



Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Сентябрь
September
2025,
№ 9 (369)

Журнал издается под научно-методическим руководством Отделения наук о Земле РАН
The journal is published under the research and methodological guidance of the RAS Department of Earth Sciences

Главный редактор А. М. Асхабов

Зам. главного редактора И. Н. Бурцев

Зам. главного редактора О. Б. Котова

Ответственный секретарь И. В. Козырева

Chief Editor A. M. Askhabov

Deputy Chief Editor I. N. Burtsev

Deputy Chief Editor O. B. Kotova

Executive Secretary I. V. Kozyreva

Редакционный совет

Л. Н. Андреичева, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Санкт-Петербург, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
В. А. Жемчугова, Москва, Россия
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
Д. А. Зедгенизов, Екатеринбург, Россия
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, Россия
Н. А. Малышев, Москва, Россия
М. Мартинс, Ору-Прету, Бразилия
Т. П. Майорова, Сыктывкар, Россия
П. Мянник, Таллин, Эстония
А. И. Николаев, Апатиты, Россия
Б. М. Осовецкий, Пермь, Россия
Ю. Ф. Патраков, Кемерово, Россия
И. В. Пеков, Москва, Россия
Д. В. Пономарев, Сыктывкар, Россия
Д. Ю. Пуцаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сун, Мянъян, Китай
К. М. Соджа, Гамильтон, Нью-Йорк, США
О. В. Удоратина, Сыктывкар, Россия
М. А. Федонкин, Москва, Россия
А. Г. Шеломенцев, Екатеринбург, Россия

Технический редактор Г. Н. Каблис

Заведующий редакцией Т. А. Некучаева

Editorial Board

L. N. Andreicheva, Syktyvkar, Russia
A. I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
T. M. Beznosova, Syktyvkar, Russia
M. A. Bogdasarov, Brest, Belarus
M. A. T. M. Broeckmans, Trondheim, Norway
D. A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yu. L. Voytekhevsky, St. Petersburg, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
D. A. Zedgenizov, Yekaterinburg, Russia
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, Russia
N. A. Malyshev, Moscow, Russia
M. Martins, Ouro Preto, Brazil
T. P. Mayorova, Syktyvkar, Russia
P. Männik, Tallinn, Estonia
A. I. Nikolaev, Apatity, Russia
B. V. Osovetsky, Perm, Russia
Yu. F. Patrakov, Kemerovo, Russia
I. V. Pekov, Moscow, Russia
D. V. Ponomarev, Syktyvkar, Russia
D. Yu. Pushcharovsky, Moscow, Russia
A. M. Pystin, Syktyvkar, Russia
Sh. Sun, Mianyang, China
C. M. Soja, Hamilton, NY, USA
O. V. Udoratina, Syktyvkar, Russia
M. A. Fedonkin, Moscow, Russia
A. G. Shelomentsev, Yekaterinburg, Russia

Technical Editor G. N. Kablis

Managing Editor T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Выходит ежемесячно. Основан в 1995 году
академиком Н. П. Юшкиным.

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2024) – 0.462



geo.komisc.ru/vestnik

SCIENTIFIC JOURNAL

Monthly issued. Founded in 1995
by Academician N. P. Yushkin.

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI
impact factor (2024) – 0.462

Содержание	Content
Научные статьи	Scientific articles
Изменение кинетических характеристик органического вещества доманика при его термической эволюции <i>Д. А. Бушнев, Р. С. Кашапов, Н. С. Бурдельная, П. В. Трушков</i> 3	Changes in the kinetic characteristics of domanik organic matter during its thermal evolution <i>D. A. Bushnev, R. S. Kashapov, N. S. Burdelnaya, P. V. Trushkov</i> 3
Уточнённая модель фильтрационно-ёмкостных свойств карбонатных коллекторов нефтяного месторождения в пределах северного окончания вала Сорокина (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция) <i>М. Е. Шабурова</i> 8	Updated model of carbonate reservoirs permeability and porosity of the oil field within the northern end of the Sorokin Swell (Timan-Pechora oil and gas province) <i>M. E. Shaburova</i> 8
Микроструктурные особенности нижнепермских ооидных известняков (Южный Тиман) <i>О. С. Ветошкина</i> 19	Microstructural features of Lower Permian ooid limestones (South Timan) <i>O. S. Vetoshkina</i> 19
Результаты анализа современных данных геоэкологического мониторинга заброшенного Тырныаузского хвостохранилища <i>А. Х. Шерхов</i> 28	Results of analysis of modern geoecological monitoring data of the abandoned Tyrnauz tailings facility <i>A. Kh. Sherkhov</i> 28
Из опыта преподавания. XVIII. Таблица 27 видов симметрии <i>Ю. Л. Войтеховский</i> 36	From teaching experience. XVIII. Table of 27 symmetry species <i>Yu. L. Voytekhovsky</i> 36
Хроника, события, факты	Chronicle, events, facts
Юшкинские чтения — 2026 (анонс) 44	Yushkin Readings — 2026 (annonce) 44

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



Изменение кинетических характеристик органического вещества доманика при его термической эволюции

Д. А. Бушнев¹, Р. С. Кашапов², Н. С. Бурдельная¹, П. В. Трушков²

¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

boushnev@geo.komisc.ru

²ООО «РН-Проектирование Добыча», Томск, Россия

Исследованы кинетические характеристики образования углеводородов органическим веществом доманиковых пород природной серии, отличающихся уровнем термической зрелости, и пород после серии автоклавных экспериментов при различных температурах. В работе применён способ расчёта реализации углеводородного потенциала для серии экспериментов, учитывающий предшествующую термическую историю органического вещества. Показано, что расчёт реализации углеводородного потенциала на основании кинетической характеристики незрелой породы для высоких стадий преобразования ОВ доманика некорректен начиная с некоторого уровня термической зрелости, что определяется изменениями в химической структуре керогена после генерации нефти. Приведённые в работе данные указывают на уровень такого скачка свойств 50 % степени трансформации органического вещества породы.

Ключевые слова: доманиковый сланец, автоклав, эксперимент, кинетика нефтеобразования, кинетическая характеристика

Changes in the kinetic characteristics of domanik organic matter during its thermal evolution

D. A. Bushnev¹, R. S. Kashapov², N. S. Burdelnaya¹, P. V. Trushkov²

¹IG FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

²RN-Proektirovanie Dobycha, Tomsk, Russia

The kinetic characteristics of hydrocarbon formation by organic matter of natural series domanik rocks with different levels of maturation and domanik rocks after a series of autoclave experiments at different temperatures are studied. The work uses a method for calculating the realization of hydrocarbon potential for a series of rocks that takes into account the previous thermal history of organic matter. It is shown that the calculation of the realization of hydrocarbon potential based on the kinetic characteristics of immature rock for high stages of domanik organic matter transformation is incorrect starting from a certain level of thermal maturity, which is determined by changes in the chemical structure of kerogen due to oil generation. The data presented in this work indicates this change level a 50 % degree of transformation of the organic matter of the source rock.

