворгян и др., 2013]. Установлены места наибольшего скопления элементов-загрязнителей — это начало и конец ВВП.

Развернутый химический анализ почв показал, что в установленный ранее перечень обязательных к контролю соединений в почвах аэродромов необходимо включить еще такие элементы, как цезий, скандий, ниобий, сурьма [Кочеткова и др., 2024]. Повышенное содержание цезия на территориях аэродромов государственной авиации возможно объяснить тем, что этот металл применяют в составе присадок к топливу для уменьшения радиолокационной заметности шлейфов выхлопных газов; карбонат цезия добавляют в стекло для повышения стабильности и долговечности волоконной оптики и приборов ночного видения. Скандий широко используется для получения прочных, жаростойких и легких алюминиево-скандиевых сплавов, применяемых в самолетостроении; компонентов микроэлектроники и флуоресцирующих красок для разметки ВПП; для производства осветительных приборов высокой интенсивности, используемых на аэродромах. Из чистого ниобия или его сплавов изготавливают детали летательных аппаратов. Сурьма все больше применяется в полупроводниковой промышленности при производстве диодов и инфракрасных детекторов, а также в качестве присадки к смазочным материалам подшипников скольжения.

Исследования почв аэродрома в г. Крымск выявил, что максимальное загрязнение почв характерно для зон ВВП и рулежных дорожек [Кочеткова и др., 2024]. Во всех точках пробоотбора установлено преобладающее содержание мышьяка и нефтепродуктов; в почвах под траекторией взлета — посадки

самолетов отмечается также характерное повышение содержания продуктов неполного сгорания топлива (нитратного азота, формальдегида).

Для аэродрома в г. Энгельс установлено, что основная масса керосина оседает в почвы на расстоянии от взлетно-посадочной полосы до 300 м, а повышенное содержание несгоревшего топлива фиксируется на расстоянии более 2 км [Лазарев, 2019].

Описывая трансформации абиотической части ЭГС военно-аэродромных комплексов следует сказать о существенных изменениях геофизических полей. Радиолокационные станции навигации самолетов различного функционального назначения, являются мощным источником *электромагнитного воздействия* на биоту и человека. Отмечается, что из всего комплекса физических полей электромагнитной природы целесообразно рассматривать только диапазон частот от 30 кГц до 300 ГГц, как наиболее распространенный, на который приходится наибольшая доля энергетической нагрузки личного состава. Источниками, повышающими уровень ЭМ-фона вокруг летательных аппаратов, могут быть бортовые многофункциональные радиолокационные станции (РЛС): станции управления огнем, обнаружения целей, средства связи, радиоэлектронной борьбы, навигации и др. Наиболее высокий профессиональный риск облучения — у специалистов РЛС, у инженерно-технической службы, личного состава службы ГСМ, аэродромной службы, руководителей полетами, диспетчеров, летного состава. Максимальные уровни воздействия могут достигать до  $1,0\text{--}2,5 \text{ Вт/м}^2$ . У персонала радиотехнической системы ближней навигации (РСБН) риск в 20 раз меньше [Дроздов, Панихидников, 2013].

Работающие двигатели самолетов являются источниками повышенного *шума* и создают техногенные акустические аномалии. Шум создается тремя основными источниками — турбулентным потоком, двигателем и системами самолета, вызывая профессиональные заболевания [Техногенная трансформация..., 2019]. Причем военные самолеты более шумные, чем гражданские, т.к. у них нет звукоизоляции, двигатели работают в очень шумных режимах.

**Эколого-геологические системы военных полигонов.** Полигон (учебно-тренировочный комплекс) — это специально отведенный и оборудованный участок суши или моря с воздушным пространством над ним, предназначенный для испытания вооружения и военной техники, проведения мероприятий по боевой подготовке войск (сил флота), исследований в области военного искусства. В России военные полигоны подразделяются по: 1) роду применяемых средств — общевойсковые, ракетные, артиллерийские, авиационные, морские; 2) специальному назначению — научно-исследовательские (испытательные), заводские; 3) подчиненности — центрального подчинения (центральные полигоны), окружные (флотские), ар-

мейские, дивизионные (бригадные), военно-учебных заведений МО РФ.

К первому типу военных полигонов относят также полигоны по утилизации боеприпасов. К научно-исследовательским (испытательным) полигонам относится Новоземельский — крупнейший военный полигон по проведению ядерных испытаний, где техногенные изменения эколого-геологических систем особенно сильны, так как связаны с выпадением на поверхность почв и грунтов радионуклидов.

**Особенности абиотических компонентов ЭГС военных полигонов.** Особенности литотопа и его техногенной трансформации в технолитотопы сопровождается изменениями геологического строения, рельефа и состава массива, гидрогеологических условий, геодинамического поля, геохимических и геофизических полей.

Трансформация **геологического строения и состава массива грунтов** отмечается при взрывах. В результате взрывов происходит вынос грунта, меняется его структура и физические показатели на расстоянии 15 м от края воронки [Шишкин и др., 2021]. Вокруг эпицентра разрыва снаряда в грунте различают три зоны: сжатия, разрушения и сотрясения. При сжатии грунт сдвигается и уплотняется, при разрушении (имеющем радиус распространения сильной ударной волны) нарушаются связи между частицами грунта, его структура, образуются трещины. Слабая ударная волна вызывает только колебательное движение частиц грунта, без их разрушения.

Характеристики литотопа влияют на степень радиоактивного загрязнения местности, особенно это касается донных отложений. Установлено [Платовских, 2007], что с уменьшением размера частиц донных осадков растет концентрация радионуклида. Изучена неравномерность распределения радионуклидов в донных осадках в зависимости от размеров частиц. Измерения показывают, что во всем диапазоне изменения размеров частиц коэффициент распределения, характеризующий степень сорбции радионуклида частицами, изменяется до 100 раз.

Масштабные изменения **рельефа** происходят при проведении боевых учений на местности. Инженерная подготовка учебных театров военных действий требует возведения многочисленных фортификационных сооружений, протяженных траншей и противотанковых рвов. При этом перемещаются огромные массы грунтов, что создает искусственно расчлененный «военизированный» антропогенный рельеф. Если учесть то, что современные военные учения проводятся на очень больших территориях, то площадь с измененным рельефом может достигать десятков и тысяч квадратных километров. О территориях, на которых наблюдаются подобные изменения, можно судить хотя бы по тому, что артиллерийский полигон, существующий с 1930 г. у г. Нижний Тагил, имеет боевое поле площадью  $52 \times 1,5$  км, т.е. 7800 га или  $78 \text{ км}^2$  [Руденко, 2002]. Такие территории по окончании учений обладают по-

ниженным качеством геологического пространства, даже при условии их последующей рекультивации.

Существенные изменения **микрорельефа** происходит на военных полигонах по утилизации боеприпасов. Под воздействием взрывов образуются воронки, которые в последствие заполняются водой [Шишкин и др., 2021]. Анализ разброса грунта показал, что центральная часть взрыва подвергается большему воздействию и выбросу на дальнейшее расстояние материнской породы. В рыхлых грунтах воронка выноса близка по форме к параболоиду или усеченному конусу. Так, на полигоне по утилизации артиллерийских снарядов, расположенного в Емельяновском р-не Красноярского края в основании которого залегают пылеватые суглинки, зафиксированы конусообразные воронки, имеющие радиус 8–14 м и глубину 2,5–5 м.

Нарушение природных **гидрогеологических условий**, часто с радиоактивным загрязнением подземных вод, происходит при подземных испытаниях ядерного оружия. Примером техногенной трансформации гидротопы в результате ядерного взрыва в 1974 г. является горный массив, расположенный в 2,5 км от карьера «Удачный» на левом берегу ручья Улахан-Бысытта (Якутия), в котором на глубине 98 м был проведен подземный ядерный взрыв, мощностью 1,7 кт. Взрыв оказался аварийным и на поверхности образовалась воронка диаметром 60 м и глубиной 6 м, которая в последствии была заполнена поверхностными водами. Этот взрыв был выполнен в толще многолетнемерзлых пород, которая, подстилается пластом кембрийских подмерзлотных напорных вод [Вавилов, Неклюдов, 2024]. Вскрытие массива взрывом привело не только к подъему минерализованных рассолов по ослабленным породам канала боевой скважины в диапазоне средне-, верхнекембрийского горизонта, но и латеральному вытеснению трещинно-кавернозно-поровых вод обоих пластов в ранее образованную зону пониженного давления депрессионной воронки 412 карьера «Удачный» и, как результат, была зафиксирована радиоактивность подземных вод в карьере на глубинах 600 м.

В дальнейшем (1992) с целью стабилизации эколого-геологических условий в целом и технолитотопа в частности была проведена рекультивация эпицентральной зоны. Над устьем боевой скважины был насыпан защитный экран из вскрышных пород карьера «Удачный», объемом 433,7 тыс. т. Дополнительно был создан льдогрунтовой слой из намороженных пород толщиной 0,6 м, который для предохранения от таяния в летний период времени был засыпан теплоизоляционным слоем из тех же пород толщиной 3 м. Возведенный саркофаг имел размеры около 150 м в диаметре и 7–20 м по высоте. По данным дешифрирования космоснимков поверхности установлено, что тело саркофага может оказаться уязвимым к перманентному фактору воздействия площадных и склоновых надмерзлотных

вод сезонно талого слоя и дождевых вод, стекающих с прилегающего к саркофагу склона долины.

При испытаниях оружия на военных полигонах происходит трансформация *геодинамического поля*. Испытательные взрывы большой разрушительной силы показали, что существует энергетический порог, за которым оказываемое на верхнюю часть литосферы воздействие может вызывать реакцию массивов горных пород, сходную по проявлению с *тектоническими землетрясениями*. Сопоставление энергетического уровня воздействия с откликом природной среды свидетельствует о том, что ошутимая реакция горных массивов, проявляющаяся в виде обширных экзогенные и эндогенных процессов, носящих зачастую катастрофический характер, возможна при искусственном воздействии, энергия которого превышает  $10^8$ – $10^{10}$  Дж [Изменения..., 2006].

Проводившиеся во второй половине XX века подземные испытания ядерных устройств на военных полигонах определили, что существует связь между взрывами атомных зарядов и активизацией геологических процессов. Следует отметить, что в ряде случаев испытания проводились в районах с повышенной сейсмичностью. К таким районам относятся, например, территория полигона в районе оз. Байкал. Данные о подземных ядерных взрывах, проведенных на Семипалатинском, Новоземельском и Невадском полигонах, а также в других местах, позволяют утверждать, что их воздействие на литосферу приводит к кратковременному увеличению сейсмичности на расстоянии до 2000 км от места испытаний, в увеличении частоты и силы землетрясений в первые 5–10 дней, а также через 30–40 дней после проведения взрывов [Природные..., 2000]. Однако в районе Новоземельского полигона, благодаря слоистому строению массивов, сейсмические колебания на континенте регистрировались только высокочувствительной аппаратурой. Амплитуда сейсмических волн, зарегистрированных на материке после подземных взрывов, была сопоставима с уровнем сейсмического фона. Например, в г. Воркуте амплитуда сейсмического фона, регистрируемого от городского транспорта и промышленных предприятий на частоте 3 Гц, составляет около 10 мкм/с, в то время как сейсмическое воздействие от взрывов составляет 60 мкм/с, т.е. сейсмическое воздействие от ядерных испытаний на Новоземельском полигоне превышает фон всего в 6 раз [Боярский, 2000].

Рассматривая экологические последствия геологических процессов с позитивных и негативных сторон, следует привести мнение А.В. Николаева и А.Д. Жигалина о положительных эффектах от ядерных испытаний в сейсмоактивных районах. С их точки зрения, подземные ядерные взрывы активизируют слабую и умеренную сейсмичность, способствующую сбросу части тектонических напряжений. При этом вероятность возникновения мощных землетрясений с катастрофическими эколо-

гическими последствиями уменьшается [Николаев, Жигалин, 2003].

Существенные трансформации *геохимических полей* происходят при испытании ракетно-космической техники. В первую очередь речь идет о токсичных компонентах ракетного топлива. Расчетное количество компонентов ракетного топлива в отработавших первых ступенях ракет варьирует от сотен килограммов (ракета-носитель «Рокот») до 1,5–2 т (ракета-носитель «Протон»). При этом 30% этой массы остатков осаждается в районе пуска на поверхности литосферы. Наибольшую экологическую опасность представляет ракетное топливо НДМГ<sup>4</sup>, которым заправляют тяжелую российскую ракету-носитель типа «Протон», боевые межконтинентальные ракеты типа 15А18, 15А35, стоящие на боевом дежурстве, а также конверсионные ракеты-носители «Рокот», «Стрела», «Днепр» [Воздействие..., 2016]. Техногенные геохимические аномалии отмечены и при падении на земную поверхность фрагментов космической техники.

Испытания ракетно-космической техники, проводимые в мирное время, нередко вызывают образование продуктов сгорания не только в газовой, но и жидкой фазах. Размер капель на аэрозольных центрах конденсации вырастает до такой степени, что они начинают выпадать в виде кислотных дождей. *Кислотные дожди* особенно опасны на начальных этапах развития растений. При воздействии дождей с рН 3,2 значительно уменьшается масса побегов и корней. Экспериментально установлено, что резкое снижение урожайности редиса до 50–60% отмечается при рН дождя 2,5–3,4 [Заиков и др., 1991].

Подземные ядерные взрывы сопровождаются заметным изменением *геофизических полей*, в том числе *радиоактивного поля*. Длительные (до 10–15 лет) наблюдения показали, что, несмотря на «остеклованные» стенки полостей вследствие воздействия на горные породы высоких температуры и давления во время ядерного взрыва, происходят утечки радиоактивных веществ. При осуществлении взрывов наблюдаются внезапные подвижки грунтового массива, аномальное поведение подземных вод и газов. В случае возникновения нештатных ситуаций при проведении подземных ядерных взрывов, возможен выход на поверхность радиоактивных инертных газов. Мощность дозы радиации в пределах технологических площадок, как это, например, было на Новоземельском полигоне, может достигать 500 Р/ч (5 Зв/ч). Область распространения подобного рода выходов может простирается на расстояния до 500 км и более.

На территориях космодромов в связи с запуском ракет возникают изменения *температурного поля*. Запуски ракет среднего и дальнего радиуса действия

<sup>4</sup> НДМГ (несимметричный диметилгидразин, гептил) — химическое вещество, производное гидразина, компонент высококипящего ракетного топлива, жидкое горючее из класса органических аминов.

приводят к пожарам на обширных территориях, что влечет за собой изменение температурного режима приповерхностной литосферы. Зажигательные смеси разделяют на три категории — смеси типа напалма (бензин с загустителем), создающие очаги горения длительностью до 10 мин с температурой до 1200 °С, металлизированные зажигательные смеси на основе нефтепродуктов с порошкообразными добавками металлов, температура горения которых достигает 1600 °С, термитные зажигательные смеси (механическая смесь окиси железа и порошкообразного алюминия), горящие без участия в реакции кислорода при температуре до 3000 °С, и низкотемпературные (до 900 °С) смеси в виде воскообразного самовоспламеняющегося вещества с добавкой фосфора и щелочного металла, поражающие огнем местность на площади до 0,15 кв. км [Гринин, Новиков, 2002]. Расчетным путем получены размеры площади пожара от взрыва при взлете ракет-носителей различных типов (табл. 2). Есть случай такого пожара, приведший к гибели людей, например, взрыв на стартовом комплексе МБР Р-16 и последовавший за этим пожар на космодроме Байконур 24.10.1960 привел к гибели 78 человек.

Таблица 2

**Характеристики пожаров при взрывах ракет-носителей, по [Воздействие..., 2016]**

Тип ракеты	Вид топлива	Масса топлива, т	Энергия взрыва, ТДж	Радиус площади пожара, м
«Ангара» легкого класса	кислород–керосин	1230	1,5	300
«Ангара» среднего класса	кислород–керосин	420	4,8	500
«Протон К»	азотный тетраоксид — несимметричный диметилгидразин	670	4,5	500

При испытании ракетных двигателей и запусках ракет создаются мощные волновые возмущения в широком частотном диапазоне, вызывающие *акустические аномалии*. Уровень звука от работы взлетающей тяжелой ракеты может достигать 150–180 дБ, что в 2–3 раза превышает допустимые для человека уровни [Воздействие..., 2016].

**Особенности технодафтона.** Почвы в районах испытательных полигонов загрязнены различными элементами и соединениями. В результате ядерных испытаний техногенные радионуклиды оседают из воздуха на почвы и донные отложения. Так, на «Опытном поле» Семипалатинского полигона, где производились наземные и воздушные взрывы, на отдельных участках мощность дозы составляет 0,14 мЗв/час (за 10 часов пребывания человека — дозовый предел по нормативам). Более 10-см почвы содержит  $^{239}\text{Pu}$ , что мало пригодно растениям, поэтому

необходимо сохранять целостность почвенного слоя. Однако возможен локальный ветровой перенос  $^{239}\text{Pu}$ . В воде радионуклиды не зафиксированы с 1973 г. (начало систематических исследований). В продуктах питания (в 1964–1966 гг.)  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в областях, прилегающих к Семипалатинскому ядерному полигону, было в 2–5 раз больше, чем в фоновых точках [Геохимические..., 2009].

**Особенности биотических компонентов ЭГС военных полигонов.** Представители биотических компонентов ЭГС, включая техномикробценоз, технофитоценоз и технозооценоз испытывают сильные негативные последствия функционирования военных полигонов. Достаточно сказать, что каждый килограмм взрывчатого вещества обычной бомбы вызывает разрушение экосистемы на площади 12,5 м<sup>2</sup> [Горшков, 1982]. В этом разделе приведены краткие данные по состоянию биотической части ЭГС не только военных полигонов, но и других видов ЭГС оборонно-промышленных комплексов.

Наиболее сильное воздействие на биоту в целом и *микрорганизмы* в частности оказывает ракетное топливо. Известно, что характер воздействия ракетного топлива на микроорганизмы определяется его количеством, поступившем в почвы. При умеренном содержании НДМГ в почвенной среде увеличивается средний объем клеток и биомасса микроорганизмов в единице объема почвы. Численность микроорганизмов различных физиологических и таксономических групп в почвах относительно контроля повышается при загрязнении их НДМГ в концентрациях 1,0; 2,5 и 5,0 г/кг и снижается с увеличением уровня загрязнения от 10 до 100 г/кг [Панова, 1997]. Адаптация к высоким концентрациям НДМГ у микроорганизмов происходит быстро, и уже к концу первого вегетационного сезона (четыре месяца после введения в почву НДМГ) наблюдается активизация их деятельности.

Разлившееся ракетное топливо подавляет *растительность*. Проведенные на космодроме Плесецк исследования биологической активности почв и растительного материала показали, что характер воздействия НДМГ на горох и ячмень определяется его количеством, поступившем в почву. Ингибирующая (подавляющая жизненные процессы) доза НДМГ составляет 20 г/дм<sup>3</sup>, хотя в умеренных дозах НДМГ служит стимулятором процессов жизнедеятельности растений [Воздействие..., 2016]. Отмечается, что в течение первой фазы вегетации растения ячменя являются более толерантными к воздействию НДМГ, чем растения гороха (рис. 2).

На военных полигонах при ликвидации осколочных боеприпасов образуются фрагменты (первичные осколки), наносящие повреждения всему живому, в том числе и растительности. Чем больше масса осколков, обладающих кинетической энергией за счет действия продуктов взрыва, тем сильнее их поражающее действие и больше дистанция, на которую они летят. Осколки стальной оболочки сохра-

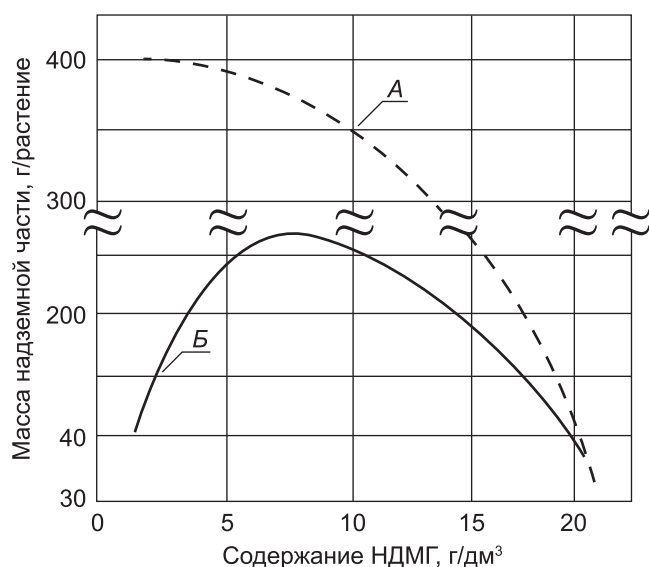


Рис. 2. Биомасса растений гороха (А) и ячменя (Б) в период их созревания (сентябрь) при различном содержании НДМГ в почве [Воздействие..., 2016]

няют поражающую силу на дистанции до 150–250 м от центра взрыва. При утилизации боеприпасов военно-морской базы осколки и пораженные стволы деревьев наблюдались на удалении более 400–500 м от места подрыва [Криминалистика..., 2018].

Радиоактивное загрязнение местности при нештатных ситуациях на военных полигонах отражается на **здоровье человека**. Эффективная доза облучения зависит от перемещения человека по загрязненной территории, от времени пребывания на ней, от вида радионуклидов, их объемной концентрации, плотности загрязнения, уровня загрязнения, от потребления воды и пищи, от орографии местности. Согласно заключению Международной комиссии по радиологической защите вероятность смертельных случаев онкозаболеваний при мощности дозы облучения 1 Зв составляет  $5 \cdot 10^{-5}$ , что принято за максимальный допустимый риск летального исхода.

При оценке воздействия радиоактивного облучения на организм человека различают внешнее гамма излучение, связанное с последующим поражением кожных покровов, и внутреннее облучение, связанное с потреблением загрязненных пищевых продуктов и вдыханием загрязненного воздуха. Поступление радионуклидов йода приводит к облучению щитовидной железы, радионуклидов бария, стронция и фосфора — к облучению костных тканей, а попадание трития, радионуклидов цинка, марганца и натрия — к дополнительному облучению всего тела человека. Максимальное облучение населения Казахстана и России было зафиксировано после первого испытания на Семипалатинском полигоне 29.08.1949 г., когда воздействию этого фактора на организм человека еще не было изучено. Общая численность облученного населения Казахстана за весь период проведения ядерных испытаний на

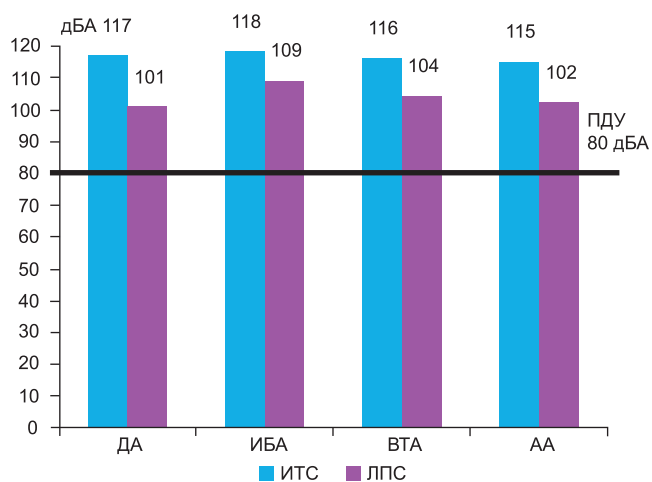


Рис. 3. Эквивалентный уровень звука (дБА) на рабочих местах авиационных специалистов (ИТС — инженерно-технический состав, ЛПС — летно-подъемный состав) по видам авиации в сравнении с предельно допустимым уровнем (ПДУ) [Шешегов, 2017]: ДА — дальняя авиация, ИБА — истребительно-бомбардировочная авиация, ВТА — военно-транспортная авиация, АА — армейская авиация

Семипалатинском полигоне составляет 174 тыс. чел [Ядерные ..., 2008].

При авариях на космодромах компоненты ракетного топлива (гидразиновое горючее, содержащее азотокислители, углеводородное горючее) попадают в акватории, в следствие чего отмечается трансформация представителей **технозооценозов**. Действие нитратов и нитритов на гидробионты заключается в нарушении их кровоснабжения, т.е. транспортировки кислорода к жизненно важным органам. Другой вид негативного влияния нитратов и нитритов на гидробионты заключается в том, что повышение их концентрации в воде водоемов стимулирует рост растительности и планктона и приводит к эвтрофикации, загрязнению воды водоемов азотной кислотой. Смертельная концентрация азотной кислоты для радужной форели через 96 ч. составляет 0,39–1,9 мг/л, для молоди форели через 8 сут. — 0,14–0,15 мг/л [Яржомбек, Михеева, 2007].

При использовании обычного вооружения на военных полигонах наиболее опасны для представителей животных взрывы. Прямое воздействие взрывов на животных проявляется во внутреннем кровоизлиянии и нарушении почечной ткани у мелких млекопитающих, что экспериментально доказано на примере полевков-экономок, обитающих на территории полигона уничтожения боеприпасов в условиях Красноярской лесостепи [Шишкин и др., 2021].

На военных аэродромах совместное действие шума и инфразвука на человека приводит к снижению слуховой чувствительности, сердечно-сосудистым заболеваниям, расстройству центральной нервной системы [Шешегов, 2017]. Установлено, что наиболее неблагоприятной акустической нагрузке среди всех авиационных специалистов подвергается инженерно-технический состав (рис. 3), уровень

шума на их рабочих местах составляет 97–118 дБА в звуковом и 91–111 дБ Лин в инфразвуковом диапазоне. Наиболее интенсивный шум выявлен в истребительно-бомбардировочной авиации. На рабочих местах летно-подъемного состава воздействует шум интенсивностью 96–104 дБА в звуковом и 96–100 дБ Лин в инфразвуковом диапазоне, с наиболее высокими значениями в истребительно-бомбардировочной авиации. Анализ заболеваемости авиационных специалистов по сравнению с аналогичными показателями в контрольной группе показал, что у всех категорий (летчики, штурмана и другие члены летных экипажей) практически в равной степени повышена заболеваемость органа слуха. Причем тугоухость проявляется уже при стаже работы 2 года, и ее вероятность тем выше, выше стаж.

На военных аэродромах неоднократно фиксировались разливы бензина и дизельного топлива, которые снижают качество биоресурсов, и особенно сильно отражаются на состоянии гидробионтов. При разливах топлива образуется углеводородная пленка, нарушающая процесс естественной аэрации воды, что влечет за собой кислородное голодание гидробионтов. При концентрации в водоеме горючих углеводородов более 0,01 мг/л гибнет планктон, а более 50 мг/л — рыба, нарушается, таким образом, трофическая цепочка. Наличие в водоеме нефти в количестве 0,1 мг/л придает рыбе неустрашимый при обработке вкус и запах [Маркизов и др., 2003].

Не менее опасны для гидробионтов и кислотные дожди. Попадание кислотных дождей в закрытые пресные водоемы, когда их ложе не образовано карбонатными породами, вызывает массовую гибель фауны даже при весьма малом повышении кислотности воды (рН 6,5–6,0).

**Заключение.** Основные виды техногенных воздействий на ЭГС оборонно-промышленных комплексов связаны с изменением рельефа при испытательных взрывах и ликвидации боеприпасов, аварийными утечками нефтепродуктов, загрязнением металлами

и твердыми частицами топлива, особенно территорий, прилегающих к взлетно-посадочным полосам военных аэродромов, а также с загрязнением радионуклидами территорий при наземных ядерных взрывах. Шумовые воздействия трансформируют существующие акустические поля, электромагнитные изменяют существующий фон, а температурные, наблюдаемые при авариях при взлете ракет-носителей, приводят к пожарам на больших площадях.

На примере эколого-геологических систем военно-промышленных комплексов показано, что существенные изменения происходят и в их абиотической и биотической частях: в абиотической части трансформации затрагивают как литосферу так и почвенный покров, формируется технолитотоп и техноэдафотоп; в биотической части ЭГС трансформации затрагивают микробные сообщества, растительность, животных, включая человека, возникают техномикробоценозы, технофитоценозы и технозооценозы, испытывающие сильные негативные последствия военной деятельности.

Показано, что изменения в абиотической части ЭГС оборонно-промышленных комплексов, связанные с загрязнением грунтов и почв ракетным топливом высоких концентраций, приводят к снижению численности микроорганизмов и подавлению жизненных процессов у растений; при радиоактивном загрязнении грунтов и почв при нештатных ситуациях на военных полигонах происходят поражение кожных покровов, внутреннее облучение органов человека, возникают онкозаболевания, при возникновении техногенных акустических аномалий, связанных с работой в истребительно-бомбардировочной авиации, отмечается тугоухость летчиков и инженерно-технического состава, а при возникновении техногенных температурных аномалий зафиксированы случаи гибели людей.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров В.Н., Емельянов В.И. Отравляющие вещества. М.: Воениздат, 1990. 218 с.

Боярский П.В. Новоземельский полигон: Обеспечение общ. и радиац. безопасности ядер. испытаний: факты, свидетельства, воспоминания / П.В. Боярский, А.И. Веретенников, И.А. Галстян и др. М.: ИздАт, 2000. 487 с.

Вавилов С., Неклюдов В. Исследование участка «Кристалл» методом геоэлектротомографии // Геология и минеральные ресурсы Северо-Востока России: Сборник 14 межд. научно-практ. конф. Новосибирск, 2024. С. 409–413.

Воздействие ракетно-космической техники на окружающую среду / Под ред. В.В. Адушкина, С.И. Козлова, М.В. Сильникова. М.: ГЕОС, 2016. 795 с.

Геворгян В.М., Пономарева О.И., Кемер О.В. Экологические особенности почвенного покрова аэродромных комплексов гражданской авиации // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4 (4). С. 795–798.

Геохимические особенности окружающей среды и здоровье населения Сары-Арки / В.И. Серых, И.В. Глухан, Б.П. Селенко. Министерство образования и науки Респ. Казахстан, Караганд. гос. техн. ун-т. Караганда: Изд-во КарГТУ, 2009. С.126–127.

Горшков С.П. Экзогеодинамические процессы освоенных территорий. М.: Недра, 1982. 286 с.

Гринин А.С., Новиков В.Н. Экологическая безопасность. Защита территории и населения при чрезвычайных ситуациях. М.: ФАИР-ПРЕСС, 2002. 336 с.

Дроздов В.В., Панихидников С.А. Общая экология с основами экологической безопасности военной деятельности: учебное пособие. СПб.: СПбГУТ, 2013. 432 с.

Дубосаров Ю.В., Зеленцов С.А., Логачев В.А. Хронология ядерных испытаний в атмосфере на Семипалатинском полигоне и их радиационная характеристика // Вестник «Семипалатинский полигон — Алтай». 1994. № 4. С. 18–86.

Заиков Г.Е., Маслов С.А., Рубайло В.Л. Кислотные дожди и окружающая среда. М.: Химия, 1991. 144 с.

Изменение экологических функций литосферы при военных действиях / В.Т. Трофимов, А.Д. Жигалин, Т.А. Барабошкина и др. // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2006. № 5. С. 68–75.

Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2005 г. Вып. 28. М.: Геоинформмарк, 2006. 212 с.

Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2021 г. Вып. 45. М.: Гидроспецгеология, 2022. 423 с.

Королёв В.А., Трофимов В.Т. Систематика эколого-геологических систем. М.: ООО «Сам Полиграфист», 2025. 120 с.

Кочетова Ж.Ю., Лазарев И.С., Зиброва Н.В., Базарский О.В. Развернутый химический анализ почв и установление приоритетных загрязнителей на территории аэродрома государственной авиации (г. Крымск) // Вестник МГТУ. 2024. Т. 27, № 1. С. 83–90.

Криминалистика: Учеб. для бакалавров / Под ред. Л.В. Бертовского. М.: РГ-Пресс, 2018. 960 с.

Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Бакланов И.О. Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) // Ученые записки РГГМУ. 2019. № 56. С. 126–132.

Логачев В. А. Радиоэкологическая обстановка в регионах Урала после проведения ядерных испытаний в атмосфере // Урал. Радиация. Реабилитация / Отв. ред. В.Н. Чуканов. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 104–127.

Маркизов Н.Ф., Гребенюк А.Н., Башарин В.А. Токсикология нефтепродуктов. СПб.: Невский Диалект, 2003. 128 с.

Николаев А.В., Жигалин А.Д. Геоэкологические аспекты военной деятельности // Геоэкология. 2003. № 1. С. 23–31.

Панова Г.Г. Влияние компонентов ракетного топлива на почвенно-растительную систему: Дисс. ... канд. биол. наук. СПб., 1997. 16 с.

Платовских Ю.А. Радиоактивное загрязнение бухт и заливов Кольского полуострова, Новой Земли и Дальнего Востока // Атомная энергия. 2007. Т. 103, вып. 4. С. 263–268.

Природные опасности России. Сейсмические опасности / Под ред. Г.А. Соболева. М.: КРУК, 2000. 296 с.