Keywords: Domanik shale, autoclave, experiment, kinetics of oil formation, kinetics of thermal treatment of organic matter, kinetic characteristics

Введение

Оценка условий реализации углеводородного потенциала в условиях термического созревания органического вещества (ОВ) нефтегазоматеринских пород — необходимая часть бассейнового моделирования (Галушкин, 2007; Бурштейн и др., 2024, Спасенных и др., 2024). Основа всех построений — это уравнения химической кинетики. Первичные данные о кинетических характеристиках могут быть получены в лаборатории методом пиролиза в различных экспериментальных вариантах. Например, пиролиз Rock-Eval — линейное повышение температуры в инертной атмосфере с различными скоростями (Espitalie et al., 1993; Behar, 2001). Это даёт возможность определить распределение углеводородного потенциала по шкале энер-

гий активации и оценить частотный фактор из уравнения Аррениуса (Москаленко, 2024). Пиролиз при нескольких температурах (в автоклаве либо пиролизёре хроматографа) или ступенчатый пиролиз также позволяют изучать кинетические характеристики образования индивидуальных углеводородов при заданном частотном факторе (Tang, Stauffer, 1994; Leushina et al., 2021; Бушнев и др., 2024, 2025). Обработка результатов опытов в автоклавах (в приближении единственной реакции первого порядка) даёт возможность определить энергию активации и частотный фактор образования вытесненной нефти (Lewan, 1985).

Изначально проблемной является экстраполяция кинетических характеристик, определённых в лаборатории для незрелого (имеющего максимальный угле-

Для цитирования: Бушнев Д. А., Кашапов Р. С., Бурдельная Н. С., Трушков П. В. Изменение кинетических характеристик органического вещества доманика при его термической эволюции // Вестник геонаук. 2025. 9(369). С. 3–7. DOI: 10.19110/geov.2025.9.1

For citation: Bushnev D. A., Kashapov R. S., Burdelnaya N. S., Trushkov P. V. Changes in the kinetic characteristics of domanik organic matter during its thermal evolution. Vestnik of Geosciences, 2025, 9(369), pp. 3–7, doi: 10.19110/geov.2025.9.1

водородный потенциал) органического вещества, на процесс нефтегазообразования в широком диапазоне градаций катагенеза без учёта внутренних изменений химического строения керогена и связанной с этим изменчивостью кинетических характеристик.

Целью настоящей работы является исследование кривых реализации углеводородного потенциала при расчётном моделировании на основе кинетических характеристик незрелого ОВ и кинетических характеристик последовательного ряда термически изменённого ОВ — природной серии доманиковых пород, а также серии искусственно термически преобразованных пород доманиковой высокоуглеродистой формации. Данные по последним были получены при выполнении работ по гранту РНФ 23-27-00139 (2023–2024).

Методика работ

Исследования проводились на материале пород верхнедевонского возраста Тимано-Печорского осадочного бассейна, отобранных из обнажений и представленных керном скважин. Детальная характеристика образцов дана в работе (Бушнев и др., 2019). Эксперименты по гидротермальному воздействию проводились с доманиковым сланцем, отобранным из обнажения по р. Чуть (устье), подробное описание которых представлено в работе (Бушнев и др., 2024).

Определение кинетических параметров органического вещества нефтематеринской породы основано на данных, получаемых в процессе пиролиза в открытой системе при разных скоростях нагрева. В работе использовались пять (5, 10, 15, 20, 25 °C/мин) скоростей нагрева (Espitalie, Marquis, Drouet, 1993; Кашапов и др., 2019). Комбинация полученных кривых S2 позволяет выполнить расчет кинетических параметров ОВ.

Обработка результатов и расчет кинетических параметров произведены с использованием программного комплекса OptKin фирмы VeicpFranlab. В основе программы лежит кинетическая модель Тиссо и Эспиталье, по которой термическая деструкция ОВ описывается серией параллельных реакций первого порядка по закону Аррениуса.

Целью автоматического компьютерного моделирования является определение минимального значения (Err Function) в расхождении между экспериментальными данными и расчетными. Результатом моделирования является гистограмма распределения долей общего водородного индекса (HI_i) по энергиям активации (E_a), где также указана величина частотного фактора (A) (рис. 1). Шаг распределения составляет 1 ккал/моль.

Дополнительно для обеспечения возможности сравнения реализации генерационного потенциала образцов в идентичных условиях расчета кинетических параметров их определение выполнялось при фиксированном частотном факторе, равном $1 \times 10^{14} \text{ c}^{-1}$ (Waples, Nowaczewski, 2013; Waples, 2016).

Реализация углеводородного потенциала органического вещества доманиковой породы рассчитывалась с учетом уравнений химической кинетики.

Скорость реакции первого порядка:

$$-dC / dt = kC, \quad (1)$$

где C — концентрация реагента, t — время, k — константа скорости химической реакции.

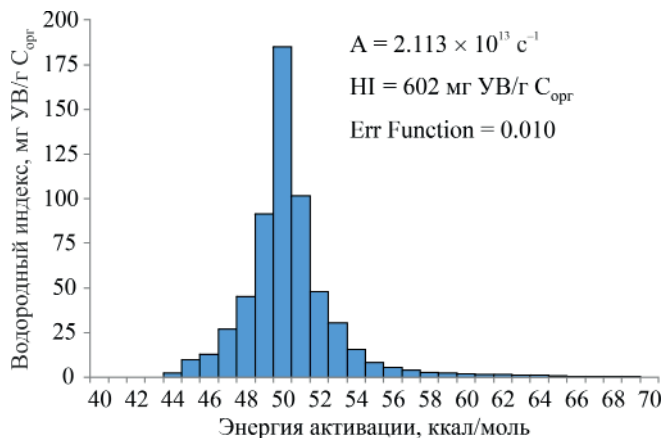


Рис. 1. Гистограмма распределения HI по E_a исходного для автоклавного эксперимента образца доманикового сланца обнажения Чуть-Устье. Получено при выполнении работ по гранту РНФ 23-27-00139 (2023–2024)

Fig. 1. Histogram of the HI distribution by E_a for the initial sample of Chut-Ustye Domanik shale used in the autoclave experiment. Obtained under Russian Science Foundation grant 23-27-00139 (2023–2024)

Уравнение Аррениуса:

$$k = A_{exp}(-E_a / RT), \quad (2)$$

где A — предэкспоненциальный множитель или частный фактор, E_a — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, T — абсолютная температура.

Расчёт выхода суммы углеводородов в модели композиционной кинетики численным методом в неизотермическом режиме:

$$V(T_j) = \sum_{i=1}^n a_i \left(V_0 - \sum_{j=1}^{j-1} V(T_j, t) \right) \times \left(1 - \exp \left(-A_{exp} \left(\frac{-E_i}{RT_j} \right) \Delta t \right) \right), \quad (3)$$

где a_i — доля генерационного потенциала углеводородов, приходящаяся на псевдокомпонент с энергией активации E_i, V₀ — максимально возможный выход суммы углеводородов (100 %), j — номер шага дискретности, Δt — шаг дискретности времени прогрева.

Результаты и их обсуждение

Расчёт реализации углеводородного потенциала для ряда термически изменённых пород выполнялся при допущении, что исследованные породы относятся к совокупности, образцы которой отличаются друг от друга только мерой предшествующей реализации углеводородного потенциала и соответствующей перестройки химической структуры остаточного керогена. То есть в уравнении (3) для каждого последующего образца (имеющего меньшее значение HI и более высокое значение T_{max} по данным пиролиза Рок-Эвал) в качестве начальной температуры принималась та, при которой предыдущий образец генерировал столько углеводородов, сколько составляет разница между ним и первым (наименее преобразованным) образцом в выборке.

В случае серии проб доманикового сланца, обработанных в автоклаве при различных температурах, такое предположение полностью корректно, так как каждый последующий элемент выборки отличается



от предыдущего только стадией термического преобразования при идентичном исходном составе. Для доманиковых пород из различных локаций наше допущение требует принадлежности выборки единому тренду трансформации органического вещества в катагенезе (рис. 2).

Для примера рассмотрим расчёт генерации углеводородов, согласно кинетической характеристике образца доманикового сланца после гидротермального воздействия в автоклаве при 325 °C (24 часа). Значение водородного индекса (НИ) образца (325 °C/24 часа) равно 295 мг УВ/г ТОС, а значение НИ непреобразованного доманикового сланца составляет 602 мг УВ/г ТОС. Это означает, что гидротермальная обработка доманикового сланца в автоклаве (325 °C/24 часа) привела к снижению НИ с 602 до 295 мг УВ/г ТОС. Соответственно,

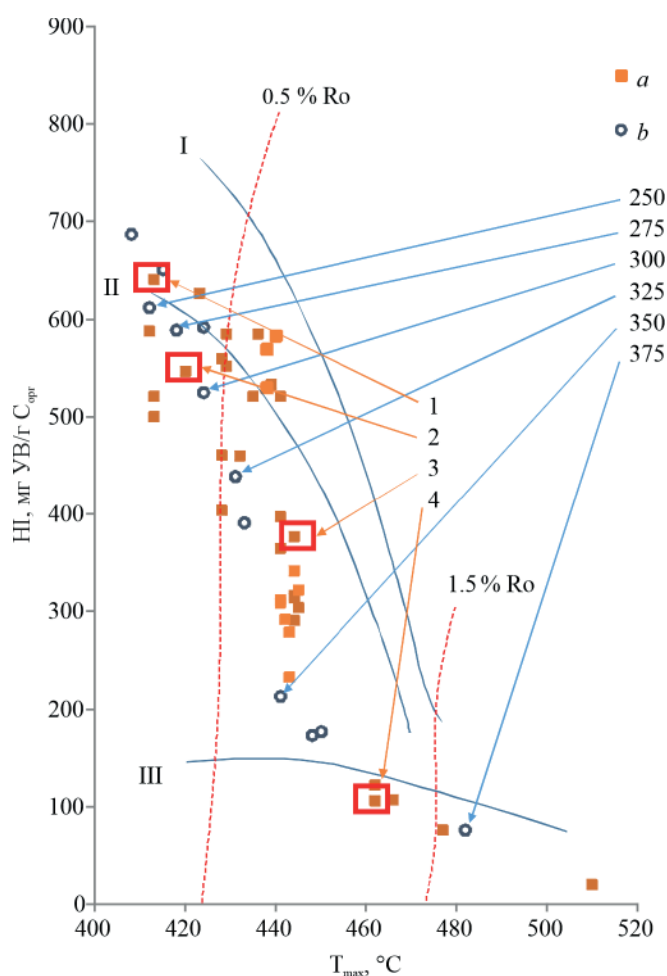


Рис. 2. Сопоставление природного созревания ОВ доманиковых отложений (а) и результатов автоклавных опытов (b) по данным пиролиза Rock-Eval (Бушнев и др., 2024). 250–375 °C — температуры гидротермальных экспериментов продолжительностью 24 часа. 1–4 — образцы: 1 — Чуть-Устье (обнажение), 2 — Шарью-38/39 (обнажение), 3 — 250-Восточно-Возейской скважины (кern), 4 — скважины 12-Командиршор (кern)

Fig. 2. Comparison of maturation of organic matter from Domanik rocks (a) and the results of autoclave experiments (b) based on Rock-Eval pyrolysis data (Bushnev et al., 2024). 250–375 °C are temperatures of 24-hour hydrothermal experiments. 1–4 are samples: 1 — Chut-Ustye (outcrop), 2 — Sharyu-38/39 (outcrop), 3 — 250-Vostochno-Vozeyiskaya well (core), 4 — 12-Komandirshor well (core)

чтобы получить кривую генерации углеводородов остаточным ОВ таким образом обработанного сланца, мы должны принять в качестве начального значения НИ разницу между 602 и 295 мг УВ/г ТОС (307), а начальную температуру его преобразования для расчёта взять такую, при которой предшествующий в рассматриваемой выборке образец сгенерирует 307 мг УВ/г ТОС. Такая температура составляет в наших расчётах 125.2 °C (рис. 3) или 134.2 °C (рис. 4) и так далее.

На рис. 3 и 4 приведены расчётные кривые генерации УВ по серии изменённых при гидротермальном воздействии образцов доманикового сланца. Расчёты выполнены для кинетических спектров с нефиксированным (рис. 3) и фиксированным частотным фактором (рис. 4). Из рисунков 3 и 4 следует, что и в случае использования «плавающего», то есть рассчитанного

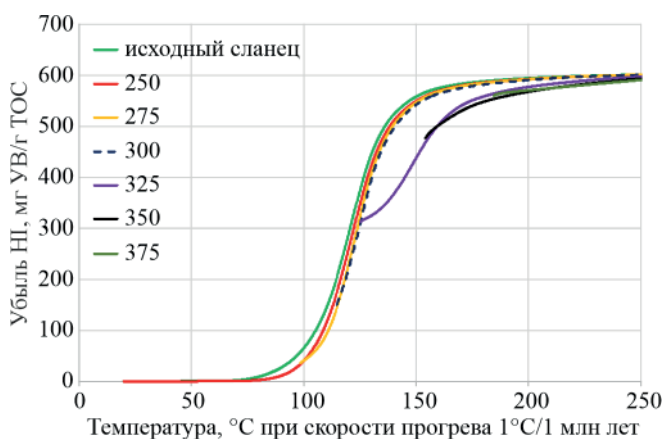


Рис. 3. Кривые реализации углеводородного потенциала органическим веществом доманикового сланца, изменённого в автоклавном эксперименте. 250–375 °C — температуры суточных автоклавных опытов. Нефиксированный частотный фактор