Руденко В.Л. Мировая слава секретного полигона // Оборонно-промышленный комплекс Свердловской области: информационно-аналитический каталог. Екатеринбург, 2002. С. 28–30.

Трофимов В.Т., Харькина М.А., Жигалин А.Д., Барабошкина Т.А. Техногенная трансформация экологических функций абиотических сфер Земли под влиянием военной деятельности // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2019. № 1. С. 3–12.

Федоров Л.А. Химическое вооружение — война с собственным народом (трагический российский опыт). Т. 1. Долгий путь к химической войне. М.: Лесная страна, 2009. 392 с.

Химия и жизнь. Атом без грифа «секретно». Кн. 2. М., 1996. С. 132.

Шевырев В.Е. Мониторинг земель приаэродромных и сопредельных территорий Воронежской области: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Воронеж, 2004. 22 с.

Шешегов П.М. Научное обоснование системы управления риском развития нейросенсорной тугоухости у авиационных специалистов ВВС ВКС при действии авиационного шума: Автореф. дисс. ... докт. мед. наук. Волгоград, 2018. 44 с.

Шишикин А.С., Пономарева Т.В., Ефимов Д.Ю. и др. Воздействие утилизации боеприпасов на лесные экосистемы // Сибирский журнал. 2021. № 2. С. 17–31.

Ядерные взрывы в СССР и их влияние на здоровье населения Российской Федерации / Кол. авторов под рук. В.А. Логачева. М.: ИздАТ, 2008. 470 с.

Яржомбек А.А., Михеева И.В. Ихтиотоксикология. М.: Колос, 2007. 144 с.

Статья поступила в редакцию 15.08.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 55:502:338:502.171(575.3)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-108-117

## ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАССИВОВ НАСЫПНЫХ ГРУНТОВ ПОДМОСКОВНОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА

Татьяна Анатольевна Барабошкина<sup>1✉</sup>, Виктор Титович Трофимов<sup>2</sup>,  
Светлана Казимировна Николаева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baraboshkina@mail.ru<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7209-5905>

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; trofimov@rector.msu.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nikolaeva.sk@gmail.com

**Аннотация.** Систематизированы особенности трансформации угледобывающих регионов под влиянием порядка трех столетий добычи полезных ископаемых, особенности состава техногенных эколого-геологических систем массивов насыпных грунтов и их трансграничного воздействия на селитебные районы. На основе анализа состояния ресурсного потенциала этих систем, полученных и опубликованных данных, обоснован вывод, что для достижения национальных целей в сфере формирования комфортных условий для проживания населения вблизи исторических угледобывающих территорий, актуально внедрение для рекультивации отечественных апробированных природоподобных технологий на базе комплексного подхода в сфере теории и практики формирования технофитоценозов, учения об экологических функциях литосферы и методологии эколого-ресурсного картографирования, позволяющих систематизировать и синхронизировать решение экологических и социально-экономических проблем.

**Ключевые слова:** угледобывающая промышленность, насыпные массивы грунтов, эколого-геологическая система, ресурсный потенциал, литотоп, фитоценоз, природоподобные технологии, социально-экономические проблемы

**Для цитирования:** Барабошкина Т.А., Трофимов В.Т., Николаева С.К. Трансформация эколого-геологических систем массивов насыпных грунтов Подмосквовного угольного бассейна // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 108–117.

## TRANSFORMATION OF ECOLOGICAL AND GEOLOGICAL SYSTEMS OF MASSIVES OF PUMMED SOILS IN THE MOSCOW COAL BASIN

Tatyana A. Baraboshkina<sup>1✉</sup>, Viktor T. Trofimov<sup>2</sup>, Svetlana K. Nikolaeva<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baraboshkina@mail.ru<sup>✉</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-7209-5905>

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; trofimov@rector.msu.ru

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nikolaeva.sk@gmail.com

**Annotation.** The features of the transformation of coal-mining regions under the influence of the centuries-old process of mining, the formation of technogenic ecological and geological systems (EGS), massifs of bulk soils, and their cross-border impact on residential areas are systematized. Based on the analysis of the state of the resource potential of technogenic EGS and the data obtained and published, it is concluded that in order to achieve national goals in the field of creating comfortable living conditions for the population near historical coal-mining territories, it is important to implement domestic nature-like technologies for reclamation based on a comprehensive approach in the field of theory and practice of forming technophytocenoses, the doctrine of the ecological functions of the lithosphere, and the methodology of ecological and resource mapping, which allow for the synchronization of environmental and socio-economic tasks.

**Keywords:** coal mining industry, bulk soil masses, ecological and geological system, resource potential, lithotope, phytocenosis, nature-like technologies, and socioeconomic problems

**For citation:** Baraboshkina T.A., Trofimov V.T., Nikolaeva S.K. Transformation of ecological and geological systems of massives of pummed soils in the Moscow coal basin. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 108–117. (In Russ.).

**Введение.** По данным Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии одним из лидеров по площади нарушенных земель в пределах Подмосквовного угольного бассейна является территория Тульской области, где за три века на площади порядка 10 тыс. га [Прохоров, Снежко,

2019; Рябов, 2009; Программа..., 2020] произошло формирование техногенных эколого-геологических систем массивов насыпных грунтов объемом более 300 млн т.

Эколого-геологическая система (ЭГС) — определенный (в принципе любой по размерам) объем

литосферы с функционирующей непосредственно в нем или на его поверхности биотой, включая человека и социум [Трофимов, 2010; Базовые..., 2013].

ЭГС подразделяются на природные, природно-техногенные, техногенно-природные, антропогенные. Три последние выделяются в группу техногенных эколого-геологических систем [Королев, Трофимов, 2025].

К насыпным грунтам относят формирующиеся в ходе экстенсивной инженерной и хозяйственной деятельности массивы, которые, классифицируются по генезису на грунты природного происхождения с нарушенной естественной структурой, минеральные отходы промышленных производств, твердые бытовые отходы и др. [Гальперин и др., 2006; Огородникова, Николаева, 2017; ГОСТ 25100-82; ГОСТ 25100-2011 (2013)].

Эколого-геологической системой массивов насыпных грунтов называется совокупность инженерных сооружений и антропогенного литотопа, представленного насыпными грунтами, развитыми на них техноземами, а также сформировавшимися на них специфическими техноприродными биоценозами, состоящими из микробиоценоза, фитоценоза и зооценоза. Данный тип ЭГС относится к техногенным (антропогенным, или искусственным) [Трофимов и др., 2024].

Целью работы является систематика особенностей трансформации качества ресурса геологического пространства в районах распространения техногенных массивов насыпных грунтов (на примере Мосбасса) на базе учения об экологических функциях литосферы, методологии эколого-геологического картографирования и отечественного опыта апробации природоподобных технологий для реабилитации угледобывающих регионов с доминированием техногенных насыпных экогеосистем вблизи селитебных территорий.

**Освоение Подмосковского угольного бассейна (Мосбасса) и формирование ЭГС техногенных насыпных массивов.** Подмосковский угольный бассейн (Мосбасс), является одним из старейших угледобывающих районов страны, который был открыт в XVIII в. и охватывает территории Калужской, Московской, Новгородской, Рязанской, Смоленской, Тверской, Тульской областей (рис. 1) [Грязев, Качурин, Захаров, 2015; Открытие..., 2025]. За три столетия разработки уникальных месторождений в Мосбассе было добыто свыше 1589,3 млн т твердых углеводородов.

Промышленные запасы бурых углей на территории Тульской области составляли порядка 40% запасов Подмосковского угольного бассейна, и в исторической ретроспективе для населения угледобыча являлась значимым региональным социально-экономическим фактором. На различных этапах промышленной революции регион успешно решал социальные и стратегические задачи обеспечения транспортной, энергетической и других сфер хо-



Рис. 1. Карта-схема Подмосковского угольного бассейна (Мосбасса) [Грязев, Качурин, Захаров, 2015]

зяйственной деятельности природными ресурсами [Грязев, Качурин, Захаров, 2015; Открытие..., 2025].

Месторождения углей приурочены к южному и западному крылу Московской синеклизы, в пределах которой выявлено около 95 буроугольных месторождений, объединенных в 22 района. Угольные залежи имеют сложный гумусово-сапропелитовый состав и подразделяются на гумитовые, сапропелито-гумитовые и гумито-сапропелитовые [Барабошкина и др., 2004]. Суммарная площадь развития угленосных отложений достигает 120 тыс. км<sup>2</sup> (до глубин 200 м). Спецификой Подмосковского буроугольного бассейна является линзовидное и пластообразное залегание углей с низкой прочностью вмещающих пород и сложной конфигурацией залежей, гипсометрией и другими особенностями, требующих высоких компетенций специалистов в разведке, строительстве и эксплуатации шахт и угольных разрезов [Грязев, Качурин, Захаров, 2015; Чибрик, 2002; Мазур, 1997; Потапенко, 2012].

Особенностью состава углей данного бассейна является повышенное содержание металлов в зольном остатке. Типичные ассоциации элементов зависят от сернистости исходных углей, например, при более высоком содержании серы в составе отходов углеобогащения накапливаются свинец, селен, ртуть, золото, уран [Калаева и др., 2016], и при развитии наилучших доступных технологий такие отходы имеют большой потенциал для отнесения их к категории вторичных минеральных ресурсов.

На рубеже XX–XXI вв. под влиянием трендов «зеленой» глобальной экологической политики началось закрытие угольных шахт, особенно интенсивное в период с 1993 по 2005 годы, и только восемь шахт были остановлены по причине обработки основных

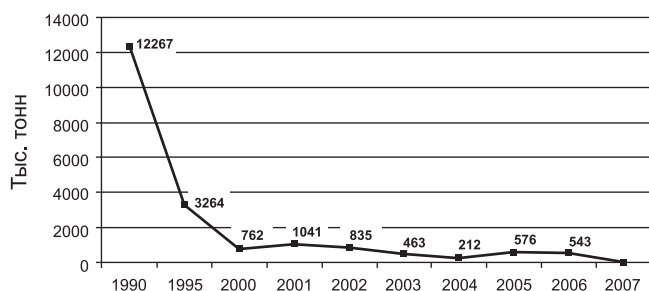


Рис. 2. Тренды промышленной добычи угля в Тульской области (по данным Госкомстата РФ) на рубеже тысячелетий [Программа..., 2020]

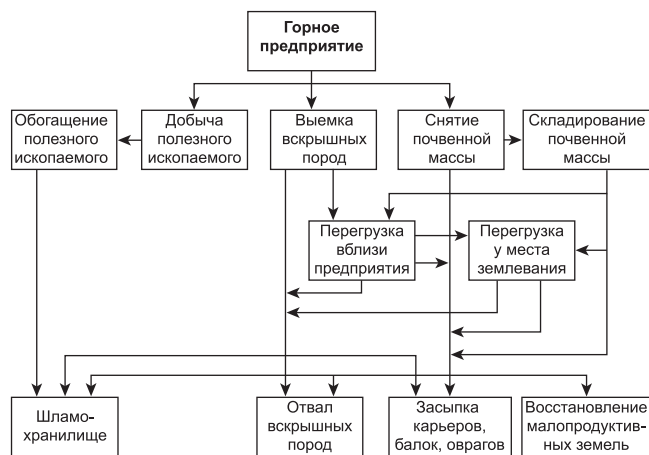


Рис. 3. Модель формирования ЭГС массивов насыпных грунтов шахтного типа, включая этап разработки программ восстановления малопродуктивных земель (по материалам А.Ю. Дриженко, см. [Гальперин и др., 2006])

запасов [Потапенко, 2012; Государственный..., 2013; Барабошкина и др., 2015]. Промышленная добыча угля в регионе уже к 2007 г. (рис. 2) стала резко сокращаться [Грязев и др., 2015; Программа..., 2020].

Согласно регламентам Парижского соглашения по климату (подписано в 2016 г., вступило в силу в РФ в 2019 г.) и глобальным трендам по ускоренному конкурентному развитию низкоуглеродной энергетики с возможным замещением низкокалорийного угля альтернативными энергоресурсами по «Программе развития угольной промышленности...» к 2035 г. не планируется добыча бурых углей в Подмосковном бассейне [Программа..., 2020]. К началу работы выше указанной программы на дневной поверхности в виде различных отходов угольной промышленности накоплено более 317,85 млн т массивов техногенных грунтов (25% от объема добычи товарной продукции) [Калаева и др., 2016].

Техногенные ЭГС сформированы насыпными массивами вскрышных пород (терриконы) и угольных шламов (хвосты — отходов обогащения) (рис. 3). Усложняют ситуацию склады почвенной массы (эдафотоп), не использованные для рекультивации терриконов, и многочисленные земляные инженерные сооружения (насыпи автомобильных и железных дорог, подъездных путей, промплощадок, песчаные подушки и обратные засыпки),



Рис. 4. «Техногенная пустыня» в районе ЭГС, сформированной грунтами породного отвала на территории Узловского района Тульской области [Калаева и др., 2016]

а также техногенно-измененные массивы оснований отвалов, шламохранилищ и других искусственных образований. В итоге в районах земельных отвалов угольных предприятий сформировались техногенные ЭГС (рис. 4).

Насыпные грунты состоят в основном из минеральных частиц природного происхождения, их первоначальная структура изменена в результате разработки и вторичной укладки. К ним относятся: нарушенные природные грунты, вскрышные породы, хвосты обогатительных фабрик и др. Отвалы формируют путем отсыпки без уплотнения различных видов грунтов, полученных при отрывке котлованов, производстве вскрышных работ, проходке подземных выработок и т.п., а также хвостов обогатительных фабрик и отходов производств, удаляемых в отвалы сухим способом. Угольные терриконы сложены широким спектром грунтов, различающихся по дисперсности — от крупнообломочного материала (раздробленных осадочных цементированных пород) до песчаных и глинистых. Часто в отвалы попадают уголь, «конгломераты» — порода с углем, которые вместе с серой являются горючей составляющей насыпного массива. Известны случаи, когда подработка и вскрытие уже перегоревших терриконов провоцируют возобновление окислительных процессов и новое горение [Огородникова, Николаева, 2017; Абакумова и др., 2021; Мосейкин и др., 2013].

Поскольку на настоящий момент разработки углей на территории Подмосковного угольного бассейна минимизированы, актуальным является вопрос доизучения и оценки состояния компонентов ЭГС насыпных массивов, в том числе терриконов, шламоотвалов и др., для определения их потенциала для рекультивации [ИТС 37-2023] и решения задач национальных целей развития территорий и создания комфортных условий для проживания населения и восстановления экосистем в староосвоенных регионах Российской Федерации.

**Методика исследований.** Для оценки современного состояния ЭГС насыпных массивов и особенностей проявления экологических функций абиотических сфер земли были проведены комплексные исследования на типовом участке Мосбасса в северо-восточной части Щекинского района Тульской области.

На камеральном этапе осуществлен анализ опубликованных и фондовых материалов, на базе которого перед началом полевых работ составлены предварительные эколого-геологические картосхемы масштаба 1 : 500 00 с использованием фондовых материалов (топографической, почвенной, геологической, радиологических карт) и осуществлена типизация района по особенностям строения экогеосистем (табл. 1). Исходя из розы ветров, уровня техногенной нагрузки, оказываемой горнодобывающим комплексом (см. рис. 2), опубликованных материалов, были намечены профили для комплексных полевых исследований.

Маршруты осуществлялись вдоль двух профилей: основного — проходящего в направлении с северо-запада на юго-восток области (от фонового участка в с. Ясная Поляна далее по направлению с. Ломинцево, с. Плеханово (шахта № 11), Васильевскую шахту № 17); вспомогательного — от восточной окраины с. Казначеевское через шахту № 21 и шахту № 27 (Мостовская) (приурочены к Усть-Колпинскому и Липковскому месторождениям соответственно) [Барабошкина и др., 2004]. Проведена интерпретация полученных и опубликованных междисциплинарных данных о состоянии компонентов эколого-геологических систем района исследований.

Основными объектами изучения явились компоненты ЭГС: «литотоп/насыпные грунты — эдафотоп/

почвы — гидросфера/поверхностные воды — фитоценозы/растения». Осуществлялась фотофиксация природных и техногенных процессов и экологических последствий их проявлений для фитоценозов. Полевое опробование эдафотопа и растительности выполнялось через 50 м методом конверта с площадок 1×1 м. Аналитические исследования выполнялись в Александровской опытно-методической лаборатории Министерства природных ресурсов РФ.

Фиксировался уровень гамма-излучения на базе радиометра СРП-97-01 [Барабошкина и др., 2004]. Определения вариации мощности дозы гамма-излучения были выполнены в районе семи шахт, четыре из которых (№ 11, 13, 14 и 17) располагались на основном профиле и две — шахты № 21 и 27 — на дополнительном. Систематика данных о трансформации компонентов эколого-геологических систем выполнена на основе метода эколого-геологического картографирования [Эколого-геологические карты, 2002; Baraboshkina, 2003] с учетом новых приоритетов развития региональной экономики до 2035 года [Программа..., 2020].

**Эколого-геологическое картографирование трансформации компонентов ЭГС.** Оценочный блок фрагмента легенды к карте типизации компонентов эколого-геологических систем исследуемого участка Тульской области приведен в табл. 2.

Литотоп в пределах участков опробования представлен техногенными (tH), покровными (grII-III) образованиями — суглинками желтовато-бурыми (до 2 м), подстилаемыми моренной (gIdns), меловыми (K<sub>1</sub>ap), юрскими (J<sub>3</sub>) и каменноугольными (C<sub>1</sub>) отложениями. Эдафотоп вдоль профиля характеризуется преимущественно светло-серыми лесными почвами,

Таблица 1

**Эколого-геологические системы (фрагмент легенды к карте типизации компонентов ЭГС исследуемого участка Тульской области) [Барабошкина, Соболева, Голынская, 2012]**  
**Раздел I. Эколого-геологические системы территории исследований**

Название ЭГС	ЛИТОТИП			ЭДАФОТОП	Фитоценозы (Растительность)	Индекс ЭГС	
	Рельеф	Характеристика					
		Геолого-генетический комплекс	Характеристика первого от поверхности водоносного горизонта	Почвы			
Эколого-геологические системы водо-разделов (В)	Водоразделы уплощенные, плавно снижающиеся к бровке склонов речных долин. Абсолютные отметки изменяются от 275 до 180 м (В1)	gr II-III суглинки желтовато-бурые, мощность достигает 5 м	Воды порового типа, минерализация 0,1–0,2 г/л, гидрокарбонатно-кальциевые	Светло-серые лесные (Л <sub>1</sub> )	Разнотравнозлаковый луг (1)	ВЛ <sub>1</sub> 1	
		gIdn суглинки коричневатобурые, от средних до тяжелых, мощность до 5 м		Серые лесные (Л <sub>2</sub> )	Смешанный лес (2)	ВЛ <sub>1</sub> 2	
		K <sub>1</sub> ap пески, мощностью 10–15 м			Смешанный лес (2)	ВЛ <sub>2</sub> 2	
		Заброшенная пашня (3)		ВЛ <sub>2</sub> 3	Темно-серые лесные (Л <sub>3</sub> )	Разнотравнозлаковый луг (1)	ВЛ <sub>3</sub> 1
					Черноземы оподзоленные (Ч <sup>оп</sup> )	Разнотравнозлаковый луг (1)	ВГЧ <sup>оп</sup> 1

Таблица 2

Оценка класса эколого-геологического состояния (фрагмент легенды к карте типизации компонентов ЭГС исследуемого участка Тульской области) [Барабوشкина и др., 2004; Барабوشкина, Соболева, Голынская, 2012]

Раздел легенды: Оценка класса эколого-геохимического состояния ЭГС

Класс состояния эколого-геологических условий	ЭДАФОТОП	ФИТОЦЕНОЗЫ						Состояние экосистемы
	Почвы	Травянистая растительность			Древесная растительность			
		Z(c) — суммарный показатель содержания токсикантов	Концентрация микроэлементов в укосах и растительных кормах, мг/кг сухого вещества			Концентрация микроэлементов в зпелых тканях листьев, мг/кг сухой массы		
		Cu	Cr	Ni	Cr	Mn	Ni	
Условно-удовлетворительное	8–16	20–80	0,75–2,5	4,5–15	0,5–5	200–300	5–10	Риск (Р)
Неудовлетворительное	16–32	80–100	2,5–5	15–30	5–30	300–500	10–100	Кризис (К)



Рис. 5. Фотофиксация трансформации эдафотоп и фито-, микробо- и зооценозов на территориях, прилегающих к ЭГС массивов насыпных терриконов (фото Т.А. Барабوشкиной)

а также серыми и темно-серыми лесными, черноземами оподзолеными [Барабوشкина и др., 2013].

Вблизи техногенных ЭГС массивов насыпных грунтов фитоценозы отсутствуют не только на крутых откосах терриконов, но и вдоль шлейфов эрозионных техногенных кислотных стоков, ликвидирующих эдафотоп и биоту (фито-, микробо- и зооценозы) (рис. 5).

Интегральная оценка состояния экогеосистем определяется на основе принципа доминанты наилучшего показателя из совокупности использованных абиотических и биотических критериев. Зачастую именно особенности отклика фитоценозов выступают надежными индикаторами различных воздействий, что позволяет использовать растительность для оценки интенсивности техногенных нагрузок, диагностики уровня комфортности территории для живого и выявлять особенности проявления экологических функций массивов насыпных грунтов.

**Трансформация ресурсной и геодинамической экологических функций литосферы в районе ЭГС массивов насыпных грунтов.** Длительная разработка угольных месторождений в пределах ведущих угледобывающих регионов, включая Подмосковский бассейн, повсеместно ведет к трансформации литотопы, и в первую очередь идет изменение рельефа

территории, механическая миграция горных пород. Перепад высот между днищами карьеров и вершинами насыпных массивов грунтов (терриконов) достигает сотен метров.

К доминирующим негативным эколого-ресурсным особенностям в районах формирования ЭГС насыпных техногенных массивов следует отнести: сокращение площадей земель, пригодных для сельскохозяйственного использования или снижение их биопродуктивности; разрушение структуры эдафотопы и фитоценоза, среды обитания микробо- и зооценозов; изменение интенсивности эрозионных процессов — усиление ветровой и водной эрозии; активизация обвальных и оползневых процессов.

За счет загрязнения и изъятия земельных ресурсов, о которых говорилось выше, например, в Тульском регионе трансформация пахотных ресурсов достигает порядка десяти тысяч гектаров. В проекте ликвидации ДОО «Тульское» предусматривалась рекультивация земель на площади более 1460 га, в том числе по шахтам около 780 га, а по угольным разрезам (Ушаковскому, Богородицкому, Кимовскому и Грызловскому) более 580 га. Однако по факту площадь восстановленных земель суммарно составила около 170 га, так как в ретроспективе наблюдался тренд к снижению рекультивированных за год земель, например, с 2012 по 2018 гг. в 1,7 раза (с 1018 га до 589,5 га) [Программа..., 2020].

Преимущественно в регионе осуществлялась техническая рекультивация путем засыпки выработанного пространства вскрышными породами, а снятые (по проекту разработки) плодородные слои почв остаются не востребованными на складах «временного» хранения, достигая в настоящее время более 3 млн м<sup>3</sup> гумусового слоя почв. Суммарная площадь, в той или иной мере подверженная техногенному воздействию, связанная с разработкой месторождений угля, достигает 3102,75 км<sup>2</sup>, или 12,1% от общей территории области. Насыпные отвалы техногенных грунтов по высоте варьируют очень сильно и условно классифицируются на низкие (до 20 м), средние (20–50 м) и высокие (свыше 50 м). Общая схема их формирования представлена выше на рис. 3 [Гальперин и др., 2006].

Занятые массивами техногенных грунтов площади выпадают из сельскохозяйственного и лесного производства. Плодородный слой черноземных почв перемешан со смытой дождевыми потоками и нанесенной ветром угольной золой в радиусе 250–400 м. На пашне встречаются фрагменты пустой породы и спекшегося шлака. Ряд исследователей фиксируют формирование Верхнедонского антропогенного района. В его состав входят территории Кимовского, Узловского, частично Новомосковского, Богородицкого, Киреевского и Щёкинских административных районов Тульской области. Площадь района равна 5760 км<sup>2</sup> [Калаева и др., 2016]. Терриконы хаотично разбросаны по территории всей области. Сформированные техногенные ЭГС массивов насыпных грунтов при экстенсивной работе горнодобывающих предприятий приводят к истощению запасов невозполняемых природных ресурсов и нарушают качество ресурса геологического пространства, как для проживания населения, так и для сельскохозяйственных сфер экономической деятельности. Фактически отмечается трансформация ресурсной экологической функции литосферы.

Однако, согласно исследованиям [Грязев и др., 2015], в настоящее время угли представляют интерес как ресурс комплексного горно-химического сырья. Зольный остаток подмосковных углей содержит редкие рассеянные элементы, цветные и благородные металлы (алюминий, цинк, золото). Редкие рассеянные элементы — это, прежде всего, галлий, натрий, скандий, лантан, церий, тантал, цирконий и др., что может предполагать высокий потенциал диверсификации экономики региона. Поэтому необходимо изучение состава грунтов, слагающих насыпные массивы терриконов, хвостохранилищ, золошлакоотвалов, которые могут рассматриваться как техногенные месторождения.

*Трансформация геодинамической экологической функции литосферы* наблюдается в регионе повсеместно. Расчлененность рельефа в пределах Подмосковного угольного бассейна, избыточная обводненность территории провоцируют развитие склоновых процессов: оползней, обвалов, оплывин, селей и других, обусловленных действием гравитационных сил [Барабошкина, Соболева, Гольнская, 2012; Барабошкина и др., 2004; Рябов, 2009; Трансформация..., 2006; Потапенко, 2012; Программа..., 2025].

Комплексный экологический мониторинг ЗАО «Центрэкомониторинга» [Потапенко, 2012] после закрытия шахт в Тульской области зафиксировал 178 провалов земной поверхности диаметром 7–20 м и глубиной 2–4 м. Была установлена интенсификация провалообразования во времени: за первый пятилетний период в год было задокументировано от 5 до 10 провалов, а далее ежегодно фиксировалось по 15–21 провалов.

Засыпка осуществлена 117 провалов грунтом объемом 32 200 м<sup>3</sup>. Актуально отметить качественное проведение планировочных работ на тех участ-

ках шахтного поля, где осуществлялась засыпка горных выработок грунтом, так как провалов земной поверхности более не зафиксировано. Однако еще сохранились 75 воронок на шахтных полях (объемом около 10 000 м<sup>3</sup>), снижающих ресурс геологического пространства для комфортного проживания населения и безопасного выпаса животных.

Комплексный анализ экологических последствий закрытия угольных шахт, выполненный в работе В.А. Потапенко [Потапенко, 2012], показал, что на пяти шахтах Тульской области ликвидация горных выработок производилась обрушением кровли после извлечения крепи. Этот метод консервации горных выработок оказался не эффективным, т.к. на трех шахтах в последствии произошла активизация провалов, визуально фиксируемых в бортах оврагов, ручьев и рек. Из четырнадцати шахт, ликвидированных путем затопления, над семью также сформировались провалы земной поверхности. Горные выработки, имевшие выход на поверхность, были заполнены насыпным грунтом, а устья перекрыты железобетонными плитами. Однако в дальнейшем металлоконструкции перекрытий были вскрыты и извлечены «черными копателями» на 13 шахтах до глубины 10–30 м, и провальное явление получили новый толчок развития [Потапенко, 2012].

Отличительной особенностью изученных ЭГС массивов насыпных грунтов в регионе является продолжение развития эрозионных процессов вследствие низкой степени их самозарастания и фиторекультивации. Формирующаяся поверхностная корка отвалов легко разрушается из-за контрастных температурных колебаний и воздействия атмосферных осадков (рис. 6).

При поверхностном стоке вследствие эрозионных процессов с терриконов идет миграция поллютантов и формируется «агрессивная» пульпа с аномальными концентрациями токсичных веществ (см. рис. 5), которые поступают на прилегающие территории. Образующиеся растворы серной кислоты меняют кислотно-щелочной баланс почв и поверхностных вод в бассейне реки Ока [Эколого-геологические..., 2016].

Синергетическим эффектом ветровой и водной эрозии (рис. 5, 7), по опубликованным данным, является деградация гумусового горизонта вследствие его загрязнения порядка на 2970 га плодородных земель и снижение их ресурсного потенциала [Мазур, 1997; Барабошкина и др., 2004; Потапенко, 2012; Барабошкина, Соболева, Гольнская, 2012; Антонова и др., 2015; Эколого-геологические..., 2016; Барабошкина, Харькина, Жигалин, 2015; О санитарно-эпидемиологической..., 2025; Шейнкман и др., 2018].

*Трансформация геохимической экологической функции литосферы в районе ЭГС массивов насыпных грунтов.* По результатам полевого комплексного опробования системы «эдафотоп-фитоценозы» установлено, что приоритетными загрязнителями эдафотопы в пределах изученной территории являются свинец, ванадий и марганец. Причем для свин-



Рис. 6. Пример проявления активных эрозионных процессов и минимизация самозарастания крутых откосов терриконов, граничащих с селитебными территориями (фото Т.А. Барабошкиной)

ца характерны средние значения на уровне 30–32 мг/кг, с закономерным увеличением его содержания около автотрасс межрайонного значения и технологической насыпи железнодорожного полотна. Высокие концентрации ванадия и марганца имеют локальное распространение в районе шахты № 14. Повышенные количества токсикантов зафиксированы в дорожном основании, сложенном из обожженных углевмещающих пород и в юго-восточной части района (шахты № 13 и 14), где на локальных участках содержание свинца имеет коэффициент превышения концентрации относительно ПДК (Кпдк) до 50. В пространственном аспекте можно отметить тренд к снижению концентраций свинца в почвах в радиусе 1 км от терриконов до фоновых концентраций [Барабошкина, Соболева, Голынская, 2012].

В северо-восточной части изученного района типичной ассоциацией в почвах являются: Zn, Ni, Pb, Zr, Ba, Ti и P. Вариации геохимического состава техногенных грунтов обусловлены, в первую оче-

редь, геохимическим составом разрабатывавшихся продуктивных пластов и углевмещающих пород [Барабошкина, Соболева, Голынская, 2012].

По составу ассоциаций в укосах трав преобладают Cr, Cu и Ni; в листьях деревьев — Cr, Mn и Ni. Специфическим маркером для растений является Cr, как один из лимитирующих факторов диагностики класса состояния эколого-геологических условий изученных ЭГС. Согласно полученным данным как в эдафотопе, так и в фитоценозах зафиксирован никель. Принципиальным важным аспектом, который надо учитывать на современном этапе, являются перманентные трансграничные выбросы от действующих производств на староосвоенные горнодобывающие территории.

Главными загрязняющими компонентами подземной гидросферы в районе терриконов являются сульфаты, железо, тяжелые металлы, продукты разложения остатков древесины и других материалов, оставленных в горных выработках. Содержание железа в отобранных пробах воды имеет вариации  $K_{\text{ПДК}}$  в 10–20 раз, сухой остаток в 1,2–2 раза, общая жесткость в 2–3 раза. В последнее время наблюдается тенденция к стабилизации показателей качества подземных вод в регионе [О санитарно-эпидемиологическом..., 2025; О состоянии..., 2025; Потапенко, 2012; Информационный..., 2019].

**Трансформация геофизической экологической функции литосферы в районе ЭГС массивов насыпных грунтов.** Фиксируемая общая тенденция вариации гамма-фона в пространственном аспекте сопоставима с полученными геохимическими данными и наследует как особенности геологического строения района, так и ретроспективу развития экономики горнодобывающей деятельности в регионе. Так, радиоактивность почвы в пределах северо-западной части основного профиля изменяется в диапазоне от 0,15 до 0,21 мкЗв/ч. В юго-восточном направлении мощность дозы гамма-излучения варьирует от 0,2 до 0,31 мкЗв/ч, имея максимум вблизи

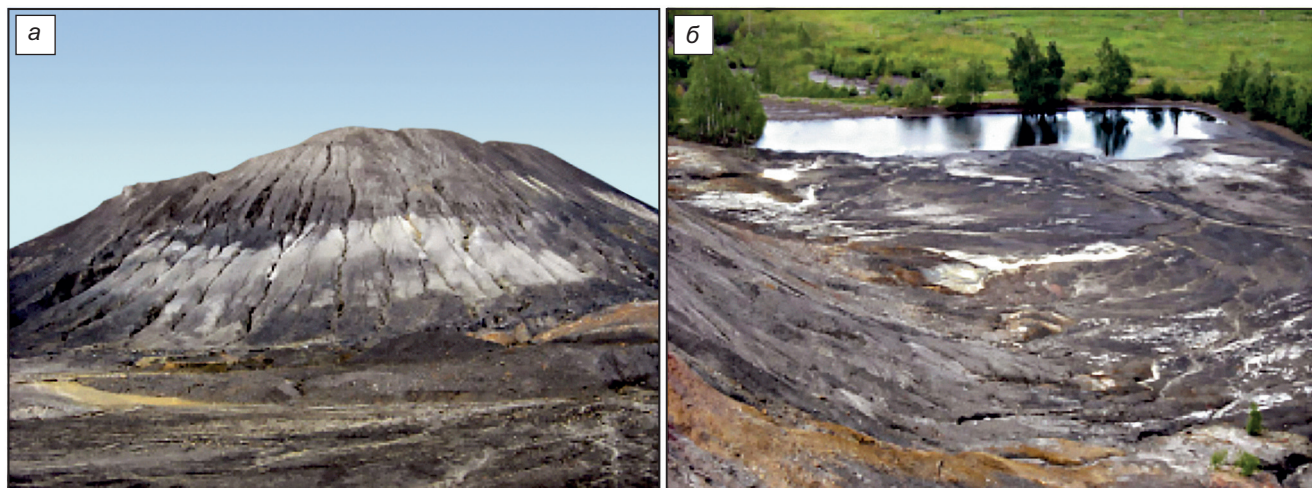


Рис. 7. Породные отвалы угольных шахт Тульской области: а — породные отвалы отработанной шахты АО «Мосбассуголь» в Богородицком районе; б — техногенная пустыня в зоне действия породного отвала [Шейнкман и др., 2018]

шахты № 27 (Мостовская) [Барабоскина и др., 2004; Эколого-геологические..., 2016].