Fig. 3. Hydrocarbon potential realization curves for organic matter in Domanik shale altered in an autoclave experiment. 250–375 °C — temperatures of daily autoclave experiments. Unfixed frequency factor

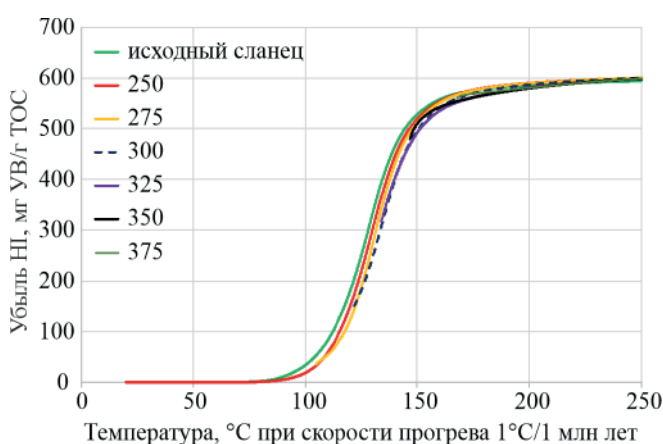


Рис. 4. Кривые реализации углеводородного потенциала органическим веществом доманикового сланца, изменённого в автоклавном эксперименте. 250–375 °C — температуры суточных автоклавных опытов. Фиксированный частотный фактор $1 \times 10^{14} \text{ c}^{-1}$

Fig. 4. Hydrocarbon potential realization curves for organic matter in Domanik shale altered in an autoclave experiment. 250–375 °C are the temperatures of the daily autoclave experiments. The fixed frequency factor is $1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$

индивидуально для каждого образца частотного фактора и для предустановленного значения A наблюдается сдвиг температуры реализации углеводородного потенциала вправо. При «плавающем» A отмечается скачкообразное изменение хода генерационной кривой при переходе от кинетики образца 300/24 часа к образцу 325/24 часа.

Коллекция пород доманиковых высокоуглеродистых отложений Тимано-Печорского осадочного бассейна, представляющих естественную совокупность, в нашем случае невелика. На рис. 5 и 6 приведены рассчитанные описанным выше образом генерационные кривые, построенные по кинетическим данным для четырех образцов. Нетрудно заметить, что ход всех кривых имеет общий облик (рис. 3–6).

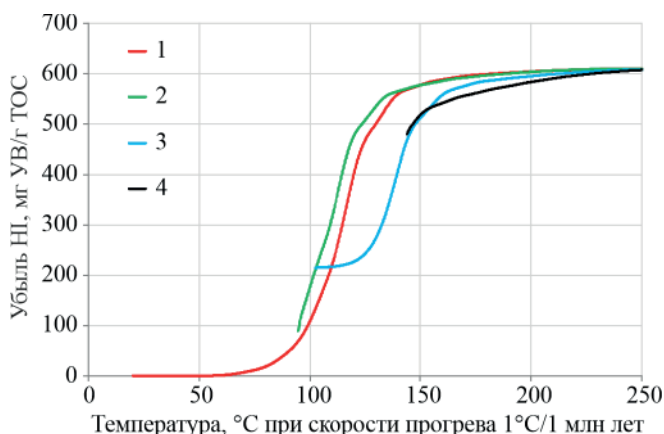


Рис. 5. Кривые реализации углеводородного потенциала органическим веществом доманиковых пород Тимано-Печорского бассейна, природная катагенетическая серия. Нефиксированный частотный фактор. 1–4 — образцы (см. рис. 2)

Fig. 5. Hydrocarbon potential realization curves for organic matter in Domanik rocks of the Timan-Pechora Basin, natural maturation series. Unfixed frequency factor. Samples 1–4, (see Fig. 2)

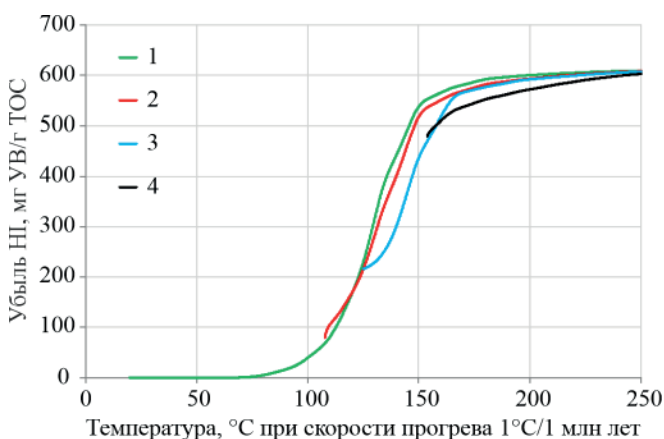


Рис. 6. Кривые реализации углеводородного потенциала органическим веществом доманиковых пород Тимано-Печорского бассейна, природная катагенетическая серия. Фиксированный частотный фактор $1 \times 10^{14} \text{ с}^{-1}$. 1–4 — образцы (см. рис. 2)

Fig. 6. Hydrocarbon potential realization curves for organic matter in Domanik rocks of the Timan-Pechora Basin, natural maturation series. Fixed frequency factor $1 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$. Samples 1–4 (see Fig. 2)

По мере реализации углеводородного потенциала кинетическая характеристика последующего (в наших экспериментах) образца происходит во всё более и более жестких условиях по сравнению с тем, как если бы продолжалась реализация углеводородного потенциала незрелого образца. Падение водородного индекса с 600 до 400 мг УВ/г $C_{\text{орг}}$ соответствует 50 % степени трансформации органического вещества породы (Espitalie et al., 1985). Поэтому важно указать, что до 50 % степени трансформации органического вещества кинетические характеристики более преобразованных образцов отличаются от кинетических характеристик менее преобразованных пород только тем, что в них снижена доля УВ-потенциала, отнесенного к меньшим значениям энергий активации. Наблюдаемое скачкообразное изменение кинетической характеристики (определенной с «плавающим» значением A), начиная с 50 % уровня зрелости, по нашим предположениям, связано с внутренней перестройкой структуры остаточного органического вещества, керогена. Нынешних данных недостаточно для высказывания уверенного суждения о соотношении этого скачка с общепринятыми градациями катагенеза. Также вероятно, что наблюдаемое скачкообразное изменение кинетических параметров начинается несколько раньше, но из-за небольшой выборки образцов природной серии более точно установить уровень трансформации не представляется возможным.

Закключение

Получены методом пиролиза Rock-Eval при различных скоростях линейного повышения температуры и исследованы кинетические характеристики органического вещества доманиковых отложений различных уровней термической зрелости: для природной серии пород и для искусственно прогретых в автоклаве «незрелых» доманиковых сланцев.

Для расчёта реализации углеводородного потенциала органическим веществом серии пород с различным уровнем термической зрелости применён способ расчёта, учитывающий предшествующую термическую историю органического вещества.

Расчёт реализации углеводородного потенциала органическим веществом доманиковых пород с учетом его кинетических характеристик, определенных на пиролизёре Rock-Eval, показал, что применение кинетических характеристик для незрелого органического вещества не даёт корректной оценки протекания процесса образования углеводородов породами на высоких стадиях термической зрелости.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600010-8).

Литература / References

- Бурштейн Л. М., Дешин А. А., Парфенова Т. М., Ярославцева Е. С., Козырев А. Н., Сафронов П. И. Кинетические характеристики керогенов Куонамского комплекса нижнего и среднего кембрия Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 1. С. 133–150.
- Burshtein L. M., Deshin A. A., Parfenova T. M., Yaroslavtseva E. S., Kozыrev A. N., Safronov P. I. Kinetic Characteristics of Kerogens in the Kuonamka Complex,



- Lower and Middle Cambrian of the Siberian Platform Available to Purchase. Russ. Geol. Geophys, 2024, V. 65, No. 1, pp. 111–125.
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Кинетика образования индивидуальных углеводородов C1–C5 при ступенчатом сухом пиролизе керогена доманикового сланца, подвергнутого гидротермальному воздействию // Вестник геонаук. 2024. № 9 (357). С. 3–11.
- Bushnev D. A., Burdelnaya N. S. Kinetics of formation of individual hydrocarbons C1–C5 during stepwise dry pyrolysis of kerogen of domanik shale subjected to hydrothermal influence. Vestnik of Geosciences, 2024, No. 9 (357), pp. 3–11 (in Russian)
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Ильченко А. А., Сенникова Я. Д., Кузьмин Д. В. Кинетика образования индивидуальных газообразных углеводородов состава C1–C5 при гидротермальном воздействии на доманиковый сланец // Геохимия. 2024. Т. 69. № 12. С. 104–110.
- Bushnev D. A., Burdelnaya N. S., Ilchenko A. A., Sennikova Ya. D., Kuzmin D. V. Kinetics of Individual C₁–C₅ Hydrocarbons Formation of Domanik Shale in Hydrothermal Experiments. Geochemical International, 2024, V. 62, pp. 1352–1357.
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Мокеев М. В. Результаты ¹³C ЯМР и ИК спектроскопии керогена верхнедевонских доманикитов Тимано-Печорского бассейна // Геохимия, 2019. Т. 64, № 11. С. 1146–1157.
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Mokeev M. V. Results of ¹³C NMR and FTIR Spectroscopy of Kerogen from the Upper Devonian Domanik of the Timan-Pechora Basin // Geochemistry International, 2019. Vol. 57, No. 11, pp. 1173–1184. DOI: 10.1134/S0016702919110028
- Галушкин Ю. И. Моделирование осадочных бассейнов и оценка их нефтегазоносности. М.: Научный мир, 2007. 456 с.
- Galushkin Yu. I. Modeling of sedimentary basins and assessment of their oil and gas potential. Moscow: Nauchnyy Mir, 2007, 456 p. (in Russian)
- Кашапов Р. С., Обласов Н. В., Гончаров И. В., Самойленко В. В., Гринько А. А., Трушков П. В., Фадеева С. В. Определение кинетических параметров пиролитической деструкции органического вещества нефтегазоматеринских пород // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2019. Т. 14. № 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2019/6_2019.html
- Kashapov R. S., Oblasov N. V., Goncharov I. V., Samoylenko V. V., Grinko A. A., Trushkov P. V., Fadeeva S. V. Determination of kinetic parameters of pyrolytic destruction of organic matter of oil and gas source rocks. Oil and Gas Geology. Theory and Practice, 2019, V. 14, No. 1. URL: http://www.ngtp.ru/rub/2019/6_2019.html (in Russian)
- Москаленко И. В. Некоторые вопросы кинетики термического разложения керогена // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2024. Т. 19. № 2. URL: https://www.ngtp.ru/rub/2024/14_2024.html EDN: TDLUAI
- Moskalenko I. V. Some issues of the kinetics of thermal decomposition of kerogen. Oil and Gas Geology. Theory and Practice, 2024, V. 19, No. 2. https://www.ngtp.ru/rub/2024/14_2024.html EDN: TDLUAI (in Russian)
- Спасенных М. Ю., Широкова В. В., Ильменский А. С., Козлова Е. В., Булатов Т. Д., Гончарова А. В., Леушина Е. А. Исследование кинетики термического преобразования органического вещества нефтегазоматеринских пород: обзор методов и экспериментальные результаты // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 4. С. 3–19.
- Spasennykh M., Shirokova V., Ilmenskii A., Kozlova E., Bulatov T., Goncharova A., Leushina E. Kinetics of Organic Matter thermal transformation in source rocks: Overview of Methods and Experimental results. Georesources, 2024, V. 26, No. 4, pp. 3–19. (in Russian)
- Behar F., Beaumont V., De B. Penteado H. L. Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments // Oil & Gas Science and Technology. Rev. IFP. 2001. V. 56. No. 2. P. 111–134.
- Espitalie J., Deroo G., Marquis F. La pyrolyse rock-eval et ses applications. Deuxieme partie // Revue de l'Institut Francais du Pétrole. 1985. V. 40. No. 6. P. 755–784.
- Espitalie J., Marquis F., Drouet S. Critical Study of Kinetic Modelling Parameters. Basin Modelling: Advances and Applications: Special Publication. (3) (A. G. Dore, J. H. Augustson, C. Hermanrud, D. J. Steward and O. Sylta, eds.). Elsevier, Amsterdam, Norwegian Petroleum Society, 1993. P. 233–242.
- Leushina E., Mikhaylova P., Kozlova E., Polyakov V., Morozov N., Spasennykh M. The effect of organic matter maturity on kinetics and product distribution during kerogen thermal decomposition: the Bazhenov Formation case study // J. Pet. Sci. Eng. 2021. V. 204, 108751.
- Lewan M. D. Evaluation of petroleum generation by hydrous pyrolysis experimentation. Philos. Trans. R. Soc., London, Ser. A., 1985. V. 315. P. 123–134.
- Tang Y., Stauffer M. Multiple cold trap pyrolysis gas chromatography: a new technique for modeling hydrocarbon generation // Org. Geochem. 1994. V. 22. P. 863–872.
- Waples D. W. Petroleum generation kinetics: Single versus multiple heating-ramp open-system pyrolysis: Discussion. AAPG Bulletin, 2016. 100(4), p. 683–689.
- Waples D. W., Nowaczewski V. S. Source-rock kinetics, 2013. <https://siriusdummy.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/10/waples-and-nowaczewski-2013.pdf>

Поступила в редакцию / Received 21.07.2025



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.8

DOI: 10.19110/geov.2025.9.2

Уточнённая модель фильтрационно-ёмкостных свойств карбонатных коллекторов нефтяного месторождения в пределах северного окончания вала Сорокина (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция)

М. Е. Шабурова

Группа компаний «Газпром нефть», Санкт-Петербург, Россия
maria_shaburova@mail.ru

В статье представлены результаты уточнения модели фильтрационно-ёмкостных свойств карбонатных коллекторов нефтяного месторождения Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции с учётом особенностей их формирования и вторичных изменений. Объектом проведённого исследования являются карбонатные коллекторы верхнего карбона – нижней перми. Полученная в результате модель отражает особенности пространственной локализации различных литологических типов пород-коллекторов, а также влияние трещиноватости на проницаемость коллекторов верхнего карбона. Актуальность обусловлена тем, что результаты моделирования послужили основой для выделения зон, перспективных с точки зрения поддержания уровня добычи на месторождении в отложениях продуктивного пласта верхнего карбона.