В целом, площадные контуры геохимического загрязнения и величины гамма-фона показывают общую тенденцию к повышению значений вблизи ЭГС терриконов и дорожных насыпей, отсыпанных обожженными углевещающими породами и шлаками из местных котельных; в настоящее время основными региональными факторами риска на территории Мосбасса остаются эколого-геологические системы, сформированные в районе техногенных массивов насыпных грунтов, катализирующие трансформацию экологических функций литосферы в комплексе с трансграничными источниками воздействия.

**Потенциал биологической рекультивации техногенных насыпных массивов для улучшения состояния компонентов ЭГС.** По опубликованным данным Красавина А.П., Хорошавина А.Н., Катаевой И.В., Чибрик Т.С. [Красавин и др., 1985; 1988; Чибрик, 2002] коллектив ВНИИОСуголь внедрил технологию ускоренной биологической рекультивации на аналогичных изучаемым объектах предприятий угольной промышленности. Методика работ предусматривает: «1) нанесение на поверхность отвалов обезвреженных бытовых осадков с иловых площадок городских очистных сооружений — бытовой осадок содержит биогенные элементы (азот, фосфор, калий), необходимые для стартового развития микробиоценозов, которые, в результате своей жизнедеятельности (метаболизма), оказывают стимулирующее влияние на рост и развитие высших растений; 2) внесение гуминового препарата, полученного на основе использования угольных отходов и культуры микроскопических организмов; 3) посев смеси многолетних трав: костреца безостого, донников — белого и желтого» [Красавин, Хорошавин, Катаева, 1985; 1988].

Насыпные техногенные ЭГС для биологической рекультивации представляют большую сложность, особенно те ее участки, где почвенный покров полностью отсутствует, а субстрат с поверхности представлен переотложенными вскрышными грунтами, вторично измененными под воздействием техногенного фактора. В результате литотоп обогащен тяжелыми металлами, фитотоксичен, лишен микрофлоры. Содержание ряда элементов в эдафотопе, литотопе (свинец, медь, никель, цинк, кадмий, олово, ртуть) превышает фоновое иногда в десятки раз [Чибрик, 2002].

Горбунов Н.И. [Горбунов, 1970] классифицирует породы по степени пригодности для биологической рекультивации на три группы: пригодные, малопригодные и непригодные. Группа пригодных пород (I) разделена на две подгруппы: плодородных и потенциально плодородных пород с их характеристиками, т.е. к ним применим оптимальный способ биологической рекультивации. Малопригодные (группа II) и непригодные (группа III) породы классифицированы на неблагоприятные по физическим и химическим свойствам, лимитирующим возможность

выращивания растений и определяющим потенциал использования массива для биологической рекультивации [Горбунов, 1970; Чибрик, Глазырина, 2008].

По результатам многолетних исследований экологических последствий горнодобывающей деятельности в Евразии Т.С. Чибрик с коллегами разработали методические основы биологической рекультивации сложных техногенных экогеосистем [Чибрик, 2002; Чибрик, Глазырина, 2008]. В соответствии с их рекомендациями важно выполнять предпосадочную подготовку техногенного литотопа по системе сидерального пара и выращивать люпины и донники до смыкания крон лесокультур. Люпин накапливает азот в достаточной для растений форме и повышает ферментативную активность техногенных грунтов.

Экспериментально доказана [Чибрик, 2002; Чибрик, Глазырина, 2008] интенсификация роста лесных культур и путем введения в их состав древесных пород — азотонакопителей (ольха, акация, карагана, облепиха), обладающих способностью фиксировать атмосферный азот и трансформировать его в гидролизные соединения. Кроме того, по мнению Т.С. Чибрик, использование ольхи в лесных культурах дает эффект за счет экономии средств на ручных уходах в рядах [Чибрик, 2002]. Около 300 видов древесных, цветочных, декоративных, газонных и грунто-покровных растений, в основном интродуцентов, прошли многолетние испытания на разном агротехническом фоне [Рекультивированные..., 2023; Чибрик, Глазырина, 2008; Шаропова и др., 2020].

По итогам многолетних исследований к группе устойчивых растений, которые Т.С. Чибрик с соавтором рекомендуют для озеленения наиболее загрязненных грунтов, отнесены: лох (серебристый и узколистый), тамариск многоветвистый, снежноягодник белый, тополя (бальзамический, душистый), ива козья, бересклеты (Маака и бородавчатый), сирень венгерская, бузина красная, жимолость татарская, вишня песчаная [Чибрик, 2002; Чибрик, Глазырина, 2008].

Газонные и почвопокровные травы этой группы: ежа сборная, кострец безостый, мятлики (луговой и обыкновенный), пырей ползучий, овсяница красная. В эту группу входят и некоторые широко распространенные дикорастущие виды: мать-и-мачеха, латук татарский, синяк обыкновенный, вьюнок полевой. Значительная часть перечисленных растений дает декоративный и санитарно-гигиенический эффект [Чибрик, Глазырина, 2008].

По сути, в связи с биоаккумуляцией токсичных элементов<sup>5</sup>, многолетние травы, а также некоторые листопадные деревья и кустарники выполняют

<sup>5</sup> Фитомасса растений содержит тяжелые металлы и другие элементы. В дикорастущих растениях: свинца в 4–15 раз больше фонового, цинка в 20–500 раз больше фонового, меди — в 3 раза. В зеленой массе овсяницы красной: свинца в 7–20 раз больше фонового, цинка в 42–292 раза, меди — в 46 раз больше. Тамариск многоветвистый может накапливать до 3,9% серы без видимых повреждений, достаточно много накапливает серы лох узколистый [Чибрик, Глазырина, 2008].

функцию «зеленого фильтра» — биохимического барьера [Чибрик, Глазырина, 2008].

В основу классификации вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель [ГОСТ Р 59070-2020] положена их непригодность, определяемая по химическим (сильная кислотность и щелочность, высокое засоление) и физическим (сильная каменистость) свойствам.

Согласно систематике Т.С. Чибрик, М.А. Глазыриной [Чибрик, Глазырина, 2008] в мировой рекультивационной практике сложилась особая форма ведения лесного хозяйства в пределах техногенных экогеосистем: 1) создание предварительных мелиоративных насаждений<sup>6</sup> из быстрорастущих нетребовательных пород; 2) постепенная замена их насаждениями из более ценных пород.

Успешно функционирует и трехмерное лесоводство — создание устойчивых экосистем, заменяющих менее продуктивную естественную растительность, в виде обширных лесополос, перемежающихся с пастбищными угодьями [Чибрик, Глазырина, 2008]. Трехступенчатая лесная рекультивация заключается в создании трех последовательно сменяющихся групп насаждений: 1) пионерной (акация белая, ольха черная); 2) промежуточной (платан, быстрорастущие тополя); 3) заключительной (дуб, ясень белый, орех). Есть положительный опыт [Чибрик, Глазырина, 2008] выращивания перечисленных трех групп фитоценозов в едином насаждении: ряд мелиоративных, ряд быстрорастущих и ряд основных лесобразующих пород. Затем постепенно вырубает ольху и акацию через 16–18 лет, быстрорастущие породы через 25–30 лет, оставшиеся основные породы используются 45–60 лет. По сути, рационально создание в пределах эколого-геологических систем массивов насыпных грунтов устойчивых биоценозов на основе природоподобных технологий.

**Заключение.** В пределах угледобывающих бассейнов при промышленной разработке углей и после ее прекращения происходят значительные изменения эколого-геологических условий территорий, особенно в районах распространения массивов насыпных

грунтов терриконов, шламонакопителей и золошлакоотвалов. В Подмосковном угольном бассейне произошла и продолжается (за счет воздушной и водной миграции загрязнителей) потеря земель для сельскохозяйственной и иной деятельности. Кроме этого, как показали проведенные маршрутные наблюдения, процесс самозарастания крутых склонов терриконов практически минимизирован. Всё в совокупности привело к существенной трансформации экологических функций литосферы (ресурсной, геодинамической, геохимической, геофизической). Собранные опубликованные данные, полученные результаты полевых, лабораторных и картографических работ фиксируют трансформацию компонентов эколого-геологических систем техногенных насыпных массивов по широкому спектру параметров и крайне низкий потенциал их самовосстановления. Поэтому требуется проведение дальнейших мероприятий по рекультивации нарушенных территорий.

Рационально использовать в пределах эколого-геологических систем техногенных насыпных массивов Подмосковного бассейна положительный опыт технической и биологической рекультивации. Рекомендуется после проведения террасирования крутых склонов поэтапное использование фитоценозов для минимизации накопленных эколого-геологических проблем. Внедряя комплекс подходов, в том числе, наилучшие доступные природоподобные технологии, успешно зарекомендовавшие себя в практике реабилитации аналогичных объектов, совместно со специалистами в области промышленной ботаники, агротехники можно добиться улучшения общего состояния эколого-геологических систем насыпных массивов для их последующего нового освоения — разрешенного использования для определенного целевого назначения (лесо- и сельскохозяйственного, строительного, рекреационного) с учетом экономической целесообразности для минимизации факторов риска и создания условий для комфортного проживания населения на селитебных территориях, исторически граничащих с ЭГС техногенных массивов насыпных грунтов.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

<sup>6</sup> Мелиоративные породы — ольха, акация белая, тополя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абакумова Н.В., Николаева С.К., Самарин Е.Н. Классификации техногенных отложений в инженерной геологии: исторический обзор, современный взгляд на проблему // Инженерные изыскания. 2021. Т. 15, № 1–2. С. 28–40.

Антонова И., Базарский В., Косинова И.И., Барабошкина Т.А. и др. Экологическая геология крупных горнодобывающих районов Северной Евразии / Под ред. И.И. Косиновой / Воронеж: ОАО «Воронежская областная типография», 2015. 576 с.

Базовые понятия инженерной геологии и экологической геологии / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: ОАО Гео-маркетинг, 2012. 320 с.

Барабошкина Т.А., Жигалин А.Д., Матюшина Е.С. и др. Оценка изменения геологической среды под воздействием

угледобывающего комплекса // Сергеевские чтения. Т. 6. М.: ГЕОС, 2004. С. 224–227.

Барабошкина Т.А., Золотарев Г.М., Голынская Ф.А. Трансформация качества ресурса геологического пространства под влиянием горнодобывающей деятельности (на примере угольного бассейна) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 8. С. 117–122.

Барабошкина Т.А., Соболева А.Н., Голынская Ф.А. Эколого-геохимические особенности Подмосковного угольного бассейна // Экология и промышленность России. 2012. № 6. С. 56–59.

Барабошкина Т.А., Харькина М.А., Жигалин А.Д. Освоение минеральных ресурсов и динамика экологических функций абиотических сфер Земли // Бюллетень

Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2015. Т. 90. № 4. С. 73–80.

Гальперин А.М., Ферстер В., Шеф Х.-Ю. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов. Т. 2. Старые техногенные нагрузки и наземные свалки. М.: Изд-во МГГУ, 2006. 258 с.

Государственный доклад: «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2012 году». М.: Минприроды, 2013. С. 50–60.

Горбунов Я.Я. Химико-минералогические признаки пригодности вскрышных пород для использования при биологической рекультивации // Рекультивация в Сибири и на Урале. Новосибирск, 1970. С. 42–56.

Грязев М.В., Качурин Н.М., Захаров Е.И. Горнодобывающая отрасль в экономике Тульской области. Состояние и перспективы // Известия ТулГУ. Науки о Земле. № 2. 2015. С. 57–66.

ГОСТ 25100-82. Грунты. Классификация М.: ГК СССР по делам строительства, 1982. 19 с.

ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Стандартинформ, 2013. 44 с.

ГОСТ Р 59070-2020. Охрана окружающей среды. Рекультивация нарушенных и нефтезагрязненных земель. Термины и определения. М., 2021. 22 с.

Информационный бюллетень о состоянии недр. М.: Геоинформмарк, 2019. С. 30–67.

ИТС 37-2023. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение угля (утв. Приказом Росстандарта от 14.12.2023 № 2707). М., 2023. 318 с.

Калаева С.З., Богданов С.В., Лукин Н.О., Огер А.А. Породные отвалы угольных шахт России // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2016. Вып. 1. С. 3–23.

Королев В.А., Трофимов В.Т. Систематика эколого-геологических систем. М.: ООО СамПолиграфист, 2025. 120 с.

Красавин А.П., Хорошавин А.Н., Катаева И.В. Восстановление нарушенных земель с использованием бактериальных препаратов // Вестн. с.-х. науки. 1988. № 10. С. 64–68.

Красавин А.П., Хорошавин А.Н., Катаева И.В. Ускоренная рекультивация породных отвалов угольных предприятий с использованием микроорганизмов // Растения и промышленная среда. Свердловск, 1985. С. 124–130.

Мазур В.С. Экология Шекинского района Тульской области. Тула: Тульская типография, 1997. 199 с.

Мосейкин В.В., Гальперин А.М., Ермолов В.А., Круподеров В.С. Анализ ситуации с горнопромышленными отходами. (геоэкологический аспект) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 1. С. 7–23.

О санитарно-эпидемиологической обстановке в Тульской области в 2024 г. Государственный доклад. Тула: УФС по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека по Тульской области, 2025. 195 с.

О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2024 году. Государственный доклад. М.: Минприроды, 2025. С. 50–60.

Огородникова Е.Н., Николаева С.К. Техногенные грунты. М.: Изд-во РУДН, 2017. 631 с.

Открытие музея шахтеров Мосбасса [Электронный ресурс] <https://rutube.ru/video/55c7da91e54af1deba1d533bb544c288/> (дата обращения 17.07.2025).

Потапенко В.А. Экологические последствия ликвидации угольных шахт в Тульской области // Безопасность жизнедеятельности. 2012. № 12 (144). С. 34–38.

Программа развития угольной промышленности России на период до 2035 года/ Распоряжение от 13.06. 2020 г. № 1582-р. М.: Правительство Российской Федерации. <http://static.government.ru/media/files/OoKX6PriWgDz4CNNAxwIYZEE6zm6I52S.pdf> (дата обращения 17.07.2025).

Прохоров Д.О., Снежко И.И. Проблема учета и регистрации отвалов горных пород в государственных кадастрах // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2019. Вып. 1. С. 17–29.

Рекультивированные отвалы, как депонирующая среда актуального и отложенного углеродного следа / П.П. Кречетов, А.В. Шарапова, Д.А. Касимова, О.В. Черницова // Почвы и окружающая среда [Электронный ресурс]: Сборник научных трудов Всеросс. научной конференции с международным участием. Новосибирск: НГУ, 2023. С. 543–548.

Рябов Г.Г. Обоснование эколого-технологических положений системы обращения с отходами производства горнопромышленного региона: Автореф. дисс. ... д. т. н. Тула: ТГУ, 2009. 24 с.

Трансформация экологических функций литосферы в эпоху техногенеза / Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г., Барабошкина Т.А. и др. М.: Ноосфера, 2006. 720 с.

Трофимов В.Т. Эколого-геологическая система и новая структура экосистемы // Геология, география и глобальная энергия. 2010. № 1(36). С. 6–26.

Трофимов В.Т., Барабошкина Т.А., Николаева С.К. Ресурсный потенциал эколого-геологических систем массивов намывных грунтов // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2024. Т. 63. № 5. С. 164–174.

Шарапова А.В., Семенов И.Н., Леднев С.А. и др. Биохимический потенциал саморазвития посттехногенных горнопромышленных геоконструкций Подмосковского бурогоугольного бассейна // Уголь. 2020. № 10. С. 56–61.

Шейнкман Л.Э., Сарычев В.И., Рябов Г.Г., Машинцов Е.А. Оценка экологической безопасности освоения месторождения при подземной добыче угля // Известия ТГУ. Науки о Земле. 2018. № 3. С. 73–84.

Чибрик Т.С. Основы биологической рекультивации. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2002. 172 с.

Чибрик Т.С., Глазырина М.А. Биологическая рекультивация и мониторинг нарушенных земель. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2008. 196 с.

Эколого-геологические карты / Трофимов В.Т., Зилинг Д.Г., Барабошкина Т.А. и др. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2002. 132 с.

Эколого-геологические условия России. Т. 2. Трансформация экологических функций литосферы территории России под влиянием антропогенного воздействия и ее экологические последствия / Трофимов В.Т., Харьковина М.А., Барабошкина Т.А., Григорьева И.Ю., Жигалин А.Д., Аверкина Т.А., Зилинг Д.Г. М.: КДУ, Университетская книга, 2016. 280 с.

Baraboshkina T. Ecological-geochemical mapping of the mining area // Mineral Exploration and of the Seventh Biennial SGA Meeting. Vol. 1. Millpress etherlands, Athens, Greece Millpress, Rotterdam, 2003. P. 13–15.

Статья поступила в редакцию 25.08.2025, одобрена после рецензирования 12.11.2025, принята к публикации 27.02.2026

УДК 504.06/504.4/550.4

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-118-130

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РОДНИКОВЫХ ВОД ЩЕЛКОВСКОГО ГОРОДСКОГО ОКРУГА (МОСКОВСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Дарья Сергеевна Гусарова<sup>1</sup>✉, Дарья Андреевна Яблонская<sup>2</sup>,  
Ольга Романовна Филатова<sup>3</sup>, Ольга Александровна Липатникова<sup>4</sup>,  
Татьяна Николаевна Лубкова<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; siren16@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; yablonskayada@my.msu.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; orlova8313@yandex.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; lipatnikova\_oa@mail.ru

<sup>5</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; tanya\_lubkova@mail.ru

**Аннотация.** Проведено комплексное исследование химического состава 12 родниковых вод городского округа Щелково (Московская область). Определены гидрохимические параметры (ХПК, pH, электропроводность) и концентрации основных ионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ). Воды характеризуются слабой минерализацией (0,1–0,7 г/л) и общей жесткостью до 8 мг-экв/л, преобладают ионы кальция и гидрокарбоната. Величина ХПК для ряда родников составляет от 16 до 40 мгО/л. Формирование состава родниковых вод связано с инфильтрацией атмосферных осадков через толщу современных отложений, подверженных техногенной нагрузке. Используются интегральные индексы (WQI, %Na, MH, PI, PS) для оценки питьевого и поливного качества. Исследованные источники преимущественно относятся к воде отличного и хорошего качества; выявлены четыре родника с неудовлетворительным и удовлетворительным качеством по отдельным показателям.

**Ключевые слова:** родниковые воды, городской округ Щелково, макросостав, индекс качества

**Для цитирования:** Гусарова Д.С., Яблонская Д.А., Филатова О.Р., Липатникова О.А., Лубкова Т.Н. Комплексная оценка качества родниковых вод Щелковского городского округа (Московская область) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 118–130.

## COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF THE QUALITY OF SPRING WATERS IN THE SHCHELKOVO DISTRICT (MOSCOW REGION)

Darya S. Gusarova<sup>1</sup>✉, Darya A. Yablonskaya<sup>2</sup>, Olga R. Filatova<sup>3</sup>, Olga A. Lipatnikova<sup>3</sup>,  
Tatyana N. Lubkova<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; siren16@yandex.ru ✉

<sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; daria.yablonskaya@gmail.com

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; orlova8313@yandex.ru

<sup>4</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; lipatnikova\_oa@mail.ru

<sup>5</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; tanya\_lubkova@mail.ru

**Abstract.** A comprehensive study was conducted on the chemical composition of 12 spring waters from the Shchyolkovo Urban District (Moscow Region). Hydrochemical parameters (COD, pH, electrical conductivity) and concentrations of major ions ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) were determined. The waters are characterized by low mineralization (0.1–0.7 g/L) and total hardness up to 8 mg-equiv./L, with calcium and bicarbonate ions predominating. The COD values for several springs ranged from 16 to 40 mg O<sub>2</sub>/L. The chemical composition of spring waters is influenced by the infiltration of atmospheric precipitation through layers of recent sediments subjected to anthropogenic impact. Integral indexes (WQI, %Na, MH, PI, PS) were used to assess their suitability for drinking and irrigation. The studied sources mostly correspond to water of excellent and good quality; however, four springs exhibited unsatisfactory or acceptable quality based on certain parameters.

**Keywords:** spring waters, Shchelkovo district, macro composition, quality index

**For citation:** Gusarova D.S., Yablonskaya D.A., Filatova O.R., Lipatnikova O.A., Lubkova T.N. Comprehensive assessment of the quality of spring waters in the north-east of the Moscow region. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 118–130. (In Russ.).

**Введение.** Родниковые воды традиционно воспринимаются как пригодные для употребления без дополнительной обработки, что связано с естественной фильтрацией через водовмещающие породы [Шварцев, 1998; Manga, 2001]. Однако формирование

химического состава таких вод зависит от множества факторов — климата, почвенного и растительного покрова, геологии и гидрогеологии [Chaudhry, Malik, 2017]. В условиях интенсивной хозяйственной деятельности сопоставимыми по значимости с природ-

ными могут становиться антропогенные факторы [Giri, Singh, 2014; Prasad, et al., 2020; Chen, et al., 2024].

Особое значение имеют диффузные (неточечные) источники загрязнения — когда загрязнители поступают с обширных территорий без конкретной точки выброса, что затрудняет их выявление и контроль. Они являются одной из основных причин ухудшения качества родниковых вод за счет массовой доставки различных загрязняющих веществ в зону питания родников [Веницианов, Кирпичникова, 2018; Слабунова, Суровикина, 2020; National ..., 2003]. К типичным диффузным источникам относятся соли противогололедных реагентов, приводящие к загрязнению ионами хлора, натрия, кальция и аммония [Kaushal, 2005], а также сельскохозяйственные загрязнения [Янин, 2018]: минеральные удобрения — основные источники азота и фосфора [Schwarzenbach et al., 2010], отходы животноводства и птицеводства — источники сульфатов, хлоридов, фосфатов и аммония [Головатый и др., 2015].

Родниковые воды являются эффективным индикатором диффузных источников загрязнения. В частности, повышенное содержание нитратов отмечается в источниках, расположенных в жилых массивах и садовых товариществах, причем наибольшие концентрации характерны для конца лета — начала осени [Трифонов и др., 2022; Кострикин, 2020]. В городских условиях состав родниковой воды зачастую отличается более высоким содержанием нитратов, сульфатов и хлоридов по сравнению с водопроводной водой [Буймова, Костров, 2008; Новосельцева, 2019].

Таким образом, родниковые воды менее подвержены загрязнению относительно поверхностных вод, однако их состояние требует регулярного контроля из-за прямого воздействия на здоровье населения [Zhang et al., 2019; Kallon, 2024]. Актуальность проблемы подтверждается динамичным ростом спроса на чистую питьевую воду в России — так, в 2023 г. рынок бутилированной воды увеличился почти на 39%, а внутреннее производство — на 14,5% по сравнению с предыдущим годом [Анализ..., 2024].

Несмотря на то, что качество родниковой воды традиционно оценивается путем сравнения содержаний химических компонентов с нормативами предельно допустимых концентраций (ПДК), такой подход имеет определенные ограничения. В частности, он недостаточно учитывает суммарное влияние нескольких параметров одновременно и может не выявлять потенциальные риски, когда показатели лишь близки к нормативам, но формально не превышают их.

В этих случаях особенно полезен интегральный показатель — индекс качества воды (Water Quality Index, WQI) [Aminiyan, 2020], который объединяет ключевые параметры, такие как электропроводность, рН, жесткость, а также концентрации природных (например, гидрокарбонат-ион, кальций) и антропогенных компонентов (хлорид-ион, нитрат-

ион и др.). Каждому из параметров присваивается весовой коэффициент, отражающий его влияние на безопасность и пригодность воды для питья. Рассчитанный таким образом WQI позволяет получить комплексную и системную оценку качества воды в целом, выявлять скрытые риски и учитывать пролонгированный эффект воздействия нескольких загрязнителей, что соответствует требованиям российских санитарных правил и рекомендациям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ).

Помимо питьевого назначения, родниковая вода нередко используется для полива сельскохозяйственных культур, в том числе при выращивании рассады в домашних условиях. Для оценки ее пригодности в аграрных целях определяются специальные показатели [Bouselsal et al., 2025], позволяющие оценить потенциальное воздействие ионного состава поливной воды на физико-химические свойства почв и продуктивность растений [Устойчивое..., 2021].

В настоящей работе представлены результаты комплексного исследования родниковых вод городского округа Щёлково (Московская область), включающего анализ химического состава и факторов формирования состава вод. Традиционный подход к оценке качества воды сравнением с нормативными показателями дополнен расчетом интегральных показателей питьевого и поливного качества вод, что позволяет учесть совокупный и пролонгированный эффект загрязнения, включая влияние ненормируемых параметров. Результаты исследования позволят определить доминирующие факторы формирования состава вод родников и могут быть положены в основу разработки программ мониторинга, направленных на снижение антропогенной нагрузки и обеспечение безопасности подземных вод как важного источника питьевого водоснабжения.

**Территория исследования.** Городской округ Щёлково (северо-восток Московской области) расположен на стыке Мещерской низменности и Клинско-Дмитровской гряды (что определяет вариации элементов рельефа) в условиях умеренно-континентального климата ( $T$  от  $-13^{\circ}\text{C}$  до  $+25^{\circ}\text{C}$ ) с годовым количеством осадков около 500 мм, максимум которых приходится на летний период. Геологическое строение типично для Восточно-Европейской платформы: древний кристаллический фундамент перекрыт мощным чехлом осадочных пород палеозоя, мезозоя, четвертичных ледниковых и аллювиальных образований [Вагнер, 2003].

Изучаемая территория находится в южной приосевой части Московского артезианского бассейна, основные водоносные породы которого — каменноугольные (источник питьевой и технической воды) и девонские трещиноватые известняки и мергели. Мезозойско-кайнозойский водоносный комплекс распространен практически на всей территории округа, за исключением района Щёлковского поднятия, где породы комплекса практически полностью размыты [Генеральный..., 2024]. Разгрузка вод

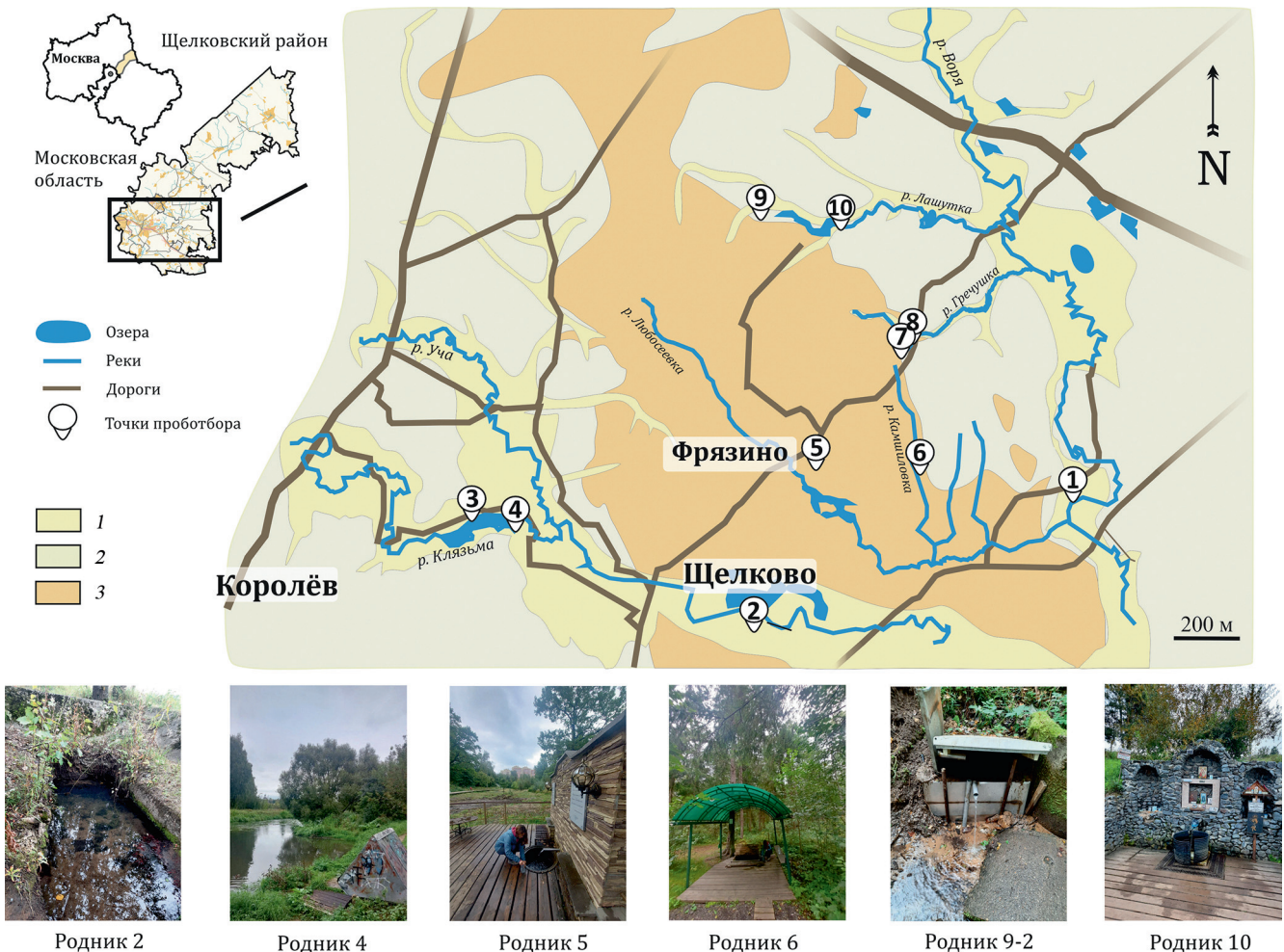


Рис. 1. Расположение исследуемых родников на территории городского округа Щелково. Номера точек соответствуют номерам проб. В точке 9 три выхода родниковых вод, отобраны пробы 9-1, 9-2, 9-3. 1 — Валдайский горизонт. Аллювиальные отложения надпойменной террасы. (aIIv) Пески, суглинки; 2 — Московский горизонт. Водно-ледниковые отложения. (f,lgIIms). Пески, валуны; 3 — Московский горизонт. Ледниковые отложения (морена) (gIIms). Суглинки с гравием

комплекса происходит в реки Клязьма, Любосеевка и Воря, а также в виде многочисленных родников.

Техногенная нагрузка обусловлена предприятиями промышленности (фармацевтика, химия, металлургия и др.), сельским хозяйством (удобрения, мелиоранты и агрохимикаты), строительством дорог, добычей полезных ископаемых (пески и гравий, кирпично-черепичное сырье, карбонатные породы, торф) [Генеральный ..., 2024]. Одним из основных источников загрязнения водных объектов округа являются Щелковские очистные сооружения (ЗАО «Экоаэросталкер») и промышленные/бытовые стоки. Так, в 2020 г. объем сточных вод, поступивших в реку Клязьма, составил 266 млн м<sup>3</sup>, при этом доля воды, очищенной до нормативных показателей, незначительна [Лямперт и др., 2022].

**Методы исследования.** В сентябре 2023 г. были отобраны пробы воды из 12 родников (рис. 1) с фиксацией координат GPS. На месте измеряли температуру, электропроводность и pH с помощью портативного анализатора BLE-C600 (табл. 1).

Химическое потребление кислорода (ХПК) определяли методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием (спектрофото-

метр Portlab 501) согласно ГОСТ 31859–2012. Для контроля повторяемости применялся подход двукратных измерений одной и той же пробы. Концентрации основных ионов (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) измеряли методом капиллярного электрофореза (СКЭ Капель-205 со спектрофотометрическим окончанием, оборудование приобретено по программе развития МГУ, заявленная производителем погрешность измерения составляет 8–10%), содержание HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> оценивали методом объемного титрования. Для контроля качества результатов рассчитывали ионный баланс с допустимым расхождением ≤5% (1):

$$\text{ОИБ} = \frac{\text{Кат} - \text{Ан}}{\text{Кат} + \text{Ан}} \times 100\%, \quad (1)$$

где Кат и Ан — суммы катионов и анионов в мг-экв/л.