В ходе проведённого исследования классифицированы породы-коллекторы с использованием данных керна; установлены закономерности распространения различных литологических типов известняков по площади и по разрезу; определён преобладающий тип пустотности и характерный диапазон фильтрационно-ёмкостных свойств для каждого выделенного литологического типа. Кроме того, проведена классификация трещин с использованием данных керна и пластовых микроимиджеров, установлена связь плотности трещиноватости с объёмной плотностью пород и первичной пористостью, подтверждено положительное влияние парагенезисов трещин на проницаемость низкоёмких коллекторов.

Ключевые слова: карбонатные коллекторы, трещиноватость, классификация по Данхэму, строение пустотного пространства, Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция

Updated model of carbonate reservoirs permeability and porosity of the oil field within the northern end of the Sorokin Swell (Timan-Pechora oil and gas province)

M. E. Shaburova

Gazprom нефt company group, Saint Petersburg, Russia

The article presents the results of the carbonate reservoirs permeability and porosity model detailing of the oil field in the Timan-Pechora oil and gas province in relation to their formation features and secondary changes. The object of study is Upper Carboniferous – Lower Permian carbonate reservoirs. The resulting model shows the spatial localization of different lithological types of reservoir rocks, as well as the effect of fracturing on the permeability. The relevance of this study conditioned by the fact that the modeling results are the basis for identifying prospect areas for production level ensuring in the Upper Carboniferous reservoir.

In the course of the study, the classification of reservoir rocks according to core data is carried out; the distribution of various lithological types of limestone in the area and in the section has been established; the predominant type of voidness and the characteristic range of filtration and capacity properties for each selected lithological type have been determined. In addition, fractures are classified according to core data and reservoir microimages, the relationship between the fracturing density and the rock bulk density and primary porosity has been established, and the positive effect of fracture paragenesis on the permeability of low-capacity reservoirs has been confirmed.

Keywords: carbonate reservoirs, fracturing, Dunham classification, void structure, Timan-Pechora oil and gas province

Для цитирования: Шабурова М. Е. Уточнённая модель фильтрационно-ёмкостных свойств карбонатных коллекторов нефтяного месторождения в пределах северного окончания вала Сорокина (Тимано-Печорская нефтегазоносная провинция) // Вестник геонаук. 2025. 9(369). С. 8–18. DOI: 10.19110/geov.2025.9.2

For citation: Shaburova M. E. Updated model of carbonate reservoirs permeability and porosity of the oil field within the northern end of the Sorokin Swell (Timan-Pechora oil and gas province). Vestnik of Geosciences, 2025, 9(369), pp. 8–18, doi: 10.19110/geov.2025.9.2



Введение

В настоящее время прогноз фильтрационно-емкостных свойств коллекторов продуктивных залежей осуществляется с использованием трёхмерного геологического моделирования. Основой для создания моделей фильтрационно-ёмкостных свойств является геолого-геофизическая информация различного масштаба: керн, шлифы, геофизические исследования скважин, результаты интерпретации материалов сейсморазведочных работ.

Целью исследования является детализация модели фильтрационно-ёмкостных свойств карбонатных коллекторов нефтяного месторождения в пределах северного окончания вала Сорокина с учётом особенностей их формирования и строения пустотного пространства.

Для реализации поставленной цели были решены следующие задачи:

- проведена классификация пород-коллекторов с использованием данных керна;
- определён преобладающий тип пустотности и характерный диапазон фильтрационно-ёмкостных свойств для каждого выделенного литологического типа;
- проведена классификация трещин с использованием данных керна и пластовых микроимиджеров;
- построена геологическая 3D-модель продуктивных отложений исследуемого месторождения, включающая модель пористости и проницаемости.

Объект исследования

Исследуемое нефтяное месторождение расположено в северной части вала Сорокина Варандей-Адзвинской структурно-тектонической зоны Тимано-Печорской плиты (рис. 1).

С точки зрения нефтегазогеологического районирования исследуемое месторождение относится к Сорокинскому нефтегазоносному району (НГР) Варандей-Адзвинской нефтегазоносной области (НГО) Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (НПП). В пределах Сорокинского НГР установлена промышленная нефтеносность доманиково-турнейского, верхневизейско-нижнепермского, верхнепермского, триасового комплексов (Дзюбло и др., 2021).

В пределах исследуемого месторождения установлена промышленная нефтеносность двух пластов: в отложениях гжельского яруса верхнего карбона (C_3g) и в отложениях нерасчленённого ассель-сакмарского яруса нижней перми (P_{1a+s}). При этом верхний пласт, в отличие от нижнего, введён в промышленную эксплуатацию. Коллекторы продуктивных пластов представлены известняками, преобладающий тип коллекторов верхнего продуктивного пласта — поровый, нижнего — каверново-трещинно-поровый. Коллекторы верхнего продуктивного пласта обладают существенно лучшими фильтрационно-емкостными свойствами (ФЕС) по сравнению с пластом в отложениях гжельского яруса верхнего карбона. При этом коллекторы нижнего пласта в дальнейшем могут рассматриваться как перспективные с точки зрения ввода в эксплуатацию с целью поддержания уровня добычи на месторождении. Поэтому необходимо изучить особенности строения их пустотного пространства и трещиноватость, которая может влиять

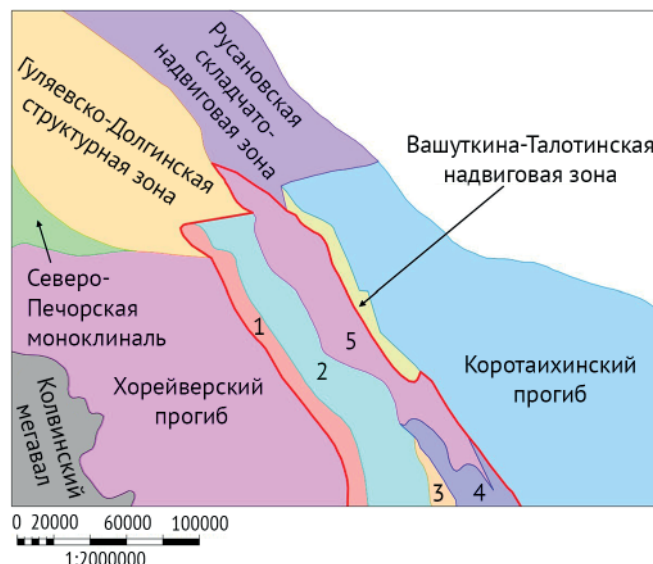


Рис. 1. Фрагмент схемы тектонического районирования осадочного чехла Тимано-Печорской плиты (Журавлёв и др., 2014).

Условные обозначения: 1 — вал Сорокина, 2 — Мореюская депрессия, 3 — вал Гамбурцева, 4 — Верхнеадзвинская депрессия, 5 — Медынско-Сарембойская антиклинальная зона

Fig. 1. Fragment of the tectonic zoning sedimentary cover scheme of the Timan-Pechora plate (Zhuravljov et al., 2014). Legend: 1 — Sorokin Swell, 2 — Moreyu Depression, 3 — Gamburtsev Swell, 4 — Upper Adzva Depression, 5 — Medynskoye-Saremboyskaya Anticline Zone

на распространение зон высокой проницаемости и продуктивности.

Материалы и методы исследования

Основой для исследования послужили результаты описания 455 метров керна в интервале продуктивных пластов по шести скважинам (все скважины с керном на месторождении), а также 149 шлифов по пяти скважинам. По двум скважинам (146 метров керна) проведено детальное описание трещин с шагом 0.1 м, включающее тип трещин, азимуты и углы падения (относительно оси керна), материал заполнения, отношение к слоистости, сопутствующие вторичные изменения; по этим данным была рассчитана плотность трещиноватости как количество трещин на 1 метр ствола скважины. Кроме того, были использованы результаты геофизических исследований (ГИС) 30 скважин, включая специальные методы (ядерно-магнитный каротаж, электрические и акустические азимутальные микроимиджеры).

Построение трёхмерных геологических моделей осуществлялось с использованием программного продукта Schlumberger Petrel.

Основой для построения литологической модели послужили результаты структурно-генетической классификации известняков продуктивных пластов по данным керна пяти скважин. Выделенные литологические типы характеризуются отличием петроупругих свойств и хорошо коррелируют с результатами сейсмической инверсии (кубом акустического импеданса) (рис. 2). Поэтому для каждого литотипа были рассчитаны кри-

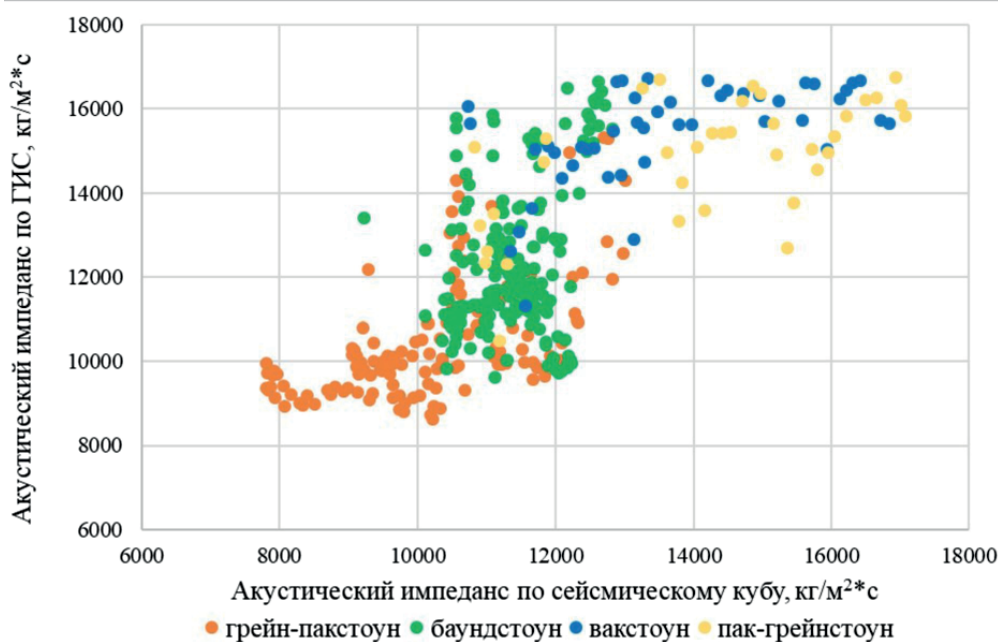


Рис. 2. Связь значений акустического импеданса по сейсмическому кубу и по ГИС

Fig. 2. Correlation of acoustic impedance values by a seismic cube and wells logging

вые вероятности в зависимости от значений акустического импеданса, которые использовались для распределения в межскважинном пространстве.

Для того чтобы учесть вероятностный характер используемого тренда, было построено 5 реализаций куба литологии, которые впоследствии были осреднены для получения финального результата.

По итогам анализа керна установлено, что выделенные литологические типы известняков характеризуются определённым диапазоном пористости, поэтому моделирование ёмкости осуществлялось отдельно для каждого литологического типа.

Проницаемость пак-грейнстоунов обусловлена размером, соотношением и расположением в пространстве форменных элементов (обломков) пород-коллекторов; проницаемость вакстоунов — трещиноватостью, поэтому для моделирования были использованы различные методики. Проницаемость пак-грейнстоунов была рассчитана по зависимости от пористости, полученной по данным керна.

При построении модели проницаемости вакстоунов были учтены результаты лабораторных определений проницаемости по керну и плотность трещиноватости по данным пластовых микроимджеров. Плотность трещиноватости была рассчитана как количество трещин на 1 метр по данным пластовых микроимджеров 21 скважины отдельно: 1) для трещин парагенезиса среднего карбона–нижней перми; 2) стилолитовых трещин и трещин разгрузки триасового парагенезиса; 3) эшелонных трещин отрыва триаса.

Для распределения плотности трещиноватости в межскважинном пространстве в качестве тренда был использован куб объёмной плотности пород, так как установлена связь между плотностью трещиноватости, рассчитанной по данным керна, и объёмной плотностью пород, определённой по ГИС (Шабурова, 2024). Куб объёмной плотности пород получен с учётом данных ГИС и результатов сейсмической инверсии (акустического импеданса). Кроме того, для моделирования тре-

щин триасового парагенезиса использовалась следующая закономерность: при формировании складчатых нарушений ближе к кровле образуются трещины отрыва, ближе к подошве — стилолитовые трещины и трещины разгрузки. Сначала были построены модели плотности трещиноватости для этих трёх групп, затем финальная модель плотности трещиноватости была получена суммированием. При этом модели стилолитовых трещин и трещин разгрузки триасового парагенезиса присваивался больший вес, так как эти трещины характеризуются большей раскрытостью. Модель плотности трещиноватости использовалась в качестве тренда для построения модели проницаемости вакстоунов.