Обработка данных проведена с помощью Microsoft Excel, визуализация макрокомпонентного состава вод — с помощью модулей GSS и Gtplot программного пакета The Geochemist's Workbench (GWB) в варианте бесплатной версии GWB Community Edition, построение рисунков выполнено с помощью векторного графического редактора Corel Draw.

Таблица 1

Описание точек отбора образцов воды из родников на территории городского округа Щелково

Номер пробы	Координаты, с.ш., в.д.	Описание места отбора	T, °C	σ, мкСм/см	pH
1	55,946979 38,201247	Родник расположен в 400 м к югу от автобусной остановки «Мизиново», в 300 м к западу от тупика на улице Речная, в понижении у проселочной дороги на окраине деревни Мизиново. Родник каптирован. Вода прозрачная, цвета и запаха не имеет.	14,3	466	5,80
2	55,911439 38,046331	Родник находится на поле в 150 м к северо-западу от ЖК Потапово, в 180 м к северо-востоку от пересечения улиц Заводской и Потаповской. Родник представляет собой искусственный водоем с естественным выходом воды на дне. Вода прозрачная, запаха не имеет.	15,1	792	6,72
3	55,941392 37,910747	Родник расположен на улице Шмидта напротив дома № 3. Обустроен в виде крытого бетонного колодца. Для набора воды используется оцинкованное ведро, прикрепляющееся к одной из стенок. Вода прозрачная, без запаха.	12,0	611	6,41
4	55,937887 37,932187	Мальцевский родник. Расположен в пойме реки Клязьма в 70 м к северу от Дома культуры Мальцево. Вода находится в бетонном колодце с оцинкованной крышей, пот которой крепится оцинкованное ведро для набора воды. Запаха нет, вода прозрачная. Уровень воды низкий, на дне плавала пластиковая бутылка.	14,2	725	7,04
5	55,954226 38,080243	Гребневский родник находится в 20 м к северу от пересечения улиц Саровской и Березовой в облагороженном сквере деревни Гребнево. Родник каптирован. Вода прозрачная и без запаха.	15,0	177	5,76
6	55,953969 38,127907	Родник располагается в 600 м к северу от памятника Погибшим в ВОВ деревни Камшиловка, в 200 м к юго-востоку от пересечения улицы Сафинской и реки Камшиловки. Представляет собой деревянный бревенчатый колодец. Вода прозрачная, запаха не имеет.	13,7	60	5,20
7	55,985986 38,118728	Родник находится в 160 м к югу от пресечения Лунной улицы и Звездного тупика в селе Трубино. Представляет собой деревянный колодец с бетонным основанием. Вода прозрачная, на дне колодца белый осадок, запаха не имеет.	12,9	190	5,59
8	55,988961 38,124729	Родник Серебряный, расположен в 40 м западнее от дома 85Б на Фряновском шоссе. Родник каптирован. Вода прозрачная, без запаха.	14,3	270	6,21
9-1	55,989507 38,127294	Находится между ДНП Феникс и СНТ Корякино, в 100 м к юго-востоку от улицы Лермонтовской. Присутствует три выхода родниковой воды. Все выходы каптированы, вода прозрачная, запаха не имеет.	12,7	112	5,54
9-2			11,4	160	5,71
9-3			11,2	132	6,09
10	56,020860 38,089243	Родник расположен у плотины Богословского водохранилища на р. Лашутка (деревня Костюнино)	13,9	122	6,35

Расчет интегрального показателя выполняли поэтапно: для компонентов воды определяли относительную значимость (2); затем провели нормализацию (3), величина  $q_{pH}$  рассчитана по (4); для каждого родника вычислили величину индекса качества воды WQI (Water Quality Index) (5); значения параметров нормировали по нормативам СанПиН № 1.2.3685-21 [2022] и рекомендациям ВОЗ:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (2)$$

где  $W_i$  — относительный вес,  $w_i$  — вес параметра,  $n$  — количество параметров;

$$q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100\%, \quad (3)$$

где  $C_i$  — измеренная концентрация,  $S_i$  — нормативная величина;

$$q_{pH} = \begin{cases} \frac{pH-7}{8,5-7} \times 100 & pH > 7, \\ \frac{7-pH}{8,5-7} \times 100 & pH < 7, \end{cases} \quad (4)$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n W_i \times q_i. \quad (5)$$

Показатели поливного качества воды рассчитаны на основе концентраций ионов макросостава, выраженных в мг-экв/л.

Расчет показателя %Na (6) необходим для оценки риска ухудшения свойств почвы, поскольку чем выше концентрация натрия в воде для полива, тем активнее он насыщает почвенный поглощающий комплекс. Это, в свою очередь, увеличивает риск диспергирования и распада почвенных агрегатов, что ведет к разрушению структуры почвы и снижению ее проницаемости.

Таблица 2

## Значения физико-химических параметров и макросостав вод родников

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9-1	9-2	9-3	10	ПДК, ВОЗ	СХС
Ca <sup>2+</sup>	43,9	91,1	101	123	26,5	11,7	28,9	47,9	14,2	14,8	16,9	18,3	75	38,3
Mg <sup>2+</sup>	11,7	16,8	14,4	21,2	5,6	2,3	6,3	9,9	3,4	6	4,2	4,4	50	16,5
Na <sup>+</sup>	31,8	50,3	19,8	28,3	9,1	2,5	11,1	8,1	6,5	9,8	7	4,3	200	23,8
K <sup>+</sup>	8,8	4,8	18,9	3,9	1,4	0,8	1,3	3,3	4,2	11	5,5	4,7	12	2,7
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61,3	189	160	317	29,7	14,9	83,3	140	22,6	48,8	42,2	42,2	240	222,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	35,5	136	48	59,8	30,7	23,1	21,8	32,3	34,9	16	13,3	23,4	500	18,2
Cl <sup>-</sup>	85,1	74,8	117	83,3	27,8	10,2	30,2	23,5	16,2	25	23,2	20,7	350	15,9
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3,7	0,7	2,0	0,4	0,2	0,1	0,2	0,4	0,4	1,1	0,5	0,3	1,5	0,52
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	47,7	8,9	32	39	16,9	4,6	7,3	10,5	10,4	8,6	9,3	19,3	45	2,13
Минерализация	329	573	513	676	147	70	190	276	112	141	122	137	1500	354
ХПК, мгО/л	27	40	16	17	<5	<5	<5	13	9	7,7	10	8	15	не ука- зано
Жесткость, мг-экв/л	3,1	5,9	6,2	7,9	1,8	0,8	2	3,2	1	1,2	1,2	1,3	10	

Примечание. Содержание ионов в воде дано в мг/л. ПДК — предельно допустимая концентрация. ВОЗ — всемирная организация здравоохранения. СХС — средний химический состав в зоне гипергенеза области умеренного климата [Шварцев, 1998].

$$\begin{aligned} \%Na \text{ (Percentage Sodium)} &= \\ &= \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}. \end{aligned} \quad (6)$$

Несмотря на важную роль магния в физиологии растений (центральный атом хлорофилла, активация ферментов, транспорт фосфатов) [Воеводина, Воеводин, 2015], расчет показателя МН (7) необходим для оценки риска при повышенном содержании магния в поливной воде. Высокие концентрации магния в воде приводят к его накоплению в почве, увеличивая ее щелочность, что ухудшает условия роста растений.

$$МН \text{ (Magnesium Hazard)} = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100. \quad (7)$$

В условиях повышенного теплообеспечения при каждом поливе рассады происходит интенсивное испарение воды, что способствует накоплению в почве малорастворимых солей. Таким образом, расчет индекса потенциального засоления PS (8) необходим для оценки долгосрочного кумулятивного эффекта от присутствия сульфат- и хлорид-ионов в анализируемой воде.

$$PS \text{ (Potential Salinity)} = Cl^- + \sqrt{SO_4^{2-}}. \quad (8)$$

Высокое содержание ионов Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> в родниковой воде снижает доступность влаги для корней растений из-за повышения осмотического давления почвенного раствора. Это может вызвать увядание даже при достаточной влажности почвы. Поэтому расчет индекса потенциальной проницаемости PI (9) необходим для оценки риска ухудшения водоснабжения растений при использовании такой воды.

$$PI \text{ (Permeability index)} = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \times 100. \quad (9)$$

Категории оценки качества воды по указанным показателям приведены в табл. 4.

**Результаты и обсуждение.** Результаты определения основных физико-химических параметров и содержание ионов макросостава воды приведены в табл. 2. Для оценки качества воды полученные данные были сопоставлены с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) по СанПиН № 1.2.3685-21, рекомендациями ВОЗ (выделены курсивом в табл. 2 [Guidelines ..., 2022]), а также со средними химическим составом подземных вод зоны гипергенеза умеренного климата [Шварцев, 1998].

**Общий гидрогеохимический состав.** При отборе проб температура родниковых вод колебалась в пределах 12–15 °С (в среднем 13 °С). Значения pH варьировали от 5,2 до 7,0, соответствуя слабнокислой и нейтральной среде. Электропроводность воды находилась в диапазоне 60–800 мкСм/см, при этом максимальные значения (до 800 мкСм/см) наблюдались в родниках 1, 2, 3 и 4, расположенных вблизи крупных населенных пунктов. В этих же родниках установлен высокий уровень величины химического потребления кислорода (ХПК 16–40 мгО/л), что может свидетельствовать о повышенной органической нагрузке. В водах остальных родников величина ХПК варьирует от незначительных величин (≤5 мгО/л) до 10 мгО/л.

Исследуемые воды характеризуются минерализацией от 70 до 676 мг/л. Значения ниже 100 мг/л зарегистрированы в родниках 5, 6, 9-1, 9-2, 9-3 и 10. В литературе отмечается, что потребление воды с минерализацией ниже 100 мг/л может вызывать вымывание солей [Рахманин и др., 1989; Guidelines..., 1980] и нарушение водно-солевого баланса

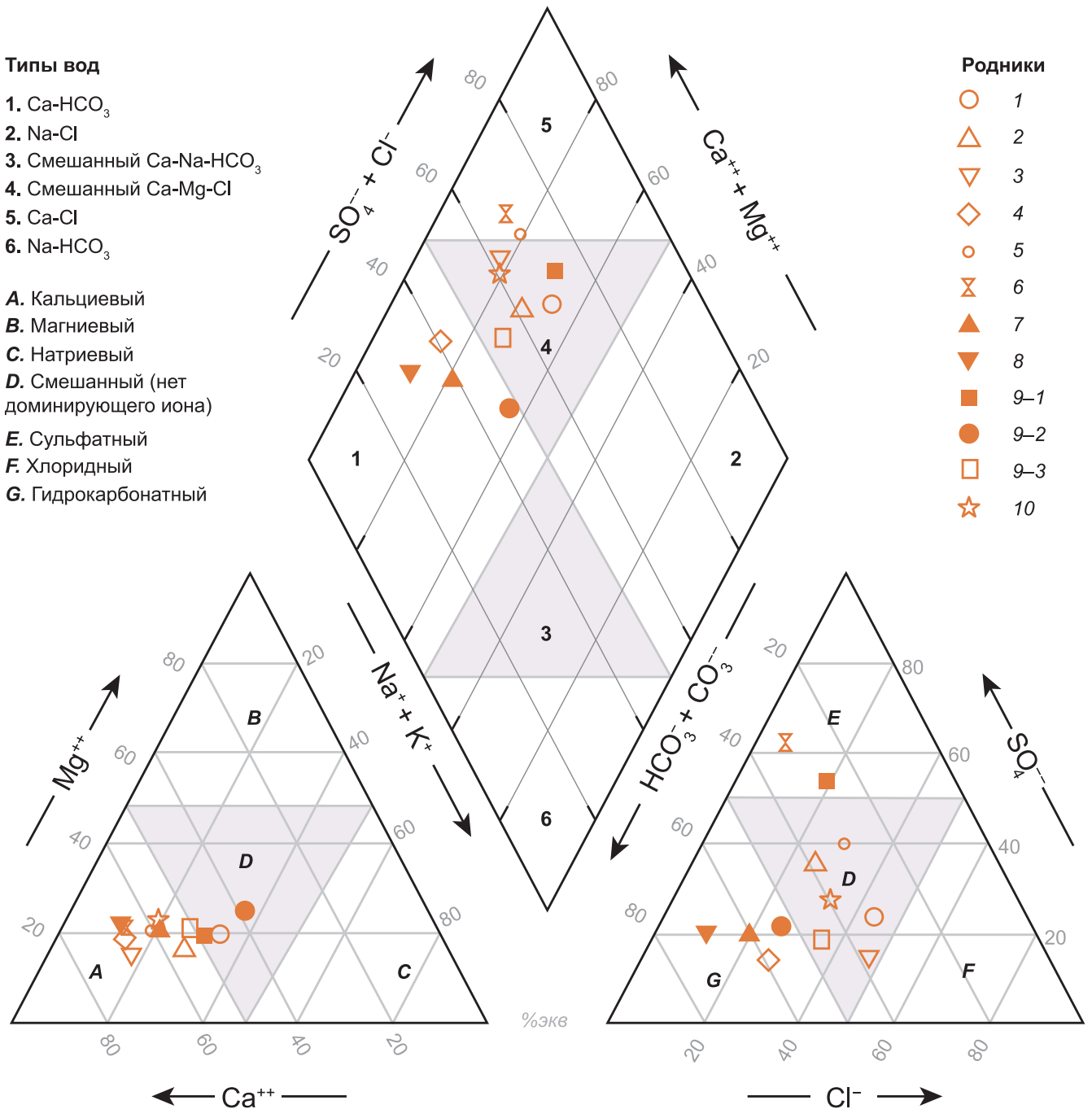


Рис. 2. Группировка изученных родниковых вод по составу

организма [Huang, 2024], что проявляется в повышенном водопотреблении, изменении диуреза и дисбалансе электролитов (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>) в сыворотке крови [Kozisek, 2005].

Величина общей жесткости вод варьирует от 0,8 до 8 мг-эков/л. Воды родников 6, 9-1, 9-2, 9-3 и 10 относятся к категории очень мягких (до 1,5 мг-эков/л); родников 1, 5, 7 и 8 — мягких (1,5–4,0 мг-эков/л). В родниках 2, 3 и 4 величина общей жесткости составляет 5,9, 5,2 и 7,9 мг-эков/л соответственно, что относит их воды к категории средней жесткости (4–8 мг-эков/л). Хотя высокая жесткость не оказывает прямого неблагоприятного влияния на здоровье, она способствует образованию накипи и увеличенному

расходу моющих средств, что повышает солевую нагрузку на водные ресурсы.

Повышенная концентрация иона аммония определена в родниках 1, 3 и 9-1 — 3,7, 2,0 и 1,1 мг/л при среднем содержании 0,1–0,4 мг/л. Содержание нитрат-иона в воде большинства родников составляет 2–10 мг/л, родники 1, 3, 4, 5 и 10 отличаются более высокими концентрациями — от 16,9 до 47,7 мг/л, что требует учета с точки зрения санитарных нормативов.

Для визуализации результатов определения макросостава построена диаграмма Пайпера (рис. 2). Анализ катионного состава вод показал преобладание кальция в большинстве проб, тогда как

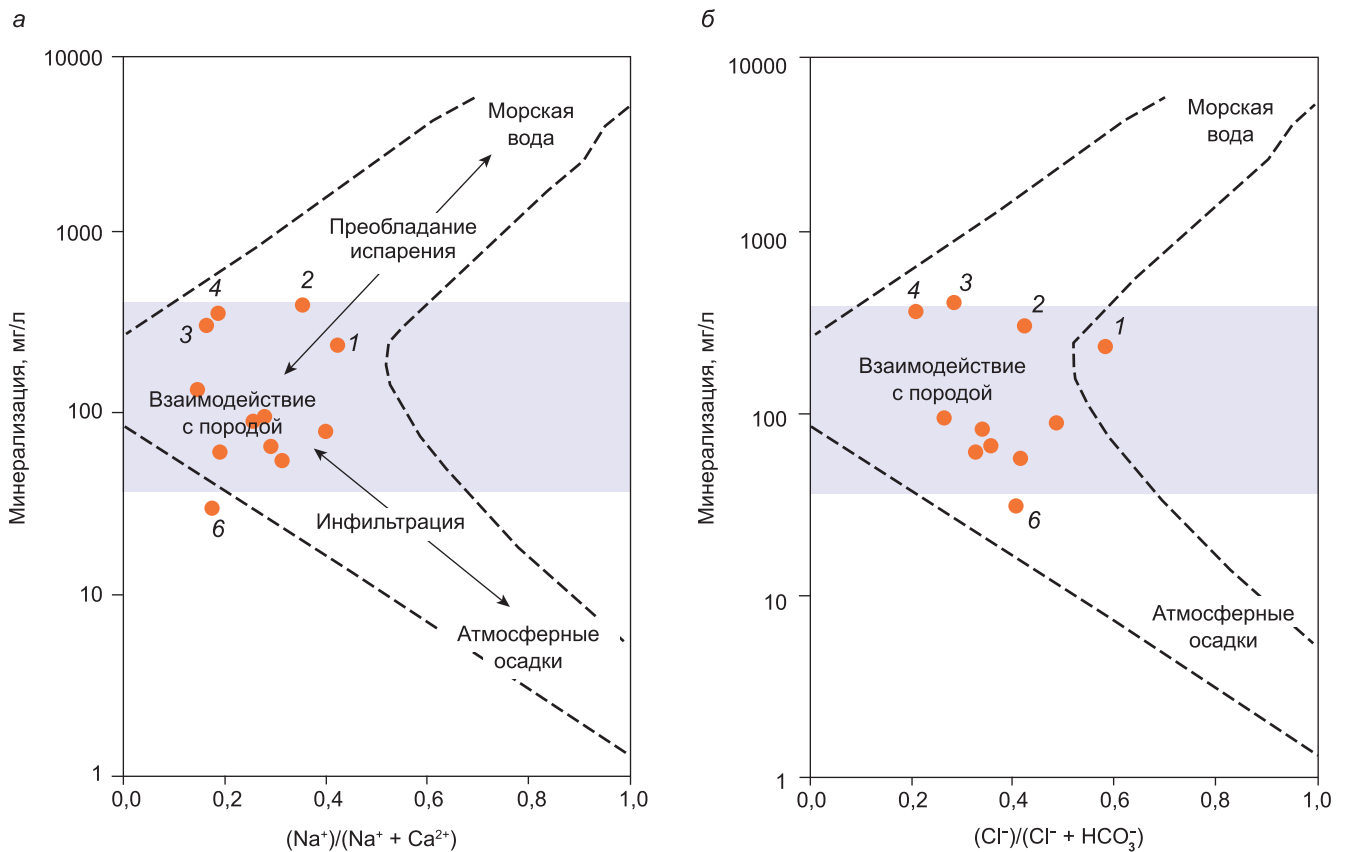


Рис. 3. Диаграммы Гиббса для вод исследованных родников: а — общая минерализация и  $\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$ ; б — общая минерализация и  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$

в водах родников 1, 9-1, 9-2 и 9-3 значительную долю составляют ионы магния, натрия и калия. По составу анионов большинство вод относятся к смешанному типу, однако можно выделить родники 6 и 9-1 с преобладанием сульфат-иона, повышенное содержание хлорид-иона в водах родников 1 и 2. В водах родников 4, 7 и 8 доминирует гидрокарбонат-ион. Такое разнообразие гидрохимических типов вод ( $\text{Ca}-\text{HCO}_3$ , смешанный  $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3$  и  $\text{Ca}-\text{Cl}$ ) отражает сложные процессы формирования вод, обусловленные природным взаимодействием с породами и возможным антропогенным влиянием.

Хлорид-ион служит важным индикатором происхождения и качества вод, позволяя дифференцировать атмосферные, морские и антропогенные источники [Schot, 2022]. В подземных водах умеренных широт естественное содержание  $\text{Cl}^-$  составляет 6–30 мг/л [Шварцев, 1998], тогда как в родниках 1–4 и 7 наблюдаются повышенные концентрации (до 117 мг/л в роднике 3). Несмотря на физиологическую необходимость хлоридов (поступают с  $\text{NaCl}$ , ~5,2 г/сутки), их избыток создает нагрузку на почки, а также может вызывать экологические последствия для компонентов экосистем, включая повреждение корневой системы растений [Иванов, 1994]. В условиях городского округа Щелково, где отсутствуют промышленные источники хлоридов [Островская, 2002; Шенькман, 2014], повышенные концентрации обусловлены длительным использованием противогололедных реагентов и удобрений (хлористый

калий) и отражают кумулятивный характер загрязнения.

*Факторы формирования состава изученных вод.* Для анализа факторов формирования состава подземных вод широко применяются диаграммы Гиббса (1970) и Гайлардета (1999), изначально разработанные для анализа поверхностных вод. Однако, согласно данным Google Scholar за 2024 г., из 623 цитирований, содержащих ключевое слово “groundwater”, 602 ссылаются на использование этих диаграмм. Как отмечают Marandi и Shand (2018), применение диаграмм Гиббса может быть неуместным в случаях, когда подземные воды находятся в изоляции более 12 000 лет и относятся к категории континентальных вод. Кроме того, они теряют информативность при значительном содержании сульфат-иона, образующегося при растворении гипса или окислении пирита, поскольку данный ион не учитывается в их структуре [Shand et al., 2016]. Низкая минерализация и преобладание гидрокарбонат- и хлорид-ионов, свойственные для вод изученных родников делают возможным применение диаграмм Гиббса и Гайлардета в данной работе.

На рис. 3 представлены результаты анализа исследованных родниковых вод с использованием диаграмм Гиббса. Основной вклад в формирование состава родниковых вод вносит взаимодействие с горными породами. Пробы 1, 2, 3 и 4, характеризуются более высокой минерализацией по сравнению с остальными, в то время как вода родника 6

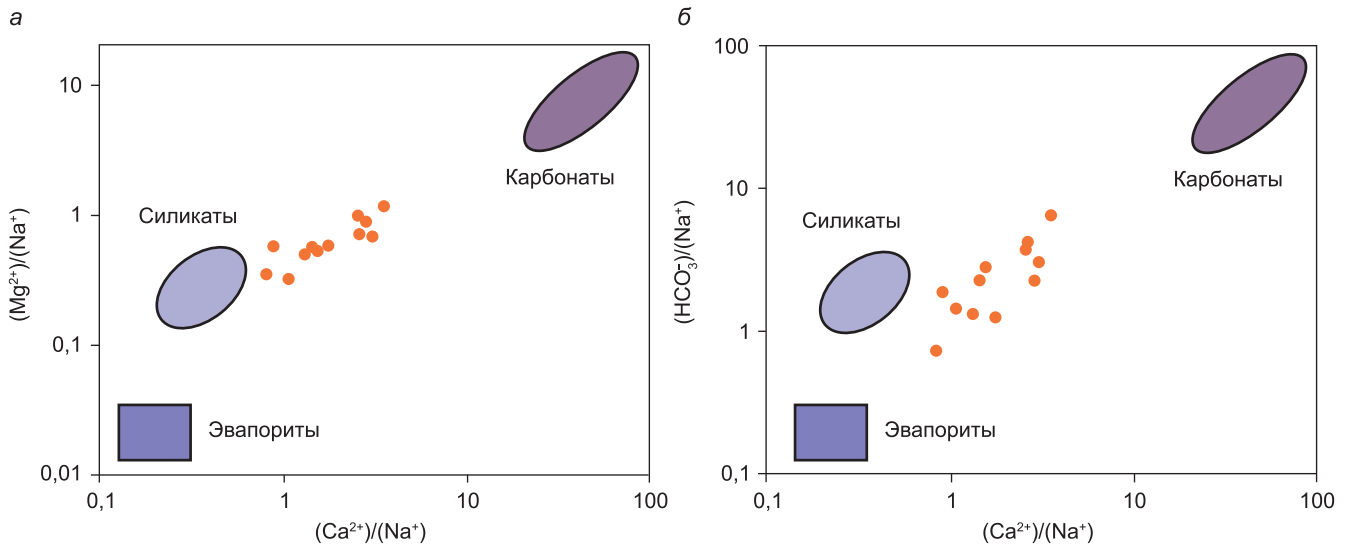


Рис. 4. Диаграмма смешения нормализованных по Na молярных соотношений в водах исследованных родников. а — Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup>; б — Ca<sup>2+</sup> и HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

отличается минимальной минерализацией. Для вод с низкой минерализацией значительное влияние на химический состав может оказывать атмосферный сток, что подтверждается положением пробы 6 на графике — она находится ниже остальных, хотя не выделяется по соотношению Na<sup>+</sup>/(Na<sup>+</sup> + Ca<sup>2+</sup>).

Анализ диаграммы Гайлардета (рис. 4) подтвердил, что основное влияние на химический состав родников оказывается выветриванием силикатных пород, о чем свидетельствует характерное распределение проб вдоль соответствующей линии при минимальном вкладе карбонатного выщелачивания. При этом в отдельных родниках отмечается высокое содержание натрия, указывающее на процессы засоления, которые, учитывая отсутствие в регионе эвапоритовых отложений, с высокой вероятностью связаны с применением дорожных реагентов.

Таким образом, состав вод исследуемых родников формируется за счет взаимодействия атмосферных вод с породами мезозойско-кайнозойского водоносного комплекса. Для определения влияющих факторов формирования состава воды была построена матрица соотношений катионов и анионов в воде, с акцентом на значение отношений Ca<sup>2+</sup>/Na<sup>+</sup> в грунтовых водах [Schoeller, 1977; Малов, 2019].

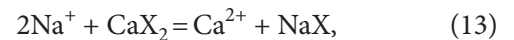
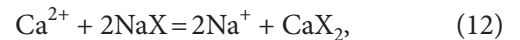
Для оценки направления ионного обмена в родниковых водах рассчитаны хлоридно-щелочные индексы (CAI-I и CAI-II) по формулам 10 и 11 соответственно (все значения в мг-экв/л):

$$CAI-I = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{Cl^-}, \quad (10)$$

$$CAI-II = \frac{Cl^- - (Na^+ + K^+)}{HCO_3^- + SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + NO_3^-}. \quad (11)$$

Родники разделились на группы с положительными и отрицательными значениями CAI (рис. 5, а). Данный результат свидетельствует о том, что для

исследуемых вод характерна как прямая (12), так и обратная (13) реакция ионного обмена:



где X — анион. Прямая реакция характерна для вод с преобладанием HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>, что типично для изучаемых родников, а обратная связана с преобладанием Na<sup>+</sup>, что нехарактерно для данного региона.

Анализ соотношения Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> (рис. 5, б) показал, что для ряда проб содержание Cl<sup>-</sup> превышает линию y=x, что свидетельствует о дополнительном источнике хлорид-иона. Напротив, превышение Na<sup>+</sup> над Cl<sup>-</sup>, характерное для естественного выветривания силикатных пород, не зарегистрировано.

Существенное превышение содержания Ca<sup>2+</sup> над HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> в некоторых водах (рис. 5, в) указывает на дополнительное поступление кальция. Соотношение Ca/Mg (рис. 5, д) составляет 2,5–3:1, что значительно превышает типичное для доломитовых пород значение 1,6:1. При этом содержание Ca<sup>2+</sup> превышает равновесные с SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> значения в 2–4 раза (рис. 5, е), что свидетельствует о не гипсовом источнике кальция.

Для большинства вод соотношение (Ca+Mg-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>)/(Na+K-Cl) близко к нулю, что указывает на их сбалансированный состав (отражено их расположением около начала координат на рис. 5, е). Однако в отдельных родниках наблюдаются аномально высокие концентрации Cl<sup>-</sup> и Ca<sup>2+</sup>, что можно связать с дополнительным источником поступления хлористого кальция из противогололедных реагентов и, возможно, строительных материалов [Аржанухина, 2010]). Таким образом проявляется техногенный фактор формирования состава родниковых вод.

Значимая роль техногенного фактора формирования химического состава вод подтверждается соотношениями NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Na<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>/Na<sup>+</sup> (рис. 6), позволяющими определить вклад различных источников

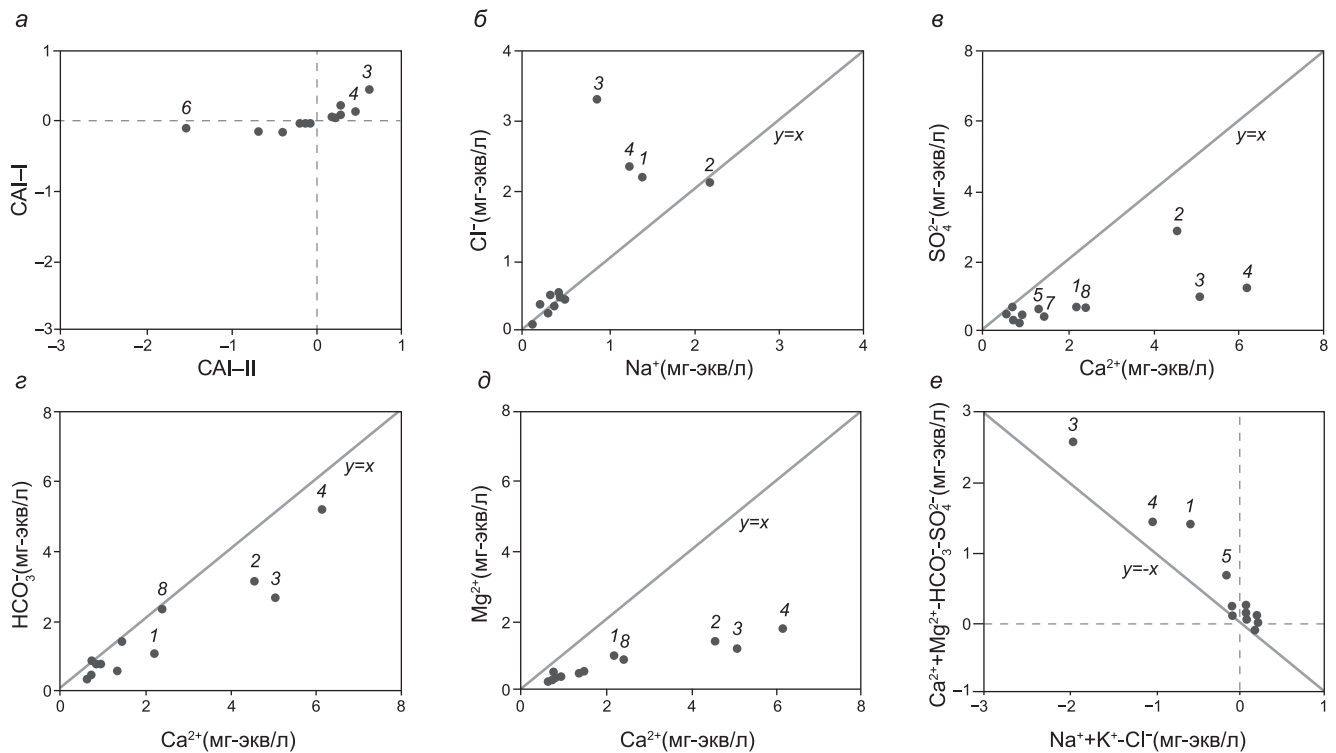


Рис. 5. Ионные соотношения в водах исследованных родников: а — CAI-I и CAI-II, где CAI — хлоридно-щелочной индекс (Chloro-Alkaline Index); б —  $\text{Cl}^-$  и  $\text{Na}^+$ ; в —  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ; г —  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{HCO}_3^-$ ; д —  $\text{Ca}^{2+}$ ; е —  $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-})$  и  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$

[Zhang et al., 2024]. Повышенное содержание соединений азота согласуется с данными о загрязнении реки Клязьмы, особенно на участках, прилегающих к населенным пунктам [Лямперт и др., 2022]. Основными источниками данного типа загрязнения выступают интенсивное использование азотных удобрений в сельском хозяйстве и поступление локальных сточных вод, при этом дополнительное влияние могут оказывать очистные сооружения ЗАО «Экоаэросталкер» [Демин, 2017]. Благодаря высокой миграционной способности, азотные соединения активно вымываются в грунтовые и поверхностные воды, приводя к снижению растворенного кислорода и потере биологического разнообразия в водных экосистемах [Chaudhry, 2017].

Таким образом, формирование состава родниковых вод определяется инфильтрацией атмосферных осадков через толщу современных отложений, испытывающих антропогенное воздействие со стороны коммунального, строительного и аграрного секторов. Для визуализации распределения и особенностей химического состава по территории были использованы диаграммы Стиффа (рис. 7).

**Питьево и поливное качество воды.** Ионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , а также  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$ , тесно связанные с процессами метаболизма в человеческом организме [Gozhenko, 2020], не превышают значения ПДК и в целом находятся в рекомендуемом ВОЗ диапазоне, за исключением родников 3 и 4 (табл. 2). Содержание  $\text{NH}_4^+$  составило 1,5–2,5 ПДК в родниках № 1 и № 3, содержание  $\text{NO}_3^-$  в роднике № 1 достигает величины ПДК. В родниках № 1–4 величина ХПК

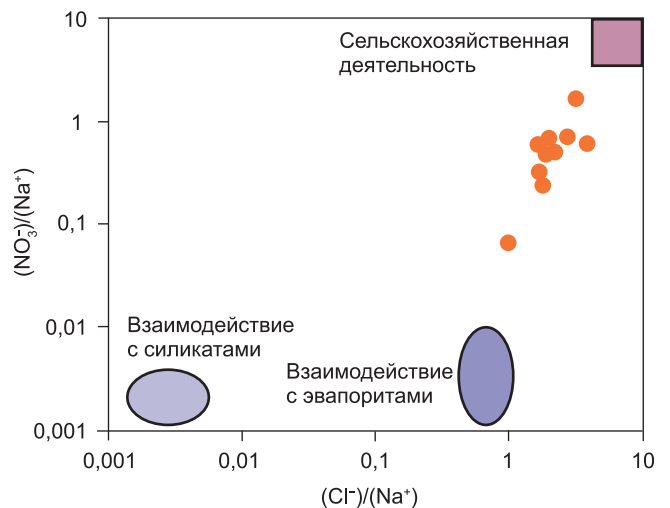


Рис. 6. Диаграмма смешения нормализованных по  $\text{Na}^+$  молярных соотношений  $\text{Cl}^-$  и  $\text{NO}_3^-$  в водах исследованных родников

превышает норму в 1,1–2,5 раза, что указывает на присутствие органического вещества в воде. Более половины исследованных вод характеризуются пониженными значениями pH (5,2–5,8 при норме 6,0–9,0), что потенциально усиливает их коррозионную активность, а также может влиять на вкусовые характеристики воды.

При оценке качества воды по ПДК не учитывается кумулятивный эффект от длительного потребления вод с пограничными концентрациями загрязнителей. Исследованные родниковые воды характеризуются повышенным содержанием растворенных веществ ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ) по сравнению со средним

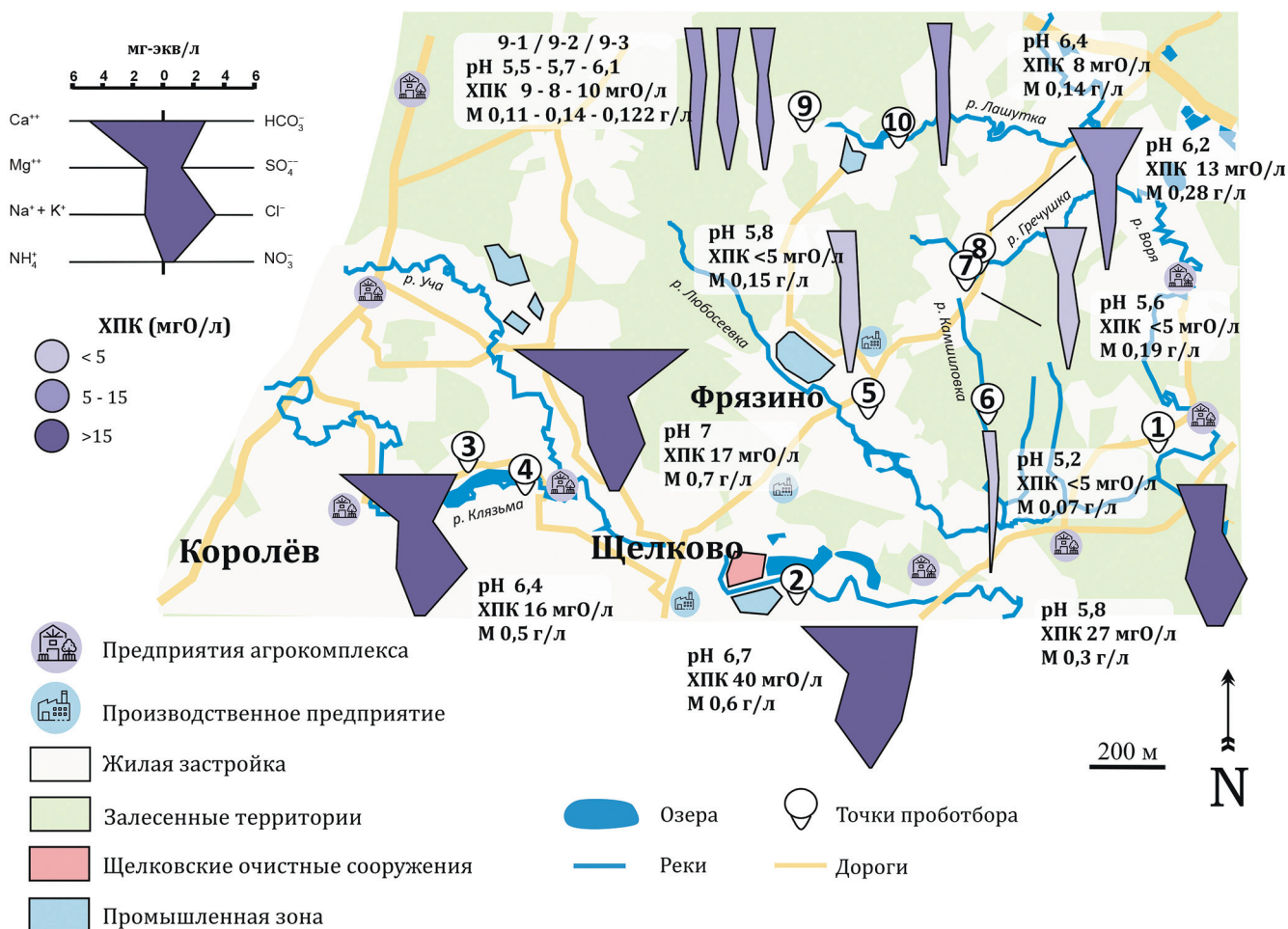


Рис. 7. Состав и основные показатели родниковых вод городского округа Щелково

химическим составом вод в зоне гипергенеза области умеренного климата (табл. 2). В связи с этим была проведена их комплексная оценка как по питьевым, так и по поливным критериям качества.

Для расчета индекса WQI использованы 13 компонентов (табл. 3), каждому из которых присвоен вес (баллы) в зависимости от его значимости для качества воды.

- наибольший вес (5 баллов) получил показатель электропроводности, так как высокая концентрация ионов может сделать воду непригодной для питья;

- вес 4 балла присвоен для показателей pH и минерализации из-за их влияния на вкус воды, а также SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, так как их повышенное содержание нетипично для природных вод, часто связано с техногенным загрязнением и снижает безопасность воды;

- вес 3 балла отдан показателю жесткости, Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup>. Они относительно безвредны в норме, но их избыток вызывает негативные эффекты; кроме того, высокий уровень содержания Na<sup>+</sup> и K<sup>+</sup> может сигнализировать о техногенном засолении;

- наименьший вес (2 балла) получили Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, так как это естественные компоненты воды, безопасные при нормальных концентрациях.

По величине WQI (табл. 4) воды родников распределены между категориями низкого качества

(родники 1, 3, 4), хорошего качества (родники 5, 7, 8, 9-2) и отличного (родники 6, 9-1, 9-3, 10). Попадание вод родника 2 в категорию очень низкого качества (WQI 204,5) связано с его расположением в зоне прямого влияния стоков от промзон и близостью Щелковских очистных сооружений.

Результаты расчета показателей поливного качества родниковых вод представлены в табл. 4. Ключевой показатель качества воды — электропроводность, повышенные значения обуславливают риск засоления почв. Вода родников 5, 6, 7, 9\_1, 9\_2, 9\_3, 10 (ЕС < 250 мкСм/см) имеет отличное качество для полива, остальные — хорошее. По показателю %Na пробы 3, 4, 5, 6, 8, 10 относятся к отличному качеству, остальные — к хорошему. Во всех исследованных пробах индекс МН < 50 свидетельствует о сбалансированном содержании магния в воде. Индекс потенциального засоления (PS), варьирует в пределах 0,6–3,8, что соответствует категории вод отличного качества. Оценка индекса проницаемости (PI) показала, что воды двух родников относятся к I классу (100% проницаемости), тогда как остальные образцы соответствуют II классу (75% проницаемости).

Полученные данные свидетельствуют, что воды родников в целом пригодны для питья, а применение их вод для полива не окажет негативного влияния на

Таблица 3  
**Распределение весов компонентов,  
 используемых для определения WQI**

Компонент	Вес компонента, $w_i$	Относительный вес, $W_i$	Норматив, $S_i$ (ПДК, ВОЗ)
ЕС, мкСм/см	5	0,114	1500
pH	4	0,091	7
M, мг/л	4	0,091	500
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/л	4	0,091	250
Cl <sup>-</sup> , мг/л	4	0,091	350
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/л	4	0,091	1,5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	4	0,091	45
Na <sup>+</sup> , мг/л	3	0,068	200
K <sup>+</sup> , мг/л	3	0,068	12
Жесткость, мг-экв/л	3	0,068	10
Ca <sup>2+</sup> , мг/л	2	0,045	75
Mg <sup>2+</sup> , мг/л	2	0,045	50
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/л	2	0,045	240
	$w_i = 44$	$W_i = 1$	

структуру и свойства почвы в течение длительного периода.

**Заключение.** Состав родниковых вод городского округа Щелково формируется под воздействием инфильтрации атмосферных осадков через мезозойско-кайнозойские отложения, характерных для гидрогеологических условий Восточно-Европейской платформы. Основными загрязняющими факторами выступают диффузные (неточечные) источники, представляющие собой распространенные загрязнители, поступающие с обширных площадей и затрудняющие локализацию и контроль. К ним относятся соли противогололедных реагентов, селитебные территории и сельскохозяйственные угодья с применением минеральных удобрений, отходы сельскохозяйственного и животноводческого происхождения, выщелачивание компонентов строительных материалов, а также локализованные сточные воды промышленных и коммунальных объектов (очистные сооружения). Совокупное влияние этих факторов приводит к накоплению ионов Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, соединений азота и других загрязнителей в водоносных горизонтах и формирует современное качество родниковых вод исследования.

Комплексная оценка показала, что большинство вод исследованных родников соответствует требованиям питьевой воды и пригодны для сель-

Таблица 4

**Категоризация вод по уровню их питьевого и поливного качества**

Показатель	Уровень качества (значение)	Родники (значение показателя)
Питьевое качество (WQI)	Отличное (<50)	6 (23), 9-1 (42), 9-3 (47), 10 (47)
	Хорошее (50–100)	5 (55), 7 (57), 8 (81), 9-2 (60)
	Низкое (100–200)	1 (153), 3 (185), 4 (198)
	Очень низкое (200–300)	2 (205)
	Не пригодно (>300)	—
Показатели поливного качества воды		
Электропроводность	Отличное (<250)	5 (177), 6 (60), 7 (190), 9-1 (112), 9-2 (160), 9-3 (132), 10 (122)
	Хорошее (250–750)	1 (466), 2 (792), 3 (611), 4 (725), 8 (270)
	Сомнительное (750–2250)	—
	Плохое (>2250)	—
Процент натрия (%Na)	Отличное (0–20)	3 (18), 4 (14), 5 (19), 6 (14), 8 (12), 10 (19)
	Хорошее (20–40)	1 (34), 2 (28), 7 (21), 9-1 (31), 9-2 (37), 9-3 (27)
	Допустимое/Сомнительное (40–80)	—
Содержание магния (МН)	Удовлетворительное (<50)	1 (31), 2 (23), 3 (19), 4 (22), 5 (26), 6 (25), 7 (27), 8 (25), 9-1 (28), 9-2 (40), 9-3 (29), 10 (29)
	Неудовлетворительное (> 50)	—
Индекс проницаемости (PI)	Класс I (>75%)	9-2 (83), 9-3 (78)
	Класс II (75–25%)	1 (55), 2 (49), 3 (39), 4 (39), 5 (51), 6 (69), 7 (68), 8 (54), 9-1 (74), 10 (72)
	Класс III (<25%)	—
Потенциальная соленость (PS)	Отличное–хорошее (<5)	1 (2,6), 2 (3,5), 3 (3,8), 4 (3,0), 5 (0,9), 6 (0,3), 7 (0,7), 8 (0,7), 9-1 (0,6), 9-2 (0,7), 9-3 (0,7), 10 (0,6)
	Хорошее–удовлетворительное (5–10)	—
	Удовлетворительное–неудовлетворительное (>10)	—

скохозяйственного использования. Однако четыре источника (родники 1, 3, 4 и 2) были классифицированы как «удовлетворительные» (первые три) и «плохие» (родник 2) по качеству питьевой воды из-за сверхнормативного содержания органики, нитратов и аммония. Эти результаты подчеркивают необходимость целенаправленного контроля для отдельных объектов.

Полученные данные свидетельствуют о важности комплексного и системного подхода к оценке качества подземных вод с организацией регулярного мониторинга родников. Это позволит своевременно выявлять неблагоприятные изменения,

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ российского рынка питьевой и минеральной воды: итоги 2023 г., прогноз до 2027 г. URL: <https://marketing.rbc.ru/articles/14737/> (дата обращения: 15.07.2024).

Аржанухина С.П., Сухов А.А., Кочетков А.В., Карпеев С.В. Состояние нормативного обеспечения инновационной деятельности дорожного хозяйства // Качество. Инновации. Образование. 2010. № 9. С. 24–29.

Буймова С.А., Костров В.В. Изменение качества родниковых вод в городах Иваново и Кохма Ивановской области // Теоретическая и прикладная экология. 2008. № 2. С. 38–42.

Вагнер Б.Б. Манучаряни Б.О. Геология, рельеф и полезные ископаемые Московского региона: Учебное пособие по курсу «География и экология Московского региона». М.: МГПУ, 2003. 92 с.

Веницианов Е.В., Кирпичникова Н.В. Проблема регулирования неконтролируемых диффузных загрязнений водных объектов // Материалы международной конференции «Экологические проблемы бассейнов крупных рек». 2018. № 6.

Воеводина Л.А., Воеводин О.В. Магний для почвы и растений // Мелиорация и гидротехника. 2015. № 2 (18). С. 70–81.

Генеральный план городского округа Щёлково Московской области. Т. 2. Охрана окружающей среды. URL: <https://shhyolkovo.ru/normativnye-dokumenty/arkhitektura-i-gradostroitelstvo/utverzhdennyy-generalnyy-plan-gorodskogo-okruga-shchelykovo> (дата доступа: 15.03.2024).

Головатый С.Е., Барановский В.С., Савченко С.В. Эколого-геохимическая оценка земель в зоне воздействия птицеводческих комплексов. // Экологический вестник. 2015. № 4(34). С. 90–95.

ГОСТ 31859-2012. Вода. Метод определения химического потребления кислорода: межгосударственный стандарт. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.

Демин А.П. Сточные воды и качество воды в бассейне реки Волга (2000–2015 гг.) // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2017. № 48. С. 55–71.

Иванов В.В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: В 6 кн. / Под ред. Э.К. Буренкова. Кн. 2. Главные р-элементы. М.: Недра, 1994. 303 с.

Кострикин А.В., Кострикин П.А., Бобрович Л.В. Экологическое состояние родников Мичуринска-наукограда // Наука и образование. 2020. Т. 3. № 4.

Лямперт Н.А., Ничипорова И.П., Лобченко Е.Е., Первышева О.А. Современное состояние и динамика качества

минимизировать риски для здоровья населения при длительном потреблении данной воды и предотвращать деградацию почв при использовании вод для полива.

Следует отметить, что результаты отражают состояние вод в период отбора проб и не учитывают сезонные или межгодовые колебания качества. Для более точного понимания динамики качества необходимы долговременные исследования с расширением спектра контролируемых параметров.

**Финансирование.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-27-00121, <https://rscf.ru/project/25-27-00121/>

воды р. Клязьма // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 104–110.

Малов А.И. Геохимические индикаторы формирования подземных вод Юго-Восточного Беломорья // Отечественная геология. 2019. № 4. С. 75–83.

Новосельцева О.А., Стожко Н.Ю. Сравнительная оценка качества родниковой, водопродной и очищенной воды // Экологическая безопасность в техносферном пространстве. 2019. С. 202–205.

Островская Е.В. Некоторые вопросы экологии природных вод Новомосковского района Тульской области // Записки Горного института. 2002. Т. 152. С. 39–41.

Рахманин О.А., Михайлова Р.И., Филиппова А.В. и др. О некоторых аспектах биологического действия дистиллята // Гигиена и санитария. 1989. № 3. С. 94–95.

СанПиН 1.2.3684-21. (Зарегистрировано в Минюсте России 29.01.2021 № 62297). Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573536177> (дата обращения: 22.02.2023).

Слабунова А.В., Сурувикина А.П. О проблеме диффузного загрязнения водных объектов // Мелиорация и гидротехника. 2020. № 2 (38).

Трифонов Т.А., Савельев О.В., Марцев А.А. и др. Оценка качества питьевой воды родников г. Владимира // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30, № 6. С. 23–31.

Устойчивое управление почвенными ресурсами в Евразийском регионе. ФАО и Евразийский центр по продовольственной безопасности. 2021. <https://doi.org/10.4060/cb5827.ru> (дата обращения: 03.08.2024).

Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.

Шенькман Б.М. Зона свободного водообмена Верхнеконского нефтегазоконденсатного месторождения в начале этапа промышленной эксплуатации // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Наука о Земле. 2014. Т. 7. С. 129–144.

Янин Е.П. Техногенные речные илы (условия формирования, вещественный состав, геохимические особенности). М.: НП «АРСО», 2018. 415 с.

Aminiyan M.M., Aminiyan F.M. Comprehensive integrated index-based geochemistry and hydrochemical analyses of groundwater resources for multiple consumptions under coastal conditions // Environmental Science and Pollution Research. 2020. 27. 21386–21406.

Bousalsal B., Satouh A., Egbueri J.C., et al. Groundwater for drinking and sustainable agriculture and public health hazards of nitrate: Developmental and sustainability implications for

an arid aquifer system // *Results in Engineering*. 2025. T. 25. C. 104–160.

*Chaudhry F.N., Malik M.F.* Factors affecting water pollution: a review // *J. Ecosyst. Ecography*. 2017. T. 7, № 1. C. 225–231.

*Gaillardet J.D., Dupré B.L., Louvat B., et al.* Global silicate weathering and CO<sub>2</sub> consumption rates deduced from the chemistry of large rivers // *Chemical geology*. 1999. T. 159, № 1–4. C. 3–30.

*Gibbs R.J.* Mechanisms controlling world water chemistry // *Science*. 1970. T. 170, № 3962. C. 1088–1090.

*Giri S., Singh A. K.* Human health risk assessment via drinking water pathway due to metal contamination in the groundwater of Subarnarekha River Basin, India // *Environmental monitoring and assessment*. 2015. T. 187, № 3. C. 63.

*Gozhenko A., Badiuk N., Nasibullin B., et al.* The role of macronutrients in the implementation of the corrective effect of low-mineralized water in experimental metabolic syndrome // *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*. 2020. T. 71, № 4. C. 423–430.

Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>

Guidelines on health aspects of water desalination. ETS/80.4. Geneva: World Health Organization, 1980. URL: [https://applications.emro.who.int/docs/who\\_em\\_es\\_371\\_en.pdf](https://applications.emro.who.int/docs/who_em_es_371_en.pdf)

*Huang T., Hao Y., Tan Y., et al.* Low-Mineral Water Diminishes the Bone Benefits of Boron // *Nutrients*. 2024. T. 16, № 17. C. 2881.

*Kallon H.* Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Groundwater Quality in Kono, Sierra Leone // *Adv Earth & Env Sci*. 2024. T. 5, № 2. C. 1–17.

*Kaushal S. S., Groffman P. M., Likens G. E., et al.* Increased salinization of fresh water in the northeastern United States // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2005. T. 102, № 38. C. 13517–13520.

*Kozisek F.* Health risks from drinking demineralised water // *Nutrients in drinking water*. 2005. T. 1, № 1. C. 148–163.

*Manga M.* Using springs to study groundwater flow and active geologic processes // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2001. T. 29, № 1. C. 201–228.

*Marandi A., Shand P.* Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram // *Applied Geochemistry*. 2018. T. 97. C. 209–212.

National Management Measures to Control Non-point Source Pollution from Agriculture. 2003. Document No. EPA 841-B-03-004.

*Prasad S., Singh A., Korres N.E., et al.* Sustainable utilization of crop residues for energy generation: A life cycle assessment (LCA) perspective // *Bioresource technology*. 2020. T. 303. C. 122964.

*Schoeller H.* Geochemistry of groundwater // *Groundwater studies — an international guide for research and practice*. Paris, 1977. Vol. 15. P. 1–18.

*Schot P., Beard J., Hissink R., et al.* Adapting classical water quality diagrams for ecohydrological and policy applications // *Journal of Hydrology X*. 2022. T. 17. C. 100137.

*Shand P., Gotch T., Love A., et al.* Extreme environments in the critical zone: linking acidification hazard of acid sulfate soils in mound spring discharge zones to groundwater evolution and mantle degassing. *Sci. Total Environ.* 568, 1238–1252. 2016.

*Schwarzenbach R.P., Egli T., Hofstetter T.B., et al.* Global Water Pollution and Human Health // *Annual review of environment and resources*. 2010. T. 35, № 1. C. 109–136.

*Schwarzenbach R.P., Escher B.I., Fenner K., et al.* The challenge of micropollutants in aquatic systems // *Science*. 2006. T. 313, № 5790. C. 1072–1077.

*Chen Y., Peng W., Lin M., et al.* Seasonal variations and water chemical control mechanism of water quality in a suburban river near a coal city: a case study in the Xinbian River of Suzhou City, Anhui Province, China // *Water Practice & Technology*. 2024. T. 19, № 3. C. 874–886.

*Zhang H., Wang Z., Wang X., et al.* Hydrochemical characterization and health risk assessment of different types of water bodies in Fenghuang Mountain Area, Northeast China // *Environmental Geochemistry and Health*. 2024. T. 46, № 8. C. 292.

Статья поступила в редакцию 03.11.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 556.3.06 (571.66)

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-131-143

## СТРАТЕГИЯ РАБОТ И МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ ПРИ ПОИСКЕ И РАЗВЕДКЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ МУТНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПАРОГИДРОТЕРМ)

Борис Владимирович Георгиевский<sup>1</sup>, Ярослав Олегович Симаков<sup>2</sup>,  
Азат Тахирович Хамитов<sup>3</sup>, Олег Сергеевич Анисимович<sup>4</sup>,  
Алина Артемьевна Ахметгараева<sup>5</sup>, Ксения Александровна Ситар<sup>6</sup>✉,  
Екатерина Ивановна Барановская<sup>7</sup>

<sup>1</sup> ООО «ЗН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР», Москва, Россия; bvgeo@mail.ru

<sup>2</sup> ООО «ЗН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР», Москва, Россия; YSimakov@nestro.ru

<sup>3</sup> АО «Зарубежнефть», Москва, Россия; AKhamitov@nestro.ru

<sup>4</sup> ООО «ЗН НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР», Москва, Россия; OAnisimovich@nestro.ru

<sup>5</sup> АО «ВНИИнефть — Западная Сибирь», Москва, Россия; AAkhmetgaraeva@nestro.ru

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; sitarka@my.msu.ru ✉

<sup>7</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; baranovskaya\_kat@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена актуальной и активно развивающейся в настоящее время во всем мире тематике: поиску и разведке геотермальных месторождений. Последовательно продемонстрированы существующие тенденции развития геотермальной энергетики, которые наглядно демонстрируются суммарной величиной вырабатываемой энергии за счет геотермального тепла, сферами практического применения и инвестициями в геотермальную энергетику в мире. Дана краткая характеристика развития и освоения геотермальных месторождений в России, в том числе по основным регионам с повышенным геотермальным потенциалом, с учетом специфики их геологического строения. На примере Мутновского блока на Камчатке, как региона с наибольшими в настоящее время мощностями по выработке электроэнергии за счет геотермального тепла, проанализирована специфика планирования поисково-разведочных работ. Проанализированы геологические риски и продемонстрирована специфика построения геологических моделей геотермальных месторождений, позволяющих минимизировать риски и, тем самым, выработать наиболее эффективную стратегию поиска и разведки геотермальных месторождений применительно к условиям Камчатки. Показано, что ключевой особенностью при анализе геотермальных месторождений является междисциплинарный подход, учитывающий одновременно геолого-геофизические, гидрогеологическое и тектонические особенности данных объектов.

**Ключевые слова:** геотермальная энергетика, геологическое строение Камчатки, геологические риски, комплексирование геологических данных

**Для цитирования:** Георгиевский Б.В., Симаков Я.О., Хамитов А.Т., Анисимович О.С., Ахметгараева А.А., Ситар К.А., Барановская Е.И. Стратегия работ и минимизация рисков при поиске и разведке геотермальных месторождений (на примере Мутновского месторождения парогидротерм) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 131–143.

## WORK STRATEGY AND RISK MINIMIZATION IN GEOTHERMAL PROSPECTING AND EXPLORATION (USING THE EXAMPLE OF THE MUTNOVSKY HYDROTHERMAL FIELD)

Boris V. Georgievskiy<sup>1</sup>, Yaroslav O. Simakov<sup>2</sup>, Azat T. Khamitov<sup>3</sup>,  
Oleg S. Anisimovich<sup>4</sup>, Alina A. Akhmetgaraeva<sup>5</sup>, Ksenia A. Sitar<sup>6</sup>✉,  
Ekaterina I. Baranovskaya<sup>7</sup>

<sup>1</sup> “ZN SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTRE” LLC, Moscow, Russia; bvgeo@mail.ru

<sup>2</sup> “ZN SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTRE” LLC, Moscow, Russia; YSimakov@nestro.ru

<sup>3</sup> Zarubezhneft JSC, Moscow, Russia; AKhamitov@nestro.ru

<sup>4</sup> “ZN SCIENCE AND TECHNOLOGY CENTRE” LLC, Moscow, Russia; OAnisimovich@nestro.ru

<sup>5</sup> VNIIneft — West Siberia JSC, Moscow, Russia; AAkhmetgaraeva@nestro.ru

<sup>6</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; sitarka@my.msu.ru ✉

<sup>7</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; baranovskaya\_kat@mail.ru

**Abstract.** The article addresses a topic that is currently both highly relevant and rapidly developing worldwide: the exploration and prospecting of geothermal fields. It presents a comprehensive overview of current geothermal energy trends, illustrating the total energy generated by geothermal heat, the areas of practical application, and global geothermal energy investment. It also provides a brief overview of the development of geothermal fields in Russia, including the key regions with high geothermal potential, taking into account their geological structure. Using the Mutnovsky Block in

Kamchatka as an example, the region currently boasting the largest geothermal power generation capacity, it analyzes the specifics of exploration planning. It also examines geological risks and demonstrates the specifics of constructing geological models of geothermal fields, which can minimize these risks and, thus, develop the most effective exploration strategy for Kamchatka. It is shown that the key feature in the analysis of geothermal fields is an interdisciplinary approach that simultaneously takes into account the geological, geophysical, hydrogeological and tectonic features of these objects.

**Keywords:** geothermal energy, geological structure of Kamchatka, geological risks, integration of geological data

**For citation:** Georgievskiy B.V., Simakov Ya.O., Khamitov A.T., Anisimovich O.S., Akhmetgaraeva A.A., Sitar K.A., Baranovskaya E.I. Work Strategy and Risk Minimization in Geothermal Prospecting and Exploration (Using the Example of the Mutnovsky Hydrothermal Field). *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 131–143. (In Russ.).

**Введение.** Геотермальная энергия, использующая тепло земных недр, занимает уникальное место в структуре мировых энергоресурсов. Ее важность стремительно растет в контексте глобальных трендов по обеспечению энергонезависимости удаленных регионов и стремлению к декарбонизации. Среди возобновляемых источников энергии, по сравнению с солнечной и ветровой генерацией, геотермальные источники обеспечивают более стабильную и прогнозируемую подачу энергии, что делает их надежным источником для теплоснабжения городов и промышленности.

В научной литературе последнего десятилетия наблюдается значительное усиление интереса к геотермальной энергетике, что отражает ее растущую роль в глобальной энергетической системе. В последнее время опубликованы многочисленные обзоры по всемирному развитию и электрогенерации на основе геотермального тепла [Бадавов, 2020; Nuttrier, 2020] и по прямому использованию геотермального тепла [Бадавов, 2020; Lund, Toth, 2020] в мире, а также развернутые аналитические обзоры по развитию геотермальной энергетике в России [Свалова, 2022; Спектор и др., 2024]. Фундаментальные и прикладные задачи, связанные с геотермальной энергетикой, охватывают широкий спектр разделов геологии и геофизики, что отражает междисциплинарный характер этой отрасли, и все больше проявляется тенденция смещения фокуса с простого описания ресурсов на комплексное моделирование и прогнозирование.

Динамика использования геотермального тепла в мире весьма неравномерна и существенным образом зависит от геологических условий [Георгиевский и др., 2025]. В Европе лидером является Исландия, где геотермальное отопление покрывает потребности около 90% домохозяйств. В континентальной Европе активно развивается сектор геотермального теплоснабжения в таких странах, как Италия, Франция, Германия и Венгрия, где тепло земных недр используется для обогрева целых районов и теплиц. Турция, которую часто относят к европейскому рынку, демонстрирует один из самых высоких в мире темпов роста для генерации электроэнергии. В странах Азии наблюдается самый большой рост. Китай является мировым лидером по прямому использованию геотермального тепла (например, для отопления), Индонезия и Филиппины входят в топ-5 стран по установленной мощности

геотермальных электростанций, постоянно наращивая ее. В Северной Америке лидером по установленной мощности геотермальных электростанций являются США, демонстрируя при этом умеренные темпы роста из-за высокой конкуренции с другими источниками энергии. В странах Африки Кения является ярким примером, где геотермальная энергия стала ключевым звеном национальной энергетике, обеспечивая около половины всей вырабатываемой в стране электроэнергии и продолжая активно развиваться.

Однако несмотря на обширную географию использования и высокий уровень технологического развития в вопросах освоения геотермальных месторождений существенной и не полностью решенной проблемой остается методика освоения на начальных этапах, на стадии поиска и разведки месторождений. Применение методов, подразумевающих комплексирование данных и одновременный учет геологических, геофизических, теплофизических, гидродинамических особенностей объекта, требует выработку концептуально корректного подхода, который, с одной стороны, должен минимизировать геологические риски, а с другой — помочь достичь экономически эффективной схемы разведки и последующего освоения геотермального месторождения.

**Разведка геотермальных месторождений и использование геотермального тепла в мире.** За последние два десятилетия мировое потребление геотермальной энергии (как для производства электроэнергии, так и для прямого использования тепла) выросло более чем в два раза. По данным международных агентств, среднегодовые темпы прироста мощностей составляют около 3–5%. Использование тепла традиционно делится на два ключевых направления: прямое использование тепла и генерация электричества (рис. 1).

Самым широко распространенным является прямое применение геотермальной энергии, при котором низко- и среднетемпературные ресурсы (до 150 °С) напрямую, без сложных преобразований, используются для различных целей. При этом, по разным оценкам [The Future..., 2024], для наиболее технически достижимых глубин до 3–5 км суммарный геотермальный потенциал оценивается в 42 ТВт, при этом суммарное использование геотермального тепла для целей электрогенерации и по прямому использованию составляет около 0,4% (рис. 2).

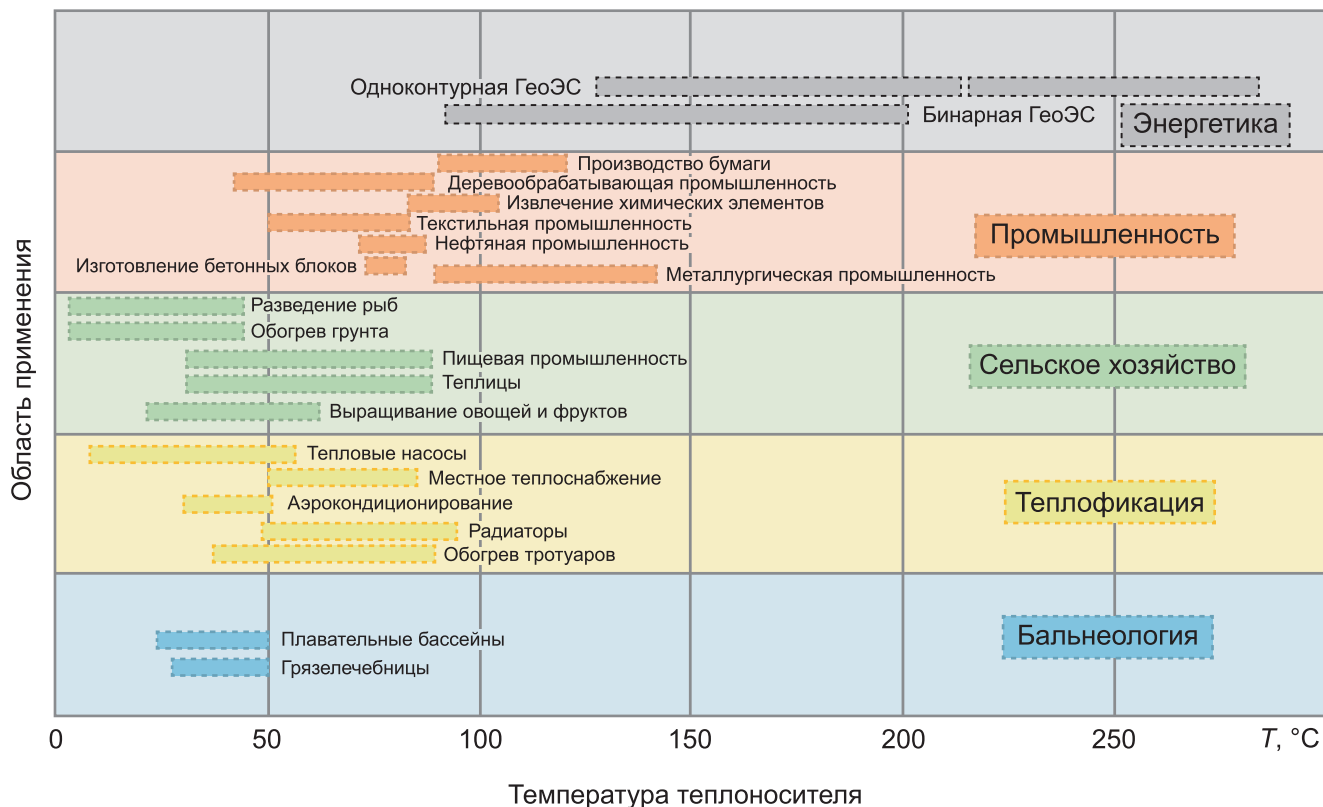


Рис. 1. Использование геотермального тепла в мире [Еремин и др., 2024]

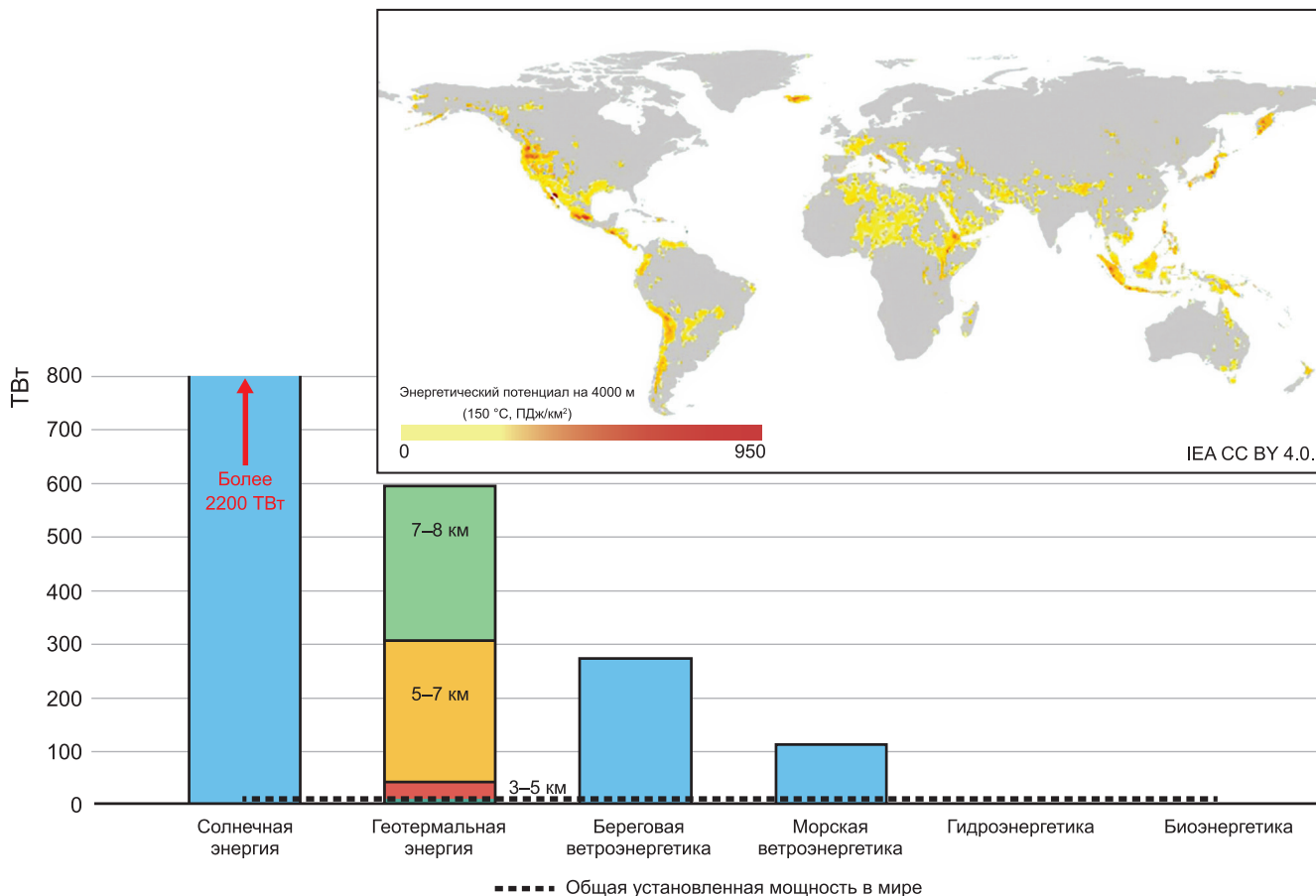


Рис. 2. Оценка величины геотермального потенциала для различных глубин и сравнение его величины с иными источниками возобновляемой энергии, по [The Future ..., 2024]

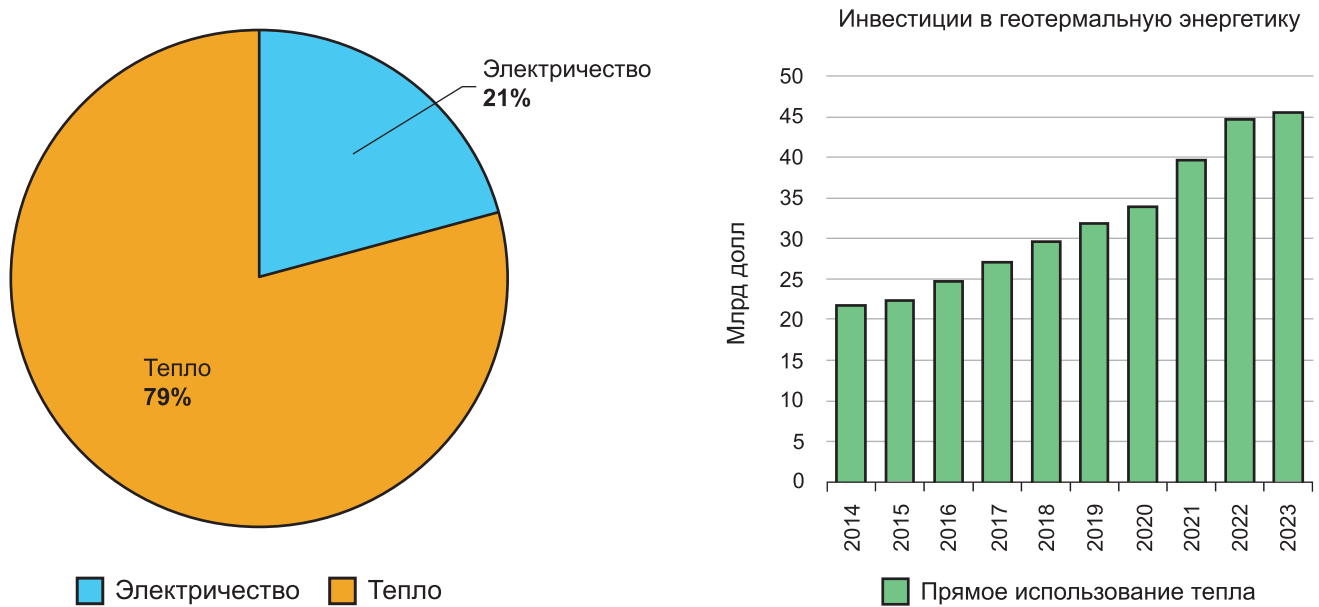


Рис. 3. Слева: использование геотермального тепла для выработки электроэнергии и прямого потребления. Справа: динамика роста суммарных инвестиций (в млрд долларов) в геотермальную энергетику, по [The Future..., 2024]

Термальные воды используются в бальнеологических и рекреационных целях, для оздоровления и туризма. Чрезвычайно широко используются в сельском хозяйстве для обогрева теплиц и круглогодичного выращивания культур, обогрева грунта, в рыбных хозяйствах. Важнейшей сферой применения является теплофикация — централизованное снабжение теплом жилых, коммерческих и промышленных зданий для их отопления и горячего водоснабжения, в этом секторе прямое использование геотермальной энергии демонстрирует высочайшую эффективность. В отличие от геотермальных электростанций, требующих высокотемпературных источников (свыше  $150^{\circ}\text{C}$ ), для теплофикации пригодны ресурсы средних ( $90\text{--}150^{\circ}\text{C}$ ) и, что особенно важно, низких температур ( $30\text{--}90^{\circ}\text{C}$ ). Это значительно расширяет географию возможного применения. В случаях, когда температура геотермальной воды недостаточно высока для современных систем отопления (например, ниже  $70^{\circ}\text{C}$ ), используются тепловые насосы, которые обеспечивают повышение температуры до необходимого уровня, значительно повышая эффективность системы.

**Актуальность работ по освоению геотермальных месторождений.** Совокупность таких факторов, как универсальность применения, расширение ресурсной базы за счет новых технологий и малоосвоенных территорий, наличие готовых технических решений, рекордный рост инвестиций и значимость для развития изолированных территорий, — однозначно свидетельствует о высокой и растущей актуальности геотермальной энергетики. Геотермальная энергия также обладает преимуществом двойного применения (рис. 3): в сфере электрогенерации установленная мощность геотермальных электростанций в мире превышает 16 ГВт и продолжает демонстрировать устойчивый рост, а установленная

тепловая мощность геотермальных систем в мире оценивается более чем в 140 ГВт [The Future..., 2024]. Она перестает быть нишевым источником и становится стратегическим компонентом глобальной устойчивой энергосистемы, предлагая стабильное и локализованное решение энергетических вызовов современности.

Традиционно развитие отрасли базировалось на освоении гидротермальных месторождений, которые были географически привязаны к тектонически активным зонам (например, «Огненное кольцо» Тихого океана). Качественный скачок связан с развитием технологий для освоения различных геотермальных месторождений: систем EGS для петротермальных месторождений (так называемых «усовершенствованных геотермальных систем»), использования бинарных циклов и тепловых насосов для низко- и среднетемпературных вод, а также проектов сверхглубокого бурения.

При этом инвестиционная активность, которая является прямым индикатором актуальности любого энергетического сектора, за последнее десятилетиекратно возросла, как в отдельных странах, так и по всему миру в целом (рис. 3). Таким образом освоение геотермальных месторождений играет ключевую роль в социально-экономическом развитии регионов, тесно связано с развитием технологических решений глубинного и поверхностного обустройства, и имеет свою значимость как пример одного из направлений развития экологически чистой энергетики.

**Специфика изучения гидротермальных систем.** Исследование геотермальных месторождений кардинально отличается от разведки традиционных углеводородов именно необходимостью одновременного анализа как минимум трех взаимосвязанных систем: гидрологической, геологической

и тектонической. В случае петротермальных систем акценты смещаются, но комплексность остается ключевым принципом.

Ключевым объектом традиционной геотермальной энергетики являются именно гидротермальные системы. Их изучение начинается с понимания того, что это, прежде всего, гидрогеологический объект. Моделируются гидродинамические параметры: зона питания, разгрузки, движение воды в пласте, с соответствующей оценкой продуктивности месторождения, обоснованием и расчетом необходимой реинъекции. При этом химический состав флюида, его минерализация и фазовый состав определяют риски коррозии и отложения вторичных минералов, что напрямую влияет на срок службы скважин и экономику проекта. Второй неотъемлемой составляющей является стратиграфическая и петролого-минералогическая характеристика комплексов пород-резервуаров. Определяющими факторами являются как фильтрационно-емкостные свойства, так и текстурные особенности (трещиноватость, сланцеватость, отдельность). Третья системообразующая составляющая — тектонический режим, который для гидротермальных месторождений определяет температурный фактор. Разломы и зоны трещиноватости, возникающие в результате тектонических процессов, служат основными каналами для подъема глубинного тепла и циркуляции флюидов. Без понимания тектонической структуры района невозможно объяснить аномальный тепловой поток и локализацию самого месторождения. Чаще всего именно пересечения разломов становятся наиболее перспективными целями для бурения. Если вод насыщенная порода-коллектор отсутствует, но тепловой потенциал высок, фокус смещается на изучение петротермальных систем, и в этом случае объектом исследования становится массив горячих, но сухих и плотных горных пород. Ключевыми параметрами являются их температурный режим, тепловые и механические свойства. Поскольку в таких массивах нет естественного теплоносителя (воды) и проницаемости, ключевая задача технологий состоит в создании искусственного подземного теплообменника с помощью гидроразрыва пластов либо циркуляции теплоносителя по замкнутому контуру через нагнетательные скважины.

Таким образом, специфика исследования заключается в синтезе данных из разных дисциплин. Геотермальная скважина бурится не просто в точку с аномальной температурой, а в место, где совпадают несколько критических условий: наличие проницаемого коллектора (геология), циркулирующего в нем флюида (гидрогеология) и источника тепла, связанного с тектонически активными зонами (тектоника). Неучет любого из этих факторов ведет к бурению «сухих» или малодебитных скважин, что и составляет главный финансовый риск при освоении геотермальной энергии. Для выработки эффективной стратегии поисково-разведочных работ требуется

подход, основанный на комплексировании данных, позволяющий минимизировать геологические риски при разведке гидротермальных месторождений.

**Актуальность гидротермальной энергетики для России.** Гидротермальная энергетика, использующая тепло подземных термальных вод, обладает значительной актуальностью для России, несмотря на ее скромную долю в общем энергобалансе. Ее значение определяется не столько объемами генерации, сколько решением критически важных задач в специфических регионах страны. Ключевое значение заключается в обеспечении энергетической независимости удаленных и изолированных территорий. Для таких регионов, как Камчатка, Курильские острова, некоторые района Предкавказья зависимость от завозного топлива означает чрезвычайно высокую стоимость электро- и теплоснабжения, а также риски перебоев в сложных климатических условиях.

В России термальные воды сосредоточены в пяти основных геотермальных регионах: Курило-Камчатском, Охотско-Чукотском, Байкальском, Западно-Сибирском и Крымско-Кавказском. Согласно государственному балансу [Спектор и др., 2024], на учете состоят 43 месторождения, пригодные для теплоснабжения, и 5 — для геотермальной энергетики. Камчатка и Курилы, как единственные в России регионы с современным вулканизмом, отличаются наличием высокотемпературных гидротермальных систем. Именно здесь расположены крупнейшие месторождения, такие как Паратунское, Верхне-Паратунское и Эссовское, с запасами свыше 20 тыс. м<sup>3</sup>/сутки каждое. Налычевское месторождение имеет запасы 15 тыс. м<sup>3</sup>/сутки ( $T \approx 75^\circ\text{C}$ ), в то время как остальные 16 месторождений значительно мельче (0,2–3,5 тыс. м<sup>3</sup>/сутки).

В составе *Курило-Камчатского геотермального региона* на государственном балансе числятся пять месторождений парогидротерм: три расположены на полуострове Камчатка и два — на Курильских островах. На Камчатке к эксплуатируемым объектам относятся Паужетское и Мутновское месторождения, на базе которых функционируют геотермальные электростанции (ГеоЭС). Также выделяется Больше-Банное месторождение, запасы парогидротерм которого отнесены к забалансовым, в связи с чем оно не разрабатывается. Еще одним перспективным объектом является Нижне-Кошелевское месторождение, чьи параметры и энергетический потенциал сопоставимы с Мутновским. Однако его запасы не были утверждены по причине незавершенных разведочных работ. Паужетское месторождение служит ресурсной базой для Паужетской ГеоЭС с запасами пароводяной смеси (ПВС) 36,7 тыс. т/сут. Существует мнение, что прогнозные ресурсы месторождения близки к исчерпанию, поскольку бурение новых скважин не приводит к значительному приросту добычи. Мутновское месторождение эксплуатируется с 1999 г. и обеспечивает теплоносителем Верхне-Мутновскую (12 МВт) и Мутновскую

(50 МВт) ГеоЭС. Вырабатываемая электроэнергия покрывает до 30% потребностей Петропавловск-Камчатской агломерации. Энергетический потенциал месторождения оценивается как высокий и может быть увеличен за счет освоения его южной части и внедрения бинарных технологий. Больше-Банное месторождение, первоначально рассматривавшееся как аналог Паужетского, в ходе разведки было признано нерентабельным для строительства ГеоЭС из-за недостаточных запасов.

На Курильских островах разведаны и частично освоены два месторождения парогидротерм, используемые для геотермальной энергетики: на островах Кунашир и Итуруп. Освоение месторождения Горячий Пляж (о. Кунашир) достигло глубины 1270 м. На его базе функционирует Нижне-Менделеевская ГеоЭС, обеспечивающая электроснабжение поселков Южно-Курильск и Горячий Пляж. Согласно геофизическим и гидрогеотермическим данным, ресурсы месторождения значительно превосходят как текущие объемы добычи, так и утвержденные запасы. Перспективы увеличения добычи связаны с бурением на глубины свыше 1500 м и освоением перспективных площадей, прилегающих к Нижне-Менделеевскому участку. На Океанском месторождении (о. Итуруп) была введена в опытную эксплуатацию Океанская ГеоЭС мощностью 2,5 МВт, снабжавшая электроэнергией г. Курильск и другие населенные пункты острова. Однако в 2015 г. станция была выведена из эксплуатации вследствие аварии энергетической установки, восстановление которой признано невозможным.

Термальные воды *Охотско-Чукотского региона* генетически связаны с одноименным вулканическим поясом, который протягивается более чем на 3000 км вдоль тихоокеанского побережья. Интенсивный магматизм и наземный вулканизм, продолжавшиеся здесь до позднего кайнозоя, обусловили формирование многочисленных проявлений термальных вод на всём протяжении пояса — от Чукотки до Сихотэ-Алиня. На территории Чукотки и Охотского сектора выявлено свыше 20 групп термальных источников. Их локализация контролируется зонами тектонических нарушений в мезо-кайнозойских вулканогенных толщах. К числу наиболее значимых термопроявлений Чукотского сектора относятся Чаплинские, Лоринские, Мечигменские, Сенявинские, Аракамчеченские и Дежневские источники. Их средние температуры варьируются от 30–40 °С до 80 °С при различной минерализации. Наибольшая минерализация (18–19 г/л) зафиксирована в Чаплинских и Дежневских источниках, а максимальная температура (97 °С) — в Мечегменских. Наиболее известным и высокотемпературным проявлением Охотского сектора является Тальский источник с температурой свыше 90 °С. Дебит пробуренной на месторождении скважины достигает 10 л/с. В Сихотэ-Алиньском секторе распространены слаботермальные источники с температурами от 20 °С до 54 °С.

Формирование термальных вод *Байкальского региона* обусловлено его приуроченностью к Байкальской рифтовой зоне протяженностью около 2000 км. Для этой зоны характерны высокая сейсмичность и проявления четвертичного вулканизма. Термальные источники распространены по всей длине рифта и приурочены к зонам трещиноватости глубинных разломов в докембрийских гранитных массивах. Наибольшая концентрация термопроявлений наблюдается в центральной (осевой) части рифтовой долины, где отмечаются максимальные величины растяжения земной коры, выраженные крупными тектоническими впадинами (Тункинской, Байкальской, Баргузинской и др.). Циркуляция подземных вод имеет трещинно-жильный характер. Наиболее значимые по температуре (до 84 °С) и дебиту (от 1–10 до 85 л/с) источники связаны с Баргузинской впадиной и отличаются низкой минерализацией. Десятки известных термопроявлений традиционно используются в бальнеологических и рекреационных целях и учитываются государственным балансом как месторождения минеральных вод. При этом широкое практическое применение термальных вод региона ограничено рядом факторов: недостаточным дебитом для организации теплоснабжения, а зачастую и их удаленностью в труднодоступных районах от потенциальных потребителей.

Термальные воды *Западной Сибири* приурочены главным образом к нижнемеловым водоносным комплексам в пределах Западно-Сибирского артезианского бассейна. Наибольший потенциал сосредоточен в его центральных и южных районах. Воды обладают напорным характером, величина избыточного напора на устье скважин достигает десятков метров. Наблюдается закономерный рост температуры и минерализации вод с глубиной погружения водоносных горизонтов к центру бассейна. На глубинах более 2500 м пластовые температуры достигают около 100 °С, а на изливе — до 85 °С; эти воды, как правило, имеют соленый состав. В южной части бассейна воды, добываемые с глубин 1500–2300 м, характеризуются температурой на изливе 45–65 °С и минерализацией 20–30 г/л. С интервала 600–1500 м температуры на изливе составляют до 45 °С при минерализации от 2 до 20 г/л. В настоящее время термальные воды в Омской, Томской и Новосибирской областях используются в незначительных объемах для бальнеологии, рекреации и рыбководства. Их применение для теплофикации практически отсутствует. К основным ограничивающим факторам относятся высокие капитальные затраты на бурение глубоких скважин и создание теплофикационных систем, рассчитанных на работу с высокоминерализованными водами, а также сложность утилизации отработанных термальных вод.

Формирование термальных вод *Крымско-Кавказского региона* контролируется преимущественно мезо-кайнозойскими отложениями Скифской плиты, а также зонами ее сочленения с альпийскими

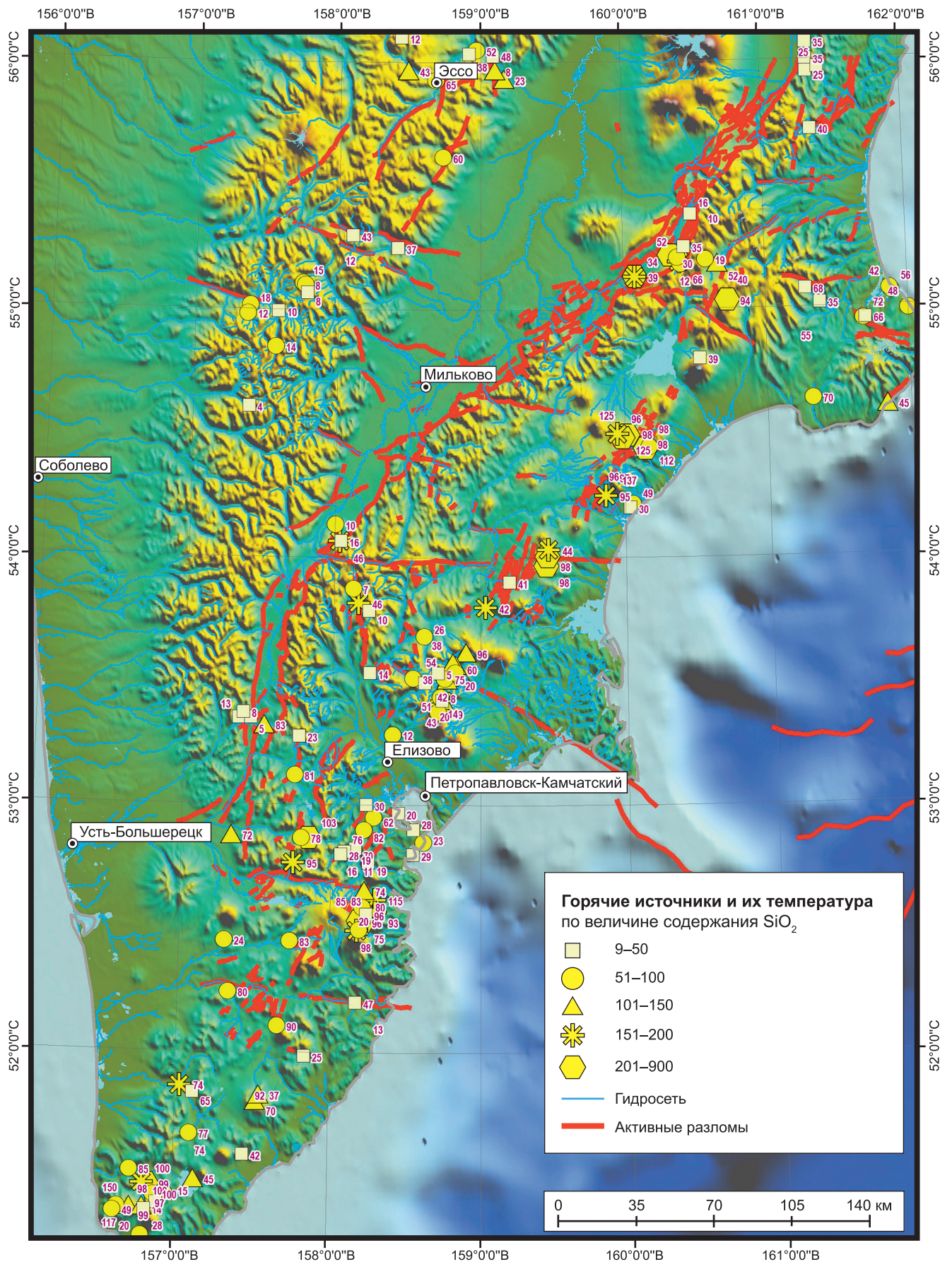


Рис. 4. Цифровая модель рельефа, активные разломы Камчатки и горячие источники, различающиеся по температуре выхода флюида на поверхность и содержанию  $\text{SiO}_2$ , как геотермометру максимального прогрева [Георгиевский и др., 2025]

складчатыми сооружениями Крыма и Большого Кавказа. Для большей части региона характерно пластовое залегание термальных вод, образующих артезианские бассейны. Отдельные термопроявления связаны с зонами тектонических нарушений и трещиноватости на северном склоне Большого Кавказа. Температура термальных вод на изливе варьирует от 40 до 117 °С, а минерализация — в широком диапазоне. Наблюдается прямая зависимость: с увеличением глубины вскрытия водоносных горизонтов возрастают как температура, так и минерализация вод. В Краснодарском крае и Адыгее воды вскрываются на глубинах 1,7–3,0 км с температурами 60–117 °С, низкой минерализацией (менее 10 г/л) характеризуются лишь около 20% ресурсов; остальные 80% имеют минерализацию до 30 г/л и выше. В Дагестане распространены термальные воды с температурой 50–100 °С и минерализацией 2–27 г/л. В Чеченской Республике отличительной особенностью является низкая минерализация вод (как правило, не более 2,0 г/л) при температурах 60–108 °С. На государственном балансе региона Северного Кавказа числится 30 месторождений теплоэнергетических вод. Единственное в Крыму Новоселовское месторождение в настоящее время не эксплуатируется.

**Геологическое строение гидротермальных месторождений в областях активного вулканизма (Мутновский блок, Камчатка).** Камчатский край и Курильские острова — единственные регионы в России, где имеются высокотемпературные пароводяные смеси, а также многочисленные месторождения геотермальных вод. Самыми крупными в России являются месторождения в пределах Мутновского блока (Мутновское и Верхне-Мутновское). Камчатский район современного вулканизма охватывает большую площадь полуострова к югу от Камчатского перешейка. Здесь сосредоточены все известные действующие и потухшие вулканы Камчатки, линейно вытянутые в цепочки вдоль основных крупных разломов полуострова (рис. 3). Геология исследуемого района изучена достаточно хорошо [Шарапов и др., 1979]. Мутновский блок является элементом Южно-Камчатского антиклинория, где в наиболее приподнятых участках обнажаются отложения нижнего структурного яруса, представленные олигоцен-миоценовой андезитовой формацией (ахотенская толща и асачинская свита) и миоценовыми интрузивами диорит-гранодиоритового состава. В геологическом строении преобладают миоцен-плиоценовые осадочные и вулканические отложения. Размещение как современных, так и палеогидротермальных систем, а также характер развития вулканизма в центральных и южных районах Камчатки контролируются региональными и локальными разломами. Структурный анализ современных и палеогеологических процессов, связанных с вулканизмом и гидротермальной активностью, базируются на двух положениях:

– лавовые излияния происходят по проницаемым зонам растяжения («глубинным» разломам); участки с мощными толщами вулканитов — наиболее проницаемые и являются главными магмоконтролирующими структурами;

– гидротермальные системы приурочены к зонам трещиноватости крупных разломов, обеспечивающих их тепловое питание; часто эти разломы также контролируют и положение вулканов.

Гидрогеотермальные условия Восточно-Камчатского бассейна формируются под влиянием глубинных тепловых источников. Нагрев пород и подземных вод в зонах наиболее значительных термальных аномалий обусловлен, в первую очередь, поступлением тепла от остывающих магматических очагов и сопутствующих им парогазовых флюидов и имеет прямую связь с геохимическим составом подземных вод, в которых содержание SiO<sub>2</sub> может служить геотермометром (рис. 4, с учетом данных [Кирюхин и др., 2010]) зон с различной степенью прогрева подземных вод, циркулирующих по ослабленным зонам разломов и трещиноватости. Пространственное распределение и интенсивность этих аномалий определяются разломной тектоникой и удаленностью от действующих вулканов и приповерхностных магматических очагов.

В пределах Мутновского блока развитие гидротермальных систем и сопутствующей рудной минерализации демонстрирует четкую пространственно-временную связь с магматическими процессами. Основные зоны гидротермально измененных пород приурочены к крупным разломным структурам северо-восточного простирания, являющимся частью транскамчатской глубинной разломной системы. Формирование продуктивных гидротермальных систем происходило исключительно в участках развития интрузивных тел гранитоидов или экстррузивных массивов андезито-дацитового состава, которые выступали в качестве тепловых источников. Гидротермальные системы Мутновского блока демонстрируют четкую пространственно-временную связь с этапами магматической активности. Наиболее интенсивная гидротермальная деятельность проявлялась на определенных этапах эволюции кислого вулканизма, что отражает их генетическую взаимосвязь. Современные термальные источники рассматриваются как реликты более мощных четвертичных рудообразующих систем. Их параметры и структурные особенности могут служить моделями при реконструкции палеогидротермальных процессов.

**Стратегия доразведки геотермальных месторождений: геологическая модель как инструмент для минимизации рисков.** Мутновская гидротермальная система расположена в субмеридиональной депрессии к северу от вулкана Мутновская Сопка (рис. 5). Фундамент депрессии сложен вулканогенными комплексами (ахотенский, асачинский, алнейский) и четвертичными эффузивами, которые

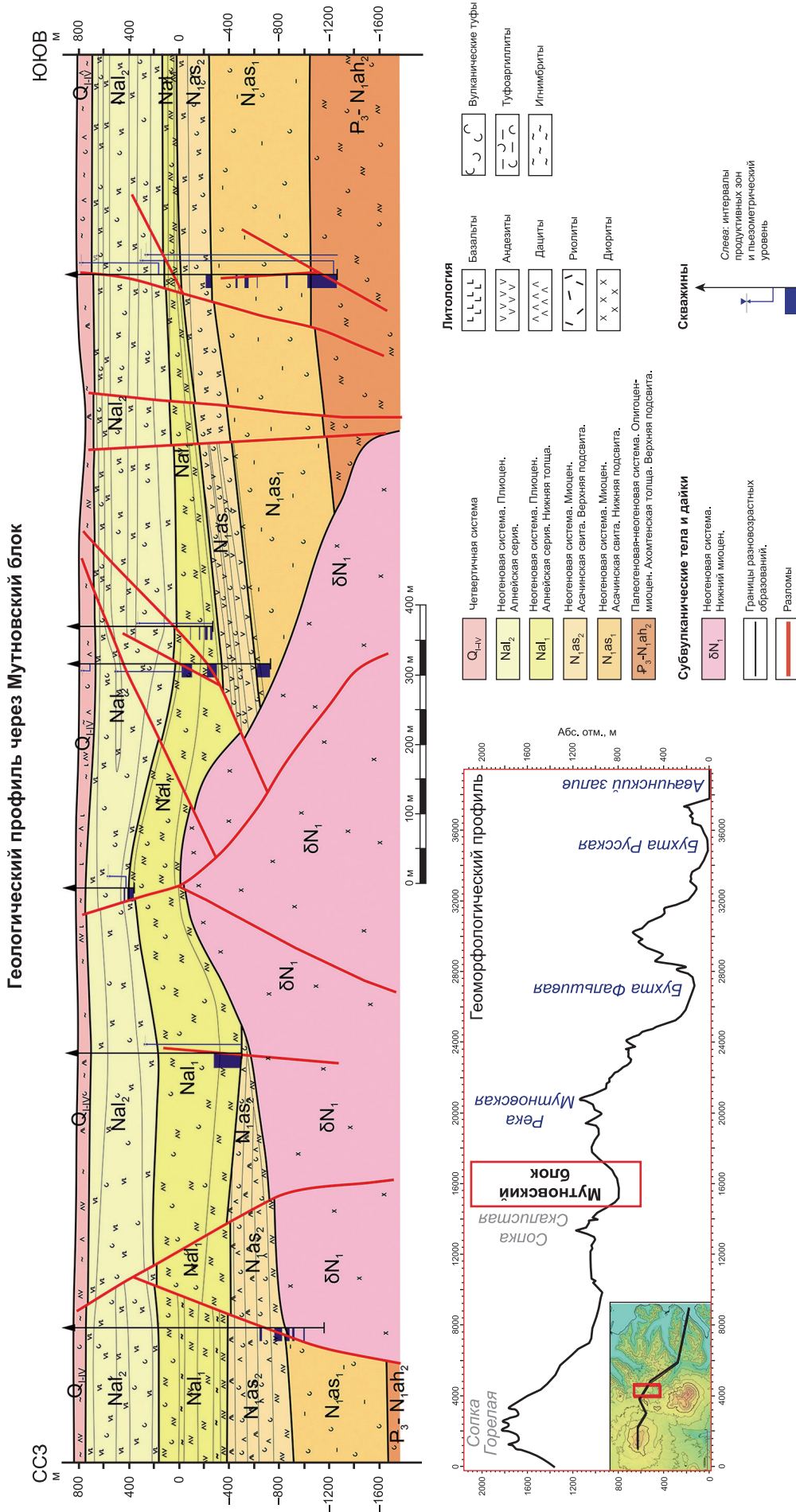


Рис. 5. Геологический и геоморфологический профили через Мутновский блок (Камчатка), в пределах которого расположено Мутновское месторождение парогидротерм [Георгиевский и др., 2025]

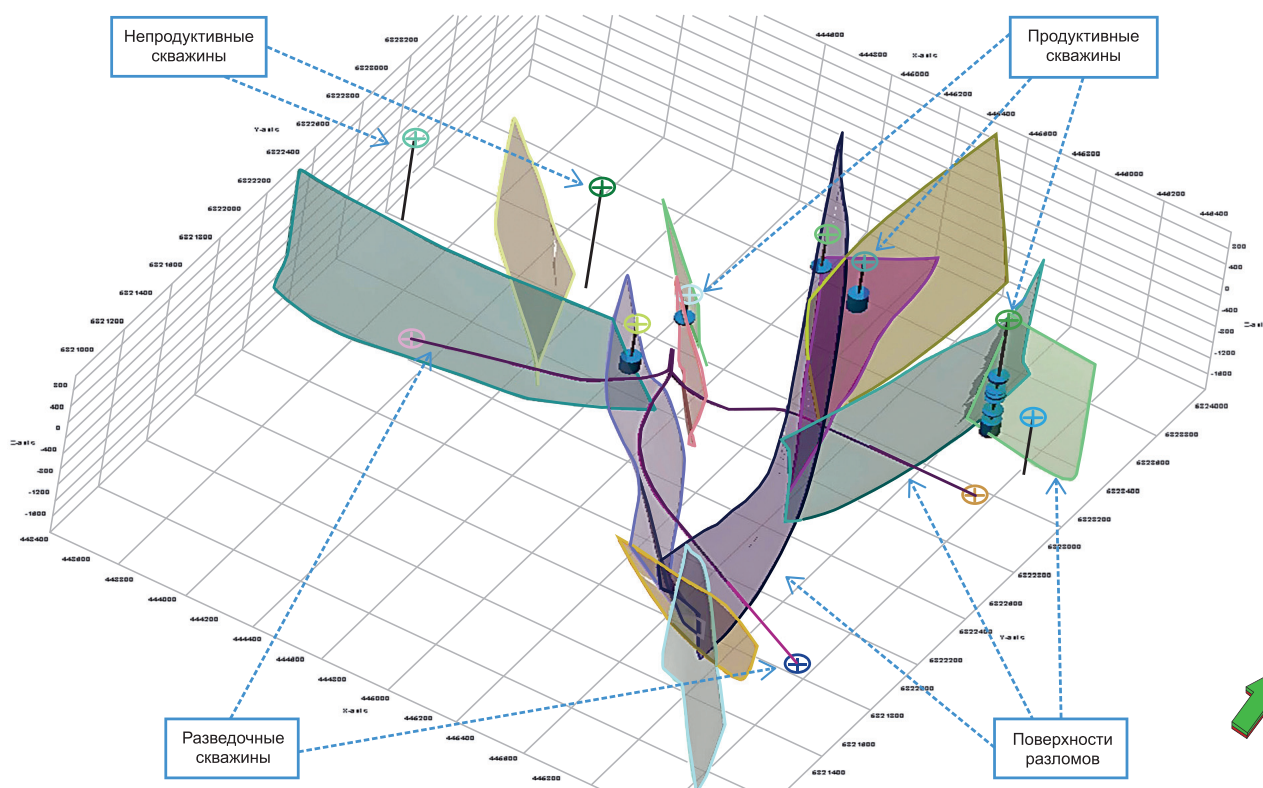


Рис. 6. Фрагмент тектонической модели участка парогидротермального месторождения Мутновского блока (Камчатка)

перекрыты игнимбритами кальдеры влк. Горелая Сопка и отложениями современных стратовулканов. Грабенообразное понижение к северу от вулкана, прорезанное разломами субширотного и северо-восточного простирания, представляет собой тектонически ослабленную зону. Наиболее интенсивные проявления пара на протяжении всей Северо-Мутновской зоны приурочены к узлам пересечения этих разломов различных направлений, то есть на тех участках, где тектоническая раздробленность пород максимальна.

Именно с этой структурно-геологической особенностью и связана основная специфика геотермальных месторождений Мутновского блока. Структурно-геологическим строением и тепловым режимом определяются следующие основные геологические риски, которые должны быть минимизированы оптимально выбранной стратегией доразведки месторождения, направленной на достижение максимальной эффективности при локализации геотермальных ресурсов для последующего освоения. По причине наличия существенных неопределенностей в строении объекта, его слабой степени изученности, отсутствия четких прогнозных критериев для выбора наиболее продуктивных зон, наличие эффективной стратегии поиска и разведки месторождения имеет ключевое значение.

Успешность исторического бурения и доля работающих скважин в пределах Мутновского блока составляет менее 25% [Бутузов и др., 2002]. Повышение геологической успешности бурения каждой отдельной скважины имеет важное значение, так

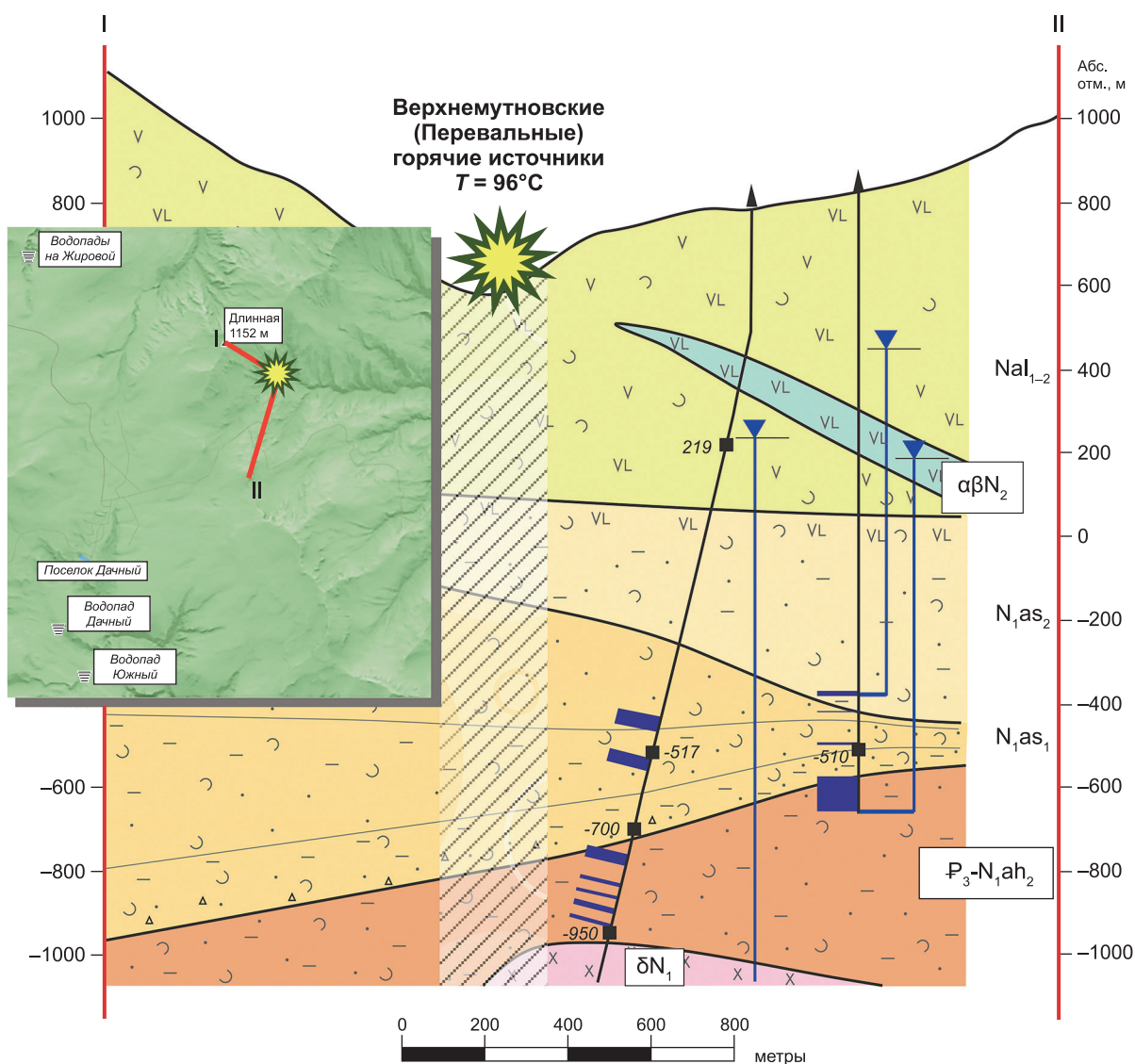
как КПД преобразования геотермальной энергии в электрическую составляет менее 20%, при этом для получения мощности 1МВт необходимо получение соответствующего дебита 2 кг/с пара. Для сравнения, ГеоЭС на Верхне-Мутновском участке в пределах Мутновского блока имеет мощность 12 МВт, то есть соответствующая мощность уже может поддерживаться единичными скважинами.

Основные геологические риски, которые могут реализоваться при поисково-разведочном бурении, связаны с:

- отсутствием флюида и (или) путей миграции;
- отсутствием теплоносителя или охлаждением за счет привноса поверхностных вод;
- вторичными изменениями пород, приводящими к отсутствию свободной миграции.

Более детально разберем некоторые ключевые особенности, позволяющие минимизировать указанные риски. Для проведения поисково-разведочных работ в пределах Мутновского блока была построена геологическая модель, включающая как стратиграфическое, так и структурно-тектоническое строение (фрагмент которой приведен на рис. 6), учитывающий геолого-структурные и эволюционные черты строения объекта, позволяющая учесть неопределенности структурно-геологического строения, а, следовательно, как было описано выше, локализовать зоны наиболее вероятного наличия ПВС как основного поискового объекта.

Как показано на рис. 6, имеется четкая закономерность расположения непродуктивных скважин исторического фонда, расположенных вне зон разло-



<b>NaI<sub>1-2</sub></b>	Неогеновая система. Плиоцен. Алнейская серия.		Базальты		Вулканические туфы
<b>N<sub>1as<sub>2</sub></sub></b>	Неогеновая система. Миоцен. Асачинская свита. Верхняя подсвита.		Андезиты		Туфоконгломераты
<b>N<sub>1as<sub>1</sub></sub></b>	Неогеновая система. Миоцен. Асачинская свита. Нижняя подсвита.		Туфо-андезолиты		Туфопесчаники
<b>P<sub>3</sub>-N<sub>1ah<sub>2</sub></sub></b>	Палеогеновая-неогеновая системы. Олигоцен-миоцен. Ахонтенская толща. Верхняя подсвита.		Туфо-аргиллиты		Диориты

**Субвулканические тела и дайки**

<b>αβN<sub>2</sub></b>	Неогеновая система. Плиоцен.		Выход горячих подземных вод на поверхность
<b>δN<sub>1</sub></b>	Неогеновая система. Нижний миоцен.		Зона трещиноватости

**Скважины**

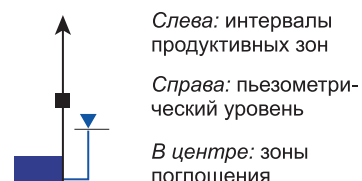


Рис. 7. Фрагмент геологического разреза Мутновского блока (Камчатка) вблизи Верхнемутновских (Питателевских) горячих источников

мов, а при этом основные продуктивные скважины приурочены именно к ослабленным тектоническим зонам и, главное, к зонам пересечения таких тектонических нарушений. Такая модель является мощным прогнозным инструментом, позволяющим выбрать наиболее оптимальные траектории новых поисково-разведочных скважин, которые пересекают наибольшее количество ослабленных, в пределах которых и предполагается наличие ПВС и зоны миграции флюида. Примеры траекторий, наклонно-направленных поисково-разведочных скважин показаны на рис. 6.

Следующей существенной неопределенностью строения геотермальных месторождений Камчатки является гидрогеологический режим питания, источники, объемы и схемы питания, каналы миграции и наличие выдержанных водоносных горизонтов. С этим фактором также тесно связана количественная оценка теплопереноса, осуществляемого подвижным флюидом. Применительно к Мутновскому блоку данная неопределенность также имеет ключевое значение и может быть продемонстрирована на следующем фрагменте геологического строения участка, в районе Верхнемутновских (Перевальных) горячих источников (рис. 7).

Как показано на профиле, в непосредственной близости от выходов на поверхность горячих источников подземных вод пробурено две скважины, каждая из которых является продуктивной. Однако для корректного анализа геологического строения и геологического моделирования необходимо учитывать следующие факторы. Во-первых, литологическое строение разреза, вскрытого соседними скважинами, может демонстрировать существенную вариацию литологического состава и мощностей вулканических комплексов (что является прямым отражением истории геологического развития блока, описанной выше). Во-вторых, зоны продуктивности в скважинах не привязаны к конкретным стратиграфическим комплексам либо гипсометрическим отметкам, имеют разную расчлененность и мощность. Также различия наблюдаются и в локализации зон поглощения, описанных в скважинах. И, наконец, в-третьих: пьезометрические уровни в каждой из скважин существенно ниже, чем гипсометрическая отметка выходов термальных источников.

Все эти особенности строения помогают сделать выводы о том, конфигурация зон поглощения и положение водонасыщенных интервалов должны анализироваться не только с позиции стратиграфического разреза, но и, главным образом, с позиции структурного фактора. А столь резкие колебания и различия в пьезометрическом уровне близкорасположенных скважин (одновременно со значительными вариациями вскрытых в скважинах геологических разрезов) и отметках выхода горячих источников на поверхность напрямую свидетельствуют о наличии гидродинамически не связанных между собой проводящих каналов (по которым ми-

грирует флюид), а также о наличии более широких ослабленных зон, к которым могут быть приурочены и естественные выходы термальных вод, и наиболее высокодебитные скважины. Именно к одной из таких зон и приурочены Верхнемутновские горячие источники, расположенные в зоне, морфологически выраженной в рельефе в виде прямолинейной узкой долины широтного простираия (рис. 7).

Таким образом, оптимальная стратегия поиска и разведки геотермальных месторождений Камчатки, позволяющая минимизировать геологические риски и добиться максимальной эффективности, основана на комплексировании совокупности параметров, включающих следующие составляющие [Георгиевский и др., 2025]:

- геологическое строение, стратиграфию, литолого-петрографическое вулканических комплексов, их фильтрационно-емкостные и реологические свойства;

- гидрогеологический режим, источники питания, режимы инфильтрации, миграция по близповерхностным и глубинным трещиноватым зонам и разломам различной степени раскрытости;

- геотермический режим, механизмы теплопереноса, оценку глубинного теплового потока и конвективного теплопереноса флюидами.

При этом наличие моделей, учитывающих в комплексе данные геологического строения, теплофизические параметры, исторический фонд, результаты бурения и режимы работы скважин позволяет оперативно корректировать последовательность поисково-разведочных работ и выбирать наиболее оптимальные шаги, минимизирующие возникающие геологические риски.

**Заключение и выводы.** На сегодняшний день геотермальная энергия находится на этапе перехода из категории узколокального ресурса в глобальный, играя все более важную роль в обеспечении устойчивого и надежного энергоснабжения по всему миру. В России развитая геотермальная энергетика Камчатки, где действуют Мутновская и Паужетская ГеоЭС, является наглядным примером успешного замещения дорогостоящего ископаемого топлива, что наглядно демонстрирует возможности трансформации геотермальной энергетике из альтернативной в экономически целесообразную и стратегически необходимую для энергообеспечения территорий. Кроме того, актуальность гидротермальной энергетике выходит за рамки электрогенерации, так как служит дополнительно основой для развития смежных отраслей от промышленного теплоснабжения до рекреации и бальнеологии. Иным важным аспектом актуальности данного вида энергетике в России является слабая степень освоения при наличии уже разведанных геотермальных ресурсов. Огромные величина низко- и среднетемпературных геотермальных ресурсов характерна для Краснодарского и Ставропольского краев, Западной Сибири, За-

байкаля, Чукотки и других. И хотя ряд факторов, таких как низкая плотность населения, удаленность и отсутствие инфраструктуры, делают масштабные проекты коммерчески сложными, геотермальная энергия могла бы стать идеальным решением для энергоснабжения изолированных поселков.

Успешный пример проведения поисково-разведочных работ на Камчатке, в пределах Мутновского блока, позволит расширить опыт и успешные отработанные геолого-разведочные этапы и в других регионах России. Поэтому с позиции развития нового направления и наращивания теплоэнергетических мощностей выработка корректной, эффективной

стратегии при минимизации объективных геологических рисков является одной из первоочередных задач.

Таким образом, специфика исследования гидро-термальных систем и стратегия поиска и разведки для последующего экономически эффективного освоения заключается в реализации междисциплинарного подхода. Данные гидрогеологии, геологии и тектоники не просто суммируются, а интегрируются в единую модель. Только такой целостный взгляд позволяет минимизировать риски и превратить природное тепло Земли в надежный и экономически эффективный источник энергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бадавов Г.Б.* Геотермальная энергетика: всемирный обзор 2020 // С.О.К. 2021. № 12. С. 66–74.

*Бадавов Г.Б.* Прямое использование геотермальной энергетике: всемирный обзор 2020 // С.О.К. 2021. № 8. С. 60–78.

*Бутузов В.А., Томаров Г.В., Алхасов А.Б.* и др. Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электро-энергетика, теплоснабжение (обзор) // Теплоэнергетика. 2002. № 1. С. 3–17.

*Георгиевский Б.В., Симаков Я.О., Хамитов А.Т.* и др. Геологические предпосылки формирования и закономерности расположения геотермальных месторождений // Сборник трудов «Тезисы IX Балтийской научно-практической конференции «BalticPetroModel-2025. Петрофизическое моделирование осадочных пород». Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2025. С. 96–101.

*Еремин Н.Н., Ситар К.А., Барановская Е.И.* и др. Геологические предпосылки энергетических природных ресурсов Африки // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 6. С. 100–113.

*Кирюхин А.В., Кирюхин В.А., Манухин Ю.Ф.* Гидрогеология вулканогенов. РАН, Ин-т вулканологии и сейсмологии. СПб.: Наука, 2010. 394 с.

*Свалова В.Б.* Геотермальная энергетика в России и мире и гидрогеотермальные системы Кавказа // Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 2(52). С. 43–53.

*Спектор С.В., Красников Р.В., Попов Е.В.* Термальные подземные воды России: распространение, запасы и проблемы освоения // Недропользование XXI век. 2024. № 5–6 (105). С. 65–75.

*Шарапов В.Н., Симбирев И.Б., Третьяков Г.А.* и др. Магматизм и гидротермальные системы Мутновского блока Южной Камчатки. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 1979. 143 с.

*Huttrer G. W.* Geothermal Power Generation in the World 2015–2020 Update Report. Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik, Iceland, 2020. 39 p.

*Lund J. W., Toth A. N.* Direct Utilization of Geothermal Energy: 2020 Worldwide Review. Proc. of the 2020 World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland, 2020. 39 p.

The Future of Geothermal Energy / International Energy Agency. France: International Energy Agency, 2024. 126 p.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025,  
одобрена после рецензирования 12.11.2025,  
принята к публикации 27.02.2026

УДК 553.07

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2026-65-1-144-152

## ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Алексей Андреевич Самсонов<sup>1</sup>✉, Дмитрий Михайлович Коршунов<sup>2</sup>,  
Виктор Иванович Старостин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; samsonov@geol.msu.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>

<sup>2</sup> Геологический институт РАН, Москва, Россия; dmit0korsh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8500-7193>

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; star@geol.msu.ru

**Аннотация.** Техногенные образования, сформировавшиеся в результате добычи и переработки твердых полезных ископаемых, представляют собой не просто отходы, а новый класс динамичных геологических тел. В работе обоснована необходимость применения к ним комплексного литологического подхода, аналогичного изучению природных формаций, для прогнозирования их эволюции и оценки потенциала вторичного использования. На конкретных примерах предложена концепция экзогенно-техногенных металлогенических провинций (Кольская, Уральская, Курская), отражающая пространственную приуроченность и специализацию антропогенных скоплений минерального сырья. Результаты исследования доказывают, что техногенные месторождения являются активными компонентами геологической среды, а их изучение требует развития нового направления — антропогенного литогенеза.

**Ключевые слова:** техногенные образования, хвостохранилища, отходы недропользования, гипергенез, геохимия, классификация, металлогения

**Для цитирования:** Самсонов А.А., Коршунов Д.М., Старостин В.И. Проблемы изучения и классификации твердых полезных ископаемых техногенных образований // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2026. № 1. С. 144–152.

## PROBLEMS OF STUDYING AND CLASSIFYING OF MINERAL RESOURCES IN TECHNOGENIC FORMATIONS

Aleksey A. Samsonov<sup>1</sup>✉, Dmitriy M. Korshunov<sup>2</sup>, Viktor I. Starostin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; samsonov@geol.msu.ru✉, <https://orcid.org/0009-0007-4637-0399>

<sup>2</sup> Geological institute RAS, Moscow, Russia; dmit0korsh@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8500-7193>

<sup>3</sup> Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; star@geol.msu.ru

**Abstract.** Technogenic formations resulting from the extraction and processing of solid mineral resources are not merely waste, but constitute a new class of dynamic geological bodies. This paper substantiates the necessity of applying a comprehensive lithological approach to them, analogous to the study of natural formations, for forecasting their evolution and assessing the potential for secondary use. Using specific examples, the concept of exogenic-technogenic metallogenic provinces (e.g., Kola, Ural, Kursk) is proposed, reflecting the spatial localization and specialization of anthropogenic accumulations of mineral raw materials. The research results demonstrate that anthropogenic deposits are active components of the geological environment, and their study necessitates the development of a new scientific field — anthropogenic lithogenesis.

**Keywords:** technogenic formations, tailings storage facilities, mining waste, supergene, geochemistry, classification, metallogeny

**For citation:** Samsonov A.A., Korshunov D.M., Starostin V.I. Problems of studying and classifying of mineral resources in technogenic formations. *Moscow University Geol. Bull.* 2026; 1: 144–152. (In Russ.).

**Введение.** В современной литературе под термином «техногенные образования» понимают все результаты изменения литосферы, связанные с человеческой деятельностью, будь то затопленные зоны перед гидроэлектростанциями, полигоны твердых бытовых отходов, города и даже асфальтовые дороги [Трофимов и др., 1995; Ford et al., 2014]. В данной работе рассматриваются техногенные образования, представленные отходами добычи и первичной переработки минерального сырья, а также отходами

энергетической и металлургической отраслей, как накопленные в исторический период, так и формируемые в настоящее время (рис. 1).

Добыча полезных ископаемых — одно из древнейших направлений деятельности человечества, уходящее корнями в эпоху неолита. Уже около 40 000 лет назад люди добывали кремний для орудий, а к IV–III тысячелетиям до н. э. появились первые медные и золотые рудники (например, в Месопотамии и на Балканах). В античности масштабы добычи

возросли: римляне разрабатывали серебряные месторождения в Испании, свинцовые — в Британии, создавая примитивные отвалы пустой породы. Однако до промышленной революции XVIII–XIX вв. объемы добычи оставались сравнительно малы, а воздействие на геологическую среду — локальным.

Резкий перелом произошел в XX в. с развитием технологий, ростом населения и потребностей промышленности. Если в 1900 г. мировая добыча угля составляла около 700 млн т, то к 2000 г. она превысила 5 млрд т. Аналогичный рост наблюдался и для металлов: производство железа за век увеличилось более чем в 30 раз, алюминия — в тысячи раз. Этот беспрецедентный рост, обусловленный потребностями индустриализации и мировых войн, привел к формированию глобальной сети антропогенных накоплений, сопоставимых по масштабам с природными геологическими телами. Например, только в угольной промышленности СССР к 1980-м годам накопилось свыше 25 млрд т отходов, а современные хвостохранилища разных типов добычи могут занимать десятки квадратных километров [Старостин, Самсонов 2023]. Скорость отработки крупных объектов такова, что за 30–40 лет техногенные отходы недропользования увеличиваются по своей площади минимум в несколько раз. Так, например, суммарная площадь, занимаемая отвалами и хвостохранилищами Ковдорского горно-обогатительного комбината с 1986 г. по настоящее время увеличилась в 3,5 раза [Чуриков и др., 2023].

В отличие от коренных рудных месторождений, формирующихся в разных геодинамических обстановках, техногенные скопления твердых полезных ископаемых всегда формируются на поверхности — в зоне активного воздействия экзогенных процессов. Они подвержены влиянию атмосферных факторов (осадки, ветер, перепады температур), которые вызывают физическое выветривание и эрозию; гидрологическим процессам (поверхностный сток, фильтрация, подтопление), что способствует выносу тонкодисперсного материала, гравитационному перераспределению вещества, миграции растворенных компонентов и биогенным факторам (микроорганизмы, растения), которые ускоряют химическое преобразование вещества.

В результате эти антропогенные образования, с одной стороны, аналогичны континентальным осадкам (аллювию, элювию), но с другой — отличаются от них неестественно высокой скоростью формирования, и часто аномальным химическим составом. Это делает их уникальными объектами для изучения с позиций гипергенеза, геологии полезных ископаемых, инженерной геологии и геоэкологии, а также требует разработки специальных подходов к их классификации и моделированию эволюции.

Основная цель данной работы — представить широкому кругу исследователей современные проблемы изучения и классификации твердых полезных ископаемых техногенных образований и показать

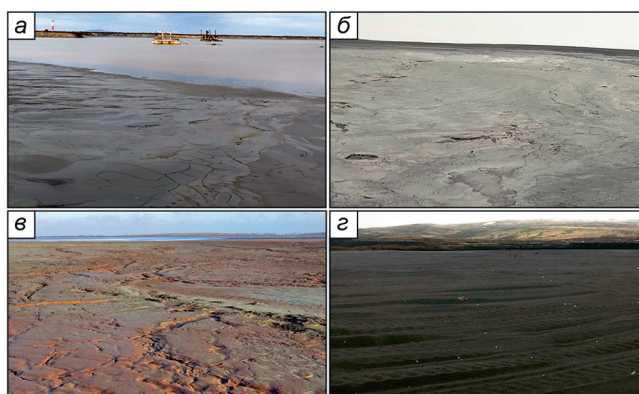


Рис. 1. Панорамные фотографии техногенных образований минерального сырья различных типов: а — хвостохранилище Новоучалинского месторождения (Южный Урал); б — хвостохранилище Ловозёрского месторождения (Кольский п-ов); в — хвостохранилище Михайловского месторождения (КМА); з — шламовые отвалы ГМК «Печенганикель» (Кольский п-ов)

авторский взгляд на пути их решения. Статья является приглашением к дискуссии по актуальной для современного мира тематике — методическим подходам к изучению и оценке техногенных месторождений.

**Факторы преобразования техногенных геологических тел.** Техногенные образования, а именно отходы недропользования и металлургического комплекса — вскрышные породы, хвосты переработки, шлаки — будучи локализованы в зоне активного гипергенеза, подвергаются воздействию тех же экзогенных факторов, что и природные осадочные породы. Как подчеркивал Н.М. Страхов [1963], скорость и направленность выветривания определяются триадой «климат-состав-гидродинамика», что особенно актуально для техногенных геологических тел.

1. *Физическое разрушение.* Температурное выветривание — рыхлые отвалы с низкой сортировкой материала (например, вскрышные породы угольных месторождений) быстро растрескиваются при циклах заморозания-оттаивания. Эоловый перенос — тонкодисперсные хвосты обогащения дают пылевые выбросы, это механизм, описанный Н.М. Страховым для аридных зон, но в техногенных условиях работающий в 10–100 раз быстрее. Например, пылевое загрязнение от переработки апатит-нефелиновых руд Мурманской области составляет 693 т в год. А нарушения ПДК пыли в воздухе зафиксированы на расстоянии более 75 км вокруг хвостохранилищ [Амосов и др., 2023].

2. *Химическое преобразование.* Окисление сульфидов формирует зоны в отвалах горных пород аналогичные зонам окисления кор выветривания рудных месторождений, но с лавинной динамикой из-за отсутствия природных буферов, таких как глинистые прослои и карбонаты [Donald et al., 1993.; Nordstrom et al. 1999.; Бортникова и др., 2006]. Также, например, техногенные карбонатные отходы (флюсовых доломитовых и магнезитовых

Таблица 1

## Сравнительная характеристика процессов преобразования кор выветривания и техногенных образований

Критерий	Природные коры выветривания по [Разумова и др., 1963; Фролов, 1980]	Техногенные образования по [Lottermoser, 2022; Трофимов, 2023]
Время формирования	$10^3 - 10^6$ лет	$10 - 10^2$ лет
Скорость окисления (на примере сульфидов)	$10^{-6} - 10^{-5}$ м/год	$10^{-3} - 10^{-2}$ м/год

месторождений) разрушаются до 30% за 10–20 лет из-за высокой дисперсности материала [Касимов, Перельман, 1999].

3. *Гидрогенная миграция.* Техногенные геологические тела, в отличие от природных, часто лишены зональной фильтрации. Вертикальная инфильтрация преобладает над боковой, формируя «столбы выщелачивания». Резкий контраст гранулометрического состава во флотационных хвостах создает аномальные капиллярные эффекты, ускоряющие перенос растворов [Касимов, Перельман, 1999; Lottermoser, 2010].

Таким образом, техногенные образования представляют собой активно эволюционирующие системы, в которых процессы выветривания протекают на порядки быстрее, чем в классических корах выветривания (табл. 1). Если природные коры формируются тысячелетиями, постепенно достигая равновесия с окружающей средой [Разумова и др., 1963], то техногенные аналоги могут уже через 10–30 лет демонстрировать признаки глубокого преобразования. В отличие от плавных геохимических профилей латеритов или гидрослюдистых кор, в отвалах наблюдаются резкие контрасты: например, окисленные сульфидные зоны могут соседствовать с неизмененным материалом всего в нескольких сантиметрах.

Интенсивность и характер преобразования техногенных тел напрямую зависят от климатических условий. Во влажных тропиках и субтропиках (например, отвалы бокситовых рудников в Гвинее или никелевые хвосты обогащения Новой Каледонии) доминирует химическое выветривание с быстрым выносом растворимых компонентов [Plumlee, 2023]. Формируются аналоги латеритных кор — железистые и алюминиевые корки, но с аномально высоким содержанием хрома и никеля.

В аридных и семиаридных регионах (медьсодержащие отвалы месторождений Чили, хвосты обогащения золоторудных месторождений Австралии) преобладает физическое разрушение (термокластика, эоловая дефляция). Солевые коры (гипс, галит) образуются за 5–10 лет вместо столетий в природных условиях, а пылевые бури разносят накопленный материал на сотни километров, приводя к обширному загрязнению [Lottermoser, 2010; Dold, 2014].

В умеренном и холодном климате (отвалы угольных месторождений Кузбасса, сульфидные хвосты обогащения и отвалы шлаков переработки руд месторождений Кольского полуострова) циклы замерзания-оттаивания приводят к быстрому растрескиванию материала [Архипов, Решетняк, 2017]. Кислотный дренаж развивается медленнее, чем в тропиках, но действует дольше из-за замедленной нейтрализации. В зоне вечной мерзлоты формируются «законсервированные» техногенные геологические тела с замедленной, но не остановленной динамикой.

Помимо того, что техногенные образования подвержены всем тем же агентам преобразования, что и прочие континентальные осадки, они сами оказывают значительное влияние на окружающие их породы, формируя вместе с ними единую динамическую систему. Это взаимодействие проявляется через комплекс физико-механических, геохимических и термодинамических процессов, имеющих существенное значение для понимания их эволюции [Lottermoser, 2022].

Вскрышные горные породы оказывают значительное физическое воздействие на геологическую среду. Масса крупных отвалов горных пород создает нагрузку на подстилающие породы, вызывая их проседание и уплотнение. Особенно ярко это проявляется в районах с глинистыми толщами. Одновременно происходит изменение гидродинамического режима — создание искусственного фильтрационного напора приводит к подтоплению коренных пород и перераспределению грунтовых вод [Гальперин и др., 2012; Шерстюк, 2014].

Геохимическое взаимодействие на окружающую среду проявляется особенно интенсивно. Кислые или щелочные растворы, фильтрующиеся из отвалов, вызывают глубокое преобразование подстилающих пород [Dold, 2016]. В случае сульфидных отвалов кислотные дренажи приводят к окислению пирита во вмещающих сланцах с образованием серной кислоты, которая активно мигрирует. Тогда как карбонатные отвалы могут вызывать вторичную карбонатизацию песчаников. На контакте «отвал-порода» формируются специфические геохимические барьеры, где возникают новые минеральные ассоциации [Acharya, Kharel, 2020].

С геологической точки зрения эти процессы похожи по-своему проявлению на контактный метаморфизм и вместе с тем на классическое выветривание, но с уникальными особенностями: локальным проявлением, аномально высокой скоростью протекания и специфическими термодинамическими условиями.

По вышеназванным причинам, техногенные образования следует рассматривать не как изолированные образования, а как активные геологические системы, оказывающие преобразующее воздействие на окружающую геологическую среду. Техногенные горные породы представляют собой принципиально новый тип геологических тел, формирующийся не

по естественным литогенетическим циклам, а в результате направленной хозяйственной деятельности человека. Однако их последующая трансформация и взаимодействие с окружающими породами полностью подчиняется законам гипергенеза. Эти горные породы — не просто отходы хозяйственной деятельности человека, а новый класс поверхностных геологических формаций.

Следовательно, такой подход, с одной стороны, позволяет и даже требует использовать традиционные литологические методы исследования, такие как анализ минерального и химического состава, определение стадийности выветривания (через геохимические или минералогические критерии), изучение процессов денудации и аккумуляции (аналог фациально-литологического анализа), определение морфологии зон изменения и новообразованных реакционных зон взаимодействия с вмещающими (подстилающими) породами. С другой стороны, требуется разработка совершенно новых подходов: специальных методов картирования, геолого-экономической и экологической оценки твердых полезных ископаемых техногенных образований, адаптации учений о фациях и формациях. Всё вышесказанное создает основание для развития нового раздела геологии — антропогенного литогенеза, изучающего формирование и эволюцию искусственных геологических формаций.

**К вопросу о классификациях.** К настоящему времени уже множество исследований посвящено анализу экологических и экономических аспектов накопления и природного изменения отходов недропользования — хвостов обогащения и отвалов [Lottermoser, 2010; Архипов, Решетняк, 2017; Ford et al., 2014; Jamieson et al., 2015 и др.]. Этими и другими исследователями предлагались различные методы и интерпретационные приемы в попытках классифицировать все накопленные отходы добычи и первичной переработки минерального сырья, отходов энергетической и металлургической отраслей.

Системы классификаций предлагались самые различные. Наиболее полная работа, посвященная литологическому анализу таких отложений — это работа Дж.Р. Форда [Ford et al., 2014], предлагающая полноценный механизм описания «антропогенных слоев». Хотя Дж.Р. Форд [2014] предложил детальную литостратиграфическую модель всех типов антропогенных отложений и методы их исследований, его подход не учитывает ключевые особенности техногенных образований — специфический минеральный и химический составы, взрывную в геологическом масштабе времени геохимическую трансформацию и искусственную дисперсность.

Одна из наиболее удачных систем описания в этом направлении предложена Г.Е. Джемисоном [Jamieson et al., 2015], она учитывает тип техногенного «генезиса» накопления отходов и их минералогию. Предлагается отдельно классифицировать отвалы вскрышных и вмещающих пород от хвостов

обогащения после переработки, т.к. отвалы чаще всего отвечают нормальным горным породам, хотя и находящемся в нарушенном состоянии, а хвосты являются крайне специфическим накоплением минералов, не встречаемых в природе в таких ассоциациях, более того находящихся в мелкодисперсном состоянии [Lottermoser, 2010; Lottermoser, 2022]. Помимо этого, Г.Е. Джемисон предлагает вслед за [Jamieson, 1994] разделять все минеральные ассоциации на первичные, которые существовали до добычи, но были «переотложены» и измельчены в результате добычи полезных ископаемых, и вторичные — те, которые претерпели выветривание при хранении.

Необходимо учитывать и тип минералов, которые накапливаются в отвалах и хвостах [Lottermoser, 2010], так как сама минеральная смесь определяет возможные экологические риски, оставшиеся полезные компоненты и способы их извлечения, а также тип и подверженность техногенных образований поздним изменениям.

Отвалы вскрышных пород, как объект изучения литологии, представляют собой техногенные геологические тела, формирующиеся в результате складирования пород, извлеченных при разработке месторождений твердых полезных ископаемых открытым способом. Они характеризуются широким диапазоном размеров частиц — от валунов крупнее 100 мм до пелитовых фракций менее 0,01 мм, что связано с технологией отработки. Характерной особенностью является несортированность материала с присутствием крупных (до 1–3 м) обломков в основании отвальных тел. Структурно-текстурные особенности отвалов включают отсутствие четкой слоистости и наличие блокового строения, выраженного разной степенью уплотнения. Интенсивность современного выветривания зависит от размерности частиц, а значит протекает неравномерно, в первую очередь разрушая пелитовый материал. Минералогический состав в основном соответствует материнским породам и новой системы классификации не требует.

Если вскрышные и вмещающие породы легко классифицируются классическими геологическими инструментами, то для хвостов обогащения единого подхода для классификации нет. Хвосты обогащения с точки зрения литологии можно описать как геологические тела с мелкодисперсным размером частиц алевритовой и пелитовой размерности (менее 0,25 мм), отсутствием перекрывающих пород, наличием четко выраженных границ, обусловленных техногенной укладкой отложений. В минералогическом и структурно-текстурном отношении они характеризуются сложными внутренними фациальными переходами, связанными с технологическими колебаниями состава перерабатываемой руды, водно-гравитационной сепарацией легких и тяжелых минералов и постседиментационными процессами. Это показано в предыдущих работах авторов на примере геологического описания хвостов техногенного месторождения Барун-Нарын (Республика Бурятия)

[Самсонов и др., 2024]. Выяснено, что основная причина фациально-минералогического разнообразия связана с особенностями процесса захоронения отходов, а также более позднего естественного водно-гравитационного перераспределения минеральных фаз.

Авторами предлагается комбинированный подход к классификации (табл. 2). В основе классификации лежит иерархический принцип, учитывающий происхождение отходов (технологический критерий), их вещественный состав и гипергенные преобразования. При этом, для выделения подтипов можно привлекать дополнительные критерии, обусловленные ситуативной целесообразностью, такие как гранулометрический состав, степень экологического воздействия, пригодность к переработке и так далее.

В классификации учитывается время нахождения на поверхности техногенных образований, от которого зависит текущее качественное состояние накопленного вещества и интенсивность перераспределения отдельных, в том числе полезных, компонентов внутри тел техногенных образований. Они могут быть только что накопленными и находящимися в начальной стадии окисления нестабильных минералов (например, сульфидов); окисленными — претерпевающими изменения прямо сейчас; стабилизированными — уже прошедшими стадию активного изменения и в данный момент претерпевающие только образование поздних гидроксидов.

Таблица 2

**Классификационные признаки твердых полезных ископаемых техногенных образований**

Уровень иерархии	Признак	Критерий выделения
I — Класс	Технологический (происхождение)	Способ получения в технологической цепочке (добыча, обогащение, передел)
II — Тип	Вещественный (минеральный)	Доминирующая минеральная ассоциация, определяющая геохимическое поведение
III — Характеристика	Гипергенное преобразование	Скорость, интенсивность и продукты вторичных изменений, факторы преобразования

На основе классификационных признаков нами выделяются следующие классы и типы техногенных образований.

**1. Класс «Вскрышные и вмещающие породы».**

Минеральные ассоциации крайне переменчивые и зависят исключительно от локальной геологической ситуации конкретного месторождения. Скорость выветривания относительно низкая.

**2. Класс «Хвосты обогащения».**

**2.1. Тип «Сульфидные»** — сложены сульфидными (до 40%), силикатными (до 70%) и другими минералами (до 10%). Сульфидные минералы, активно растворяются с образованием серной кислоты,

преобразуются с образованием типичных вторичных минералов и гидроксидов железа и оказывают преобразующее влияние на подстилающие породы;

**2.2. Тип «Оксидные»** — сложены различными оксидами и гидроксидами (до 20%), кварц (до 80%), силикатами (до 10%), карбонатами и глинистыми минералами. Силикатные минералы весьма устойчивы и остаются стабильными достаточно долгое время, в то время как оксиды постепенно лимонизируются;

**2.3. Тип «Щелочно-редкометалльные»** — накапливаются преимущественно щелочные силикаты (КПШ, нефелин), апатит, кварц. В небольших количествах присутствуют моноцит, бадделеит, циркон. Процесс вторичного преобразования протекает крайне избирательно, т.к. накапливаются минералы с принципиально разной степенью устойчивости к поверхностным процессам;

**2.4. Тип «Карбонатно-силикатные»** — сборная группа, сложенная резко доминирующим содержанием силикатных или карбонатно-силикатных минералов (>95%). Такие хвосты накапливаются от переработки руд скарновых и эпитеpmальных месторождений. Вторичные преобразования зависят от конкретной минеральной ассоциации в хвостах и могут протекать как крайне интенсивно, например, при доминировании карбонатных минералов, так и очень медленно при доминировании устойчивых силикатов;

**2.5. Тип «Глинозёмсодержащие»** — хвосты после извлечения алюминия и железа из латеритных пород. В таких хвостах накапливаются преимущественно гидроксиды железа (до 70%), алюминия (до 20%), оксиды титана (до 10%) и кальция. Такие хвосты весьма устойчивы и практически не преобразуются.

**3. Класс «Шлаки».**

**3.1. Тип «Шлаки металлургических предприятий»;**

**3.2. Тип «Золошлаковые отходы энергетических предприятий».**

**4. Класс «Отвалный комплекс отработки россыпных месторождений».**

Данный класс формируется в результате отработки россыпей и представляет собой искусственно переотложенные и рассортированные компоненты исходных рыхлых отложений (торфа, песков, галечников). Характер вторичных преобразований в отвалах россыпей преимущественно физический (разуплотнение, седиментационная дифференциация, эрозия) и слабохимический. Активные гипергенные процессы (окисление, растворение) выражены минимально из-за преобладания химически устойчивых минералов в условиях аллювиальной седиментации.

Ниже приводится общая характеристика по третьему иерархическому уровню классификации на примере хорошо изученных техногенных образований.

**Сульфидные.** В хвостах медно-никелевых месторождений в расслоенных основных комплексах

месторождений типа Норильск-1 и Октябрьское (Красноярский край) накапливается около 70% оливина, пироксена и плагиоклаза и до 30% пирротина с подчиненным количеством халькопирита и пентландита [Бодуэн и др., 2013].

Для месторождений колчеданного типа, таких как Новоучалинское (Республика Башкортостан), в хвостах обогащения накапливается до 60% сульфидов с резким доминированием пирита и в подчиненном количестве халькопирита, сфалерита и других сульфидов и до 40% силикатов, представленных в основном кварцем и хлоритом [Ангелов и др., 2012]. Характерно, что современное минералообразование в хвостах зависит от их климатической локализации. В хвостах Норильских месторождений накапливаются ярозит, гипс и гётит. А в хвостах колчеданных месторождений (Новоучалинское месторождение (Южный Урал), Ново-Урское месторождения (Алтайский край)) помимо ярозита, гётита и гипса также образуются меллантерит, гидрогематит, ковеллин, вюртцит, барит с другими сульфатами и глинистые минералы [Шадрунова и др., 2005; Юркевич и др., 2024].

Однако, хвосты молибден-вольфрамовых месторождений могут быть классифицированы в разные типы в зависимости от доминирующего минерала в ассоциации — сульфидного, карбонатного или оксидного. Например, хвосты Барун-Нарынского месторождения (Республика Бурятия) [Самсонов и др., 2024], согласно предлагаемой классификации, должны быть отнесены к сульфидной группе, так как среди рудных минералов в хвостах значительно доминируют сульфиды, в то время как вольфрамит и другие минералы имеют подчиненное значение.

*Оксидные.* Хвосты формируются при переработке руд, где доминируют оксиды железа, марганца или титана (например, магнетитовые или ильменитовые руды). Наиболее яркими примерами являются месторождения Курской магнитной аномалии (Михайловское, Лебединское и др.) и группа Оленегорских месторождений (Мурманская область). В хвостах их переработки накапливаются в основном магнетит (10-15%), гематит (5-10%), кварц (60-70%) и хлорит (до 10%) с резко подчиненным количеством амфиболов [Косинова, 2009.]. Вторичным изменениям подвержены оксиды железа, которые активно лимонитизируются, образуя железистые «шляпы».

*Щелочно-редкометалльные.* В хвостах накапливаются нефелин, калиевой полевошпат, эгирин, лопарит, эвдиалит, апатиты (в том числе и Sr содержащие), магнетит и ильменит. Среди российских техногенных образований наиболее яркими примерами такого типа являются хвосты переработки руд Ловозёрского месторождения и месторождений Хибинского массива (Мурманская область) [Архипов, Решетняк, 2017]. В хвостах Ловозёрского месторождения основную накопленную массу составляют щелочные силикаты (нефелин, КПШ, эгирин) — 90%, содержание лопарита и эвдиалита не превышает 1% [Максимова и др. 2022]. Для хвостов Хибинских месторождений характерно

накопление нефелина (45-55%), эгирина (16-23%), КПШ (6-8%) с подчиненным количеством апатита, титанита, магнетита и ильменита.

Скорость разрушения минералов в таком типе сильно отличается. Нефелин и КПШ наиболее подвержены разрушению с образованием цеолитов и слоистых алюмосиликатов [Schumann, 1993], по магнетиту очень быстро формируется лимонит, а апатит и лопарит — устойчивые минералы, которые будут достаточно долго сохраняться от выветривания.

*Карбонатно-силикатные.* Объединенная группа, куда относятся все хвосты, минеральная ассоциация которых представлена резко доминирующими силикатными или силикатно-карбонатными минералами над всеми другими. Наиболее яркий пример — хвосты переработки скарновых руд. В хвостах Тырнаузского месторождения накапливаются полевые шпаты (30-45%), слюды (10-15%), кальцит (3-7%), гранаты и пироксены (5-10%) при незначительном содержании сульфидов (до 3%) и еще меньшем содержании шеелита (до 0,3%) [Евдокимов, Евдокимов, 2014]. Стоит отметить, что для такой минеральной ассоциации характерно последующее гравитационное перераспределение минералов в пределах тела хвостов. Шеелит, будучи самым тяжелым минералом среди всех, претерпевает вертикальную миграцию и опускаясь вниз формирует зоны вторичного обогащения [Бортников и др., 2014].

Определенную сложность составляет классификация хвостов таких комплексных месторождений полезных ископаемых как Ковдорское (Мурманская область), т.к. по минеральному составу они могут быть отнесены в разные группы. Например, в хвостах Ковдорского месторождения накоплено существенное количество как оксидных минералов (магнетит, гематит), так и кальцита, нефелина, апатита и флогопита с подчиненным количеством бадделеита.

*Шлаковые отходы* — это отдельная большая группа техногенных образований, получаемая в результате металлургического производства или сжигания энергетических ресурсов. Минералогический и химический состав шлаков совершенно отличен как от природных горных пород, так и от отходов недропользования, получаемых при отработке месторождений твердых полезных ископаемых. В рамках данной работы шлаковые отвалы рассматриваются как отдельный класс техногенных образований. Их детальная типизация по вещественному составу представляет собой самостоятельную сложную задачу и требует отдельного исследования. В качестве примера для демонстрации особенностей минералогического состава таких отложений приводится подгруппа золошлаков, которая формируется в результате сжигания угля на энергетических предприятиях. Для золошлаков характерно наличие минеральных фаз, не встречаемых в природе: мета- и ортосиликаты кальция, алюминаты, ферриты, алюмоферриты, частично или полностью дегидратированные

формы глинистых минералов, а также муллит. В значительных количествах содержатся различные модификации оксида кремния, гидроксиды кальция (портландит) и магнезия [Бембеев, Самсонов, 2024].

#### **Особенности пространственного размещения полезных ископаемых техногенных образований.**

Техногенные образования не возникают изолированно. Как показано выше, состав и распределение в них полезных ископаемых напрямую зависят от геологических особенностей исходных коренных месторождений. Например, хвосты обогащения медно-колчеданных руд Южного Урала сохраняют характерные для этого региона элементы (Cu, Zn, Pb, Au, S), а отвалы апатит-нефелиновых месторождений Кольского полуострова концентрируют редкоземельные металлы и фосфор. Это означает, что техногенные отложения наследуют металлогеническую специализацию территорий, становясь своего рода отражением первичных рудных систем. Но при этом приобретают новые черты за счет технологического передела, например, в отвалах могут концентрироваться редкие и рассеянные элементы, которые не извлекались при первичной переработке.

Если традиционная металлогения выделяет провинции на основе геодинамических обстановок и магматических процессов [Старостин, 2021], то для техногенных месторождений ключевым критерием становится их приуроченность к горнопромышленным районам. Концентрация отвалов и хвостохранилищ вокруг крупных горнодобывающих центров, таких как Кольский полуостров, Южный Урал или Курская магнитная аномалия, создает четкие пространственные закономерности. Эти скопления можно рассматривать как экзогенно-техногенные металлогенические провинции твердых полезных ископаемых — территории, где антропогенная деятельность привела к возможности формирования вторичных месторождений с характерными ассоциациями элементов.

При этом важно учитывать, что техногенные провинции не дублируют природные, а дополняют их за счет перераспределения вещества. Например, в хвостах могут накапливаться элементы, которые ранее не имели промышленного значения: так, отвалы железорудных месторождений КМА содержат высокие концентрации ванадия [Золототрубов, 2007]. Это открывает возможность для выделения новых типов оруденения, характерных исключительно для техногенных систем.

С учетом современного состояния изученности полезных ископаемых техногенных образований России полноценное выделение провинций для всей территории страны весьма трудоемко и требует большого количества дополнительных геологических и технологических исследований. Но на вышеописанных примерах отходов добычи и переработки минерального сырья можно продемонстрировать принцип выделения экзогенно-техногенных металлогенических провинций.

1. *Кольская редкометалльно-фосфорная провинция*, связанная с переработкой щелочных пород и карбонатитов. Характеризуется накоплением в техногенных образованиях редкоземельных элементов, ниобия, тантала и циркония. Здесь хвосты апатит-нефелинового и магнетитового обогащения, подвергаясь воздействию субарктического климата, формируют уникальные минеральные ассоциации с цеолитами и фторидными соединениями.

2. *Уральская полиметалльная провинция*, наследующая особенности колчеданных и порфириновых месторождений, характеризуется техногенными образованиями с высокими содержаниями меди, цинка и золота. Процессы окисления в условиях резко континентального климата приводят к образованию ярозит-мелантеритовых ассоциаций и вторичных минералов меди, создавая комплексные месторождения, содержащие также селен и теллур. На данный момент является самой изученной техногенной провинцией России [Джалалова и др., 2003; Вильямсон, 2003; Макаров и др., 2022].

3. *Курская железорудная провинция*, связанная с переработкой докембрийских железистых кварцитов железисто-кремнисто-сланцевой формации, выделяется как крупнейший в мире техногенный железорудный район. Основными рудными минералами железисто-кремнистых пород являются магнетит и гематит; кроме того, в них установлено наличие благороднометалльной минерализации [Чернышов, 2003; Старостин, 2007; Удачин, 2005]. Золото в рудах весьма мелкое и распределено крайне неравномерно. Однако колоссальный объем добычи и переработки железистых кварцитов способствует накоплению в отвальных хвостах значимых количеств как недоизвлеченного железа, так и золота и ванадия. Гипергенные процессы в условиях умеренного климата формируют здесь характерные охристые корки из гидроксидов железа.

В контексте настоящего исследования в современных условиях необходимо также учитывать разрыв первичных геолого-географических связей. Глобальные цепочки поставок сырья приводят к тому, что на обогащательных и металлургических предприятиях может перерабатываться руда из различных, часто удаленных месторождений. Для регионов с развитыми экономическими связями, где на местных предприятиях прорабатывается материал удаленных месторождений справедливо выделять новый тип экзогенно-техногенных металлогенических провинций — технологически-специализированных. Их состав определяется не столько локальной геологией, сколько технологическим профилем предприятия и геохимическими особенностями руд, поступающих из разных источников.

Таким образом, техногенные провинции представляют собой динамичные системы, отражающие как исторически сложившуюся геологическую специфику региона, так и современную глобальную экономику минерального сырья.

Вышеизложенные выводы убедительно демонстрируют, что полезные ископаемые техногенных образований являются значимым компонентом геологической среды, требующим глубокого системного изучения. Однако для формирования целостной картины и перехода от разрозненных исследований к прогнозированию эволюции и эффективному освоению техногенных месторождений необходима постановка широкого комплекса работ. Этот комплекс должен включать не только дальнейшее расширение географии исследований для накопления базы данных химического и минералогического анализов, но и разработку специальных методов картирования, а также создание детальных геолого-экономических моделей. Только такой интегрированный подход, реализуемый в рамках формирующегося направления антропогенного литогенеза, позволит полностью раскрыть ресурсный потенциал техногенных образований и минимизировать их негативное воздействие на окружающую среду.

**Заключение.** Техногенные образования представляют собой не просто инертные накопления вещества, а динамичные геологические системы, формирующие принципиально новый класс поверхностных геологических формаций. Их ключевой особенностью является аномально высокая, по сравнению с природными аналогами, скорость преобразований, обусловленная искусственным минеральным составом, нарушенной структурой, дисперсностью и отсутствием естественных буферных механизмов. Это требует применения к их изучению комплексного литологического подхода, включающего анализ стадийности выветривания, фациально-литологического анализ и картирование морфологии зон изменения. Развитие такого подхода является основой для формирования нового раздела геологии — антропогенного литогенеза.

Состав и пространственное распределение полезных ископаемых техногенных образований яв-

ляется прямым следствием геолого-генетических особенностей исходных коренных месторождений. На основе минералого-геохимического анализа выделены устойчивые типы хвостов обогащения (сульфидные, оксидные, щелочно-редкометалльные и др.), каждый из которых наследует и специфически трансформирует элементные ассоциации первичных рудных систем. Это позволило обосновать принцип экзогенно-техногенной металлогении, в рамках которого скопления полезных ископаемых техногенных образований рассматриваются как специализированные металлогенетические провинции (на примере Кольской, Уральской и Курской). Данные провинции не просто дублируют природные, но и дополняют их за счет технологического перераспределения вещества, концентрируя элементы, не извлекавшиеся ранее, и формируя тем самым новые типы оруденения.

Перспективы дальнейших исследований должны заключаться в системном и целевом анализе накопленных данных с получением новой информации о техногенных образованиях слабоизученных регионов. Ключевыми направлениями являются:

1. Разработка единых методических подходов к паспортизации и кадастрированию техногенных объектов на основе предложенной классификации, что позволит систематизировать существующие массивы данных горнодобывающих компаний и надзорных органов для целей металлогенетического анализа;

2. Целевое применение современных геоинформационных и минералого-геохимических методов (ДЗЗ, микрозондовый анализ, LA-ICP-MS, LIBS и др.) для детального изучения форм нахождения ценных и токсичных элементов в эталонных объектах, моделирования их эволюции, прогнозирования накопления и перераспределения компонентов в техногенных образованиях, с целью определения стратегии их извлечения и нейтрализации негативного экологического воздействия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Амосов П.В., Бакланов А.А., Горячев А.А. и др. Пыление хвостов обогащения апатит-нефелиновых руд: экологическая проблема и пути ее решения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2023. 168 с.

Ангелов В.А., Ангелова Е.И., Аверьянов К.А. Изучение особенностей вещественного состава хвостов обогащения медно-колчеданных руд учалинской обогатительной фабрики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2012. № 5. С. 362–368.

Архипов А.В., Решетняк С.П. Техногенные месторождения. Разработка и формирование. Апатиты: КНЦ РАН, 2017. 175 с.

Бембеев Д.Б., Самсонов А.А. Геохимическая характеристика золошлаков из углей Мугунского месторождения (Иркутская область) // Недропользование XXI век. 2024. № 2 (103). С. 28–35.

Бодуэн А.Я., Петров Г.В., Мардарь И.И. и др. Извлечение благородных и цветных металлов из техногенного сырья Норильского промышленного региона: практика

и исследования // Успехи современного естествознания. 2013. № 3. С. 143–145.

Бортников Н.С., Богатилов О.А., Карамурзов Б.С. и др. Утилизация хранилищ промышленных отходов обогатительной фабрики Тырныаузского вольфрамowo-молибденового комбината — одно из необходимых мероприятий для решения экологических проблем в приэльбрусье (Кабардино-Балкарская республика) // Вестник ВНИЦ. 2014. № 1. С. 35–41.

Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Гео, 2006. 169 с.

Вильямсон Б., Удачин В.Н., Спири Б. и др. Процессы изменения состава поверхностных вод при техногенезе в Учалинском горнодобывающем районе // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Т. 2. Уфа, 2003. С. 187–194.

Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Круподеров В.С. и др. Гидромеханический мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях // Горный

информационно-аналитический бюллетень. 2012. № S1. С. 44–58.

Джалалова Г.Т. Кислотно-основные свойства почв в районе деятельности Учалинского горно-обогатительного комбината (УГОКа) // Геология, полезные ископаемые и проблемы экологии Башкортостана. Т. 2. Уфа, 2003. С. 203–206.

Евдокимов С.И., Евдокимов В.С. Извлечение металлов из лежалых хвостов вольфрамо-молибденовой обогатительной фабрики // Вестник ВНИЦ. 2014. № 2. С. 46–52.

Золототрубов Е.Б. Геоэкологическая оценка территории Михайловского промышленного района: Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Воронеж: ВГУ, 2007. 23 с.

Касимов Н.С., Перельман А.И. Геохимия ландшафтов. М.: Изд-во МГУ, 1999. 610 с.

Косинова И.И. Экологическая геология Курской магнитной аномалии. Воронеж: Изд-во Воронежского государственного университета, 2009. 216 с.

Макаров А.Б., Талалай А.Г., Гуман О.М. и др. Техногенные месторождения и особенности их воздействия на окружающую среду // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2022. № 3. С. 120–129.

Максимова В.В., Красавцева Е.А., Савченко Е.Э. и др. Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 542–650.

Овчинников Л.Н. Металлогенетические провинции России. М.: ИМГРЭ, 2001. 172 с.

Разумова В.Н., Херасков Н.П., Черняховский А.Г. Геологические типы кор выветривания и примеры их распространения на Южном Урале // Труды Геологического института Т. 57. Под ред. А.В. Пейве. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 139 с.

Самсонов А.А., Бурмистров А.А., Тельнов А.Е. Минерально-сырьевой потенциал и комплексное использование природных и техногенных месторождений вольфрама Джидинского рудного поля (г. Закаменск, Республика Бурятия) // Руды и металлы. 2024. № 1. С. 17–35.

Старостин В.И. Металлогения: учебник. М.: МАКСПресс, 2021. 652 с.

Старостин В.И., Пельмский Г.А., Сакия Д.Р. Золотосодержащие железистых кварцитов Восточно-Европейской платформы // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2007. № 2. С. 3–14.

Старостин В.И., Самсонов А.А. Минеральные ресурсы и цивилизация. 3-е изд., переработ. и доп. М.: МАКСПресс, 2023. 288 с.

Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 212 с.

Трофимов В.Т. Инженерная геология: Учебник. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2023. 573 с.

Трофимов В.Т., Королёв В.А., Герасимова А.С. Классификация техногенных воздействий на геологическую среду // Геоэкология. 1995. № 5. С. 96–107.

Удачин В.Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: Автореф. дисс. ... докт. г.-м. н. Миасс: ФГБУН ИМ СО РАН, 2012. 44 с.

Удачин В.Н., Вильямсон Б.Д. Геотехнические системы Южноуральского субрегиона биосферы // Проблемы горных территорий. Алматы, 2005. С. 38–42.

Фролов В.Т. Процесс континентального литогенеза. М.: Наука, 212 с.

Чернышов Н.М., Петров С.В., Молотков С.П. Особенности распределения и формы нахождения благородных металлов в железистых кварцитах Михайловского месторождения КМА и их техногенных продуктах (Центральная Россия) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2003. № 1. С. 93–104.

Чуриков Ю.А., Самсонов А.А., Ишмухаметова В.Т. Использование данных дистанционного зондирования земли для анализа экологической нагрузки и рудного потенциала техногенных отвалов Ковдорского ГОКа // Недропользование XXI век. № 3-4. 2023. С. 52–63.

Шадрунова И.В., Малашита А.В., Павлова В.И. и др. Комплексная физико-химическая технология переработки хвостов обогащения медно-цинковых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 12. С. 188–197.

Шерстюк Н.П. Активизация гипергенных процессов в водных объектах районов добычи полезных ископаемых (на примере Криворожского железорудного бассейна) // Изв. высших учебных заведений. Поволжский регион. 2014. № 2(6). С. 108–118.

Юркевич Н.В., Шавекина Н.В., Гаськова О.Л. и др. Аутигенные барит в техногенных отвалах: минералогическая геохимические данные и результаты физико-химического моделирования // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 1. С. 38–51.

Acharya B.S., Kharel G. Acid mine drainage from coal mining in the United States — An overview // Journal of Hydrology. 2020. Vol. 588. P. 125061.

Dold B. Acid rock drainage prediction: A critical review // Journal of Geochemical Exploration. 2016. Vol. 172. P. 120–132.

Dold B. Evolution of Acid Mine Drainage Formation in Sulphidic Mine Tailings // Minerals. 2014. Vol. 4. P. 621–641.

Donald R.J., Chermak J.A., Gagen P.M. Rates of Reaction of Galena, Sphalerite, Chalcopyrite, and Arsenopyrite with Fe(III) in Acidic Solutions / Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation ed. Alpers C.N., Blowes D.W. 1993. P. 3–13.

Ford J.R., Price S.J., Cooper A.H. An assessment of lithostratigraphy for anthropogenic deposits // Geological Society. 2014. Vol. 395. P. 55–89.

Jambor J.L. Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products // Environmental Geochemistry of Sulfide Mine-Wastes. 1994. Vol. 22. P. 59–102.

Jamieson H.E., Walker S.R., Parsons M.B. Mineralogical characterization of mine waste // Applied Geochemistry. 2015. Vol. (57). P. 85–105.

Lottermoser B.G. Environmental Indicators in Metal Mining. 2nd ed. Berlin: Springer, 2022. 518 p.

Lottermoser B.G. Mine Wastes. Berlin: Springer, 2010. 400 p.

Nordstrom D.K., Alpers N.C., Ptacek C.J., et al. Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California // Environmental Science & Technology. 1999. Vol. 34 (2) P. 254–258.

Plumlee G.S. The Environmental Geology of Mineral Deposits // Economic Geology. 2023. Vol. 118 (3). P. 523–525.

Schumann A. Changes in mineralogy and geochemistry of a nepheline syenite with increasing bauxitization, Poços de Caldas, Brazil // Chemical geology. 1993. Vol. 107. № 3–4. P. 327–331.

Статья поступила в редакцию 05.11.2025, одобрена после рецензирования 12.11.2025, принята к публикации 27.02.2026

## 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. КОЩУГ** — 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:* vtmu\_red@mail.ru

*Журнал зарегистрирован в Министерстве печати и информации РФ.*

*Свидетельство о регистрации № 1552 от 14 февраля 1991 г.*

Подписано в печать 27.02.2026. Формат 60 × 90<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Бумага офсетная. Гарнитура Minion Pro.

Усл. печ. л. 19,0. Уч.-изд. л. 13,2. Тираж экз.

Изд. № 13357. 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



Все материалы журнала опубликованы на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License



All the published materials are licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

**ISSN 0201-7385**  
**ISSN 0579-9406**

ИНДЕКС 70995 (каталог «Роспечать»)  
ИНДЕКС 34114 (каталог «Пресса России»)