Результаты и обсуждение

Структурно-генетическая классификация пород-коллекторов

Для типизации пород-коллекторов исследуемого месторождения была использована структурно-генетическая классификация известняков по Ф. Данхэму с дополнениями Ембри и Кловена (Dunham, 1961; Embry, 1971). Данная классификация подразумевает разделение на известняки, первичные компоненты которых не были скреплены между собой в процессе осадконакопления: грейнстоуны, пакстоуны, вакстоуны и мадстоуны; и на известняки, первичные компоненты которых были скреплены между собой в процессе осадконакопления: баундстоуны, баффлстоуны, байндстоуны, фреймстоуны и др.

Грейнстоуны, пакстоуны, вакстоуны и мадстоуны отличаются друг от друга размером форменных элементов и количеством карбонатного илистого материала. Увеличение размера их форменных элементов и уменьшение количества карбонатного илистого материала от мадстоунов к грейнстоунам указывает на увеличение гидродинамической активности среды.

В отложениях гжелского яруса верхнего карбона выделены пак-грейнстоуны, вак-мадстоуны. В преде-



лах продуктивного пласта в отложениях ассель-сакмарского яруса нижней перми выделены грейн-пакстоуны и баундстоуны. При этом в пределах нижнего продуктивного пласта преобладают вак-мадстоуны, в пределах верхнего — баундстоуны (таблица 1).

Кроме того, в скважинах, расположенных в центральной части месторождения, преобладают грейн-пакстоуны или пак-грейнстоуны (в пределах верхнего или нижнего продуктивного пласта соответственно); в скважинах, расположенных в краевых частях, — баундстоуны или вак-мадстоуны (в пределах верхнего или нижнего продуктивного пласта соответственно) (рис. 3), то есть отмечается закономерное распределение литологических типов по площади и разрезу.

Связь фильтрационно-ёмкостных свойств (ФЕС) с условиями осадконакопления

Каждый выделенный литологический тип известняков в пределах исследуемого месторождения характеризуется определённым диапазоном ФЕС: пористость грейн-пакстоунов достигает 25–29 %, баундстоунов — в среднем составляет 15 %; пак-грейнстоунов — 6 %, вак-мадстоунов — 4 %. Пак-грейнстоуны в среднем характеризуются худшей проницаемостью — 10 мД.

Проницаемость вак-мадстоунов в среднем выше проницаемости баундстоунов и составляет 72 и 58 мД соответственно. Проницаемость грейн-пакстоунов в среднем составляет 104 мД (табл. 2). Распределение пористости и проницаемости представлено по результатам 876 лабораторных определений на керне пяти скважин.

Выявленные закономерности обусловлены особенностями строения пустотного пространства выделенных литологических типов известняков. Так, грейн-стоуны и пакстоуны, формировавшиеся в условиях высокой гидродинамической активности среды и постоянного разрушения и переотложения грубообломочного карбонатного материала, характеризуются преобладанием межформенной пустотности и, соответственно, высокой и средней ёмкостью и проницаемостью. Для баундстоунов, формировавшихся в результате роста и развития организмов-рифостроителей, в большей степени характерны внутриформенная пустотность и, соответственно, высокая, средняя ём-

кость и средняя, низкая проницаемость. Вакстоуны и мадстоуны, формировавшиеся в более глубоководных обстановках осадконакопления с низкой гидродинамической активностью, характеризуются межкристаллической пустотностью с низкой первичной ёмкостью и проницаемостью. Однако для этих пород характерна вторичная трещинно-каверновая пустотность, поэтому в целом они характеризуются низкой ёмкостью и высокой, средней проницаемостью (рис. 4).

Классификация типов пустотности приведена по К. И. Багринцевой (Багринцева и др., 2003).

Таким образом, фильтрационно-ёмкостные свойства коллекторов исследуемого месторождения связаны с первичными условиями осадконакопления.

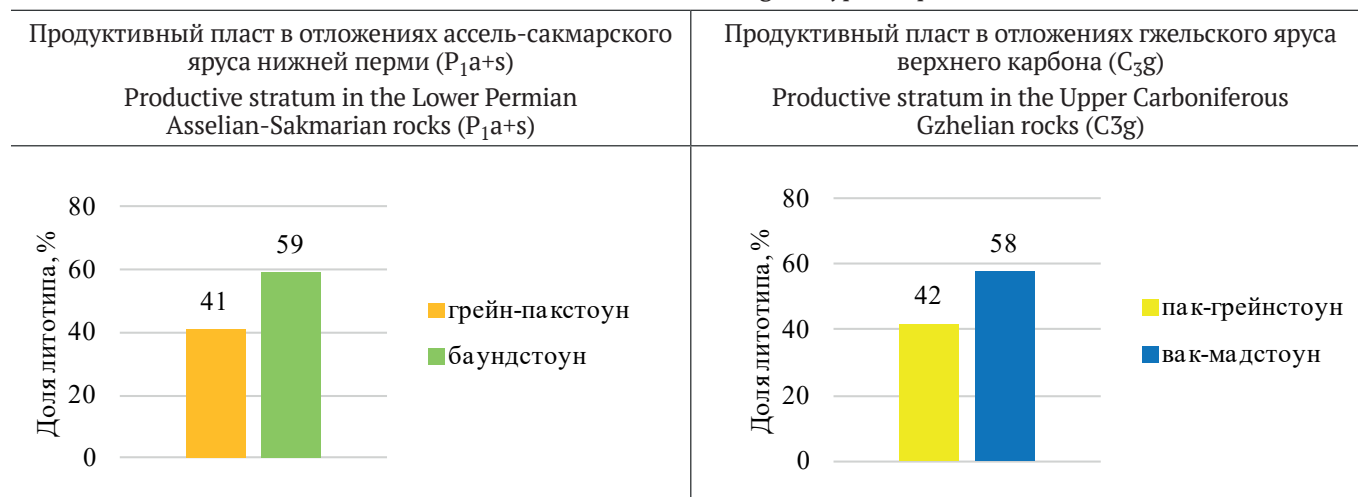
Учитывая, что в пределах продуктивных отложений гжельского яруса верхнего карбона широкое распространение получили вакстоуны с вторичной трещинно-каверновой пустотностью, важной задачей является изучение закономерностей пространственного распространения трещин, а также их влияния на фильтрационно-ёмкостные свойства.

Формирование залежей продуктивных пластов исследуемого месторождения контролировалось процессами тектонического сжатия, доминировавшими в северо-восточной части Тимано-Печорской плиты в карбоне-триасе (Шабурова, 2025). Накопление отложений продуктивных пластов в среднем карбоне — ранней перми происходило одновременно с процессами структурной инверсии (Шабурова, 2025). К концу триасового периода в пределах исследуемого месторождения сформировалась антиклинальная складка (Шабурова, 2025). При этом закономерным является тот факт, что трещины в коллекторах исследуемого месторождения формировались в результате хрупких деформаций под действием этих же тектонических процессов.

Согласно модели, предложенной Р. А. Нельсоном, в обстановках сжатия формируются трещины следующих типов: стилолитовые трещины, эшелонные трещины отрыва и трещины разгрузки (сжатия). При этом поверхности стилолитовых трещин и трещин разгрузки формируются перпендикулярно направлению максимального сжатия, а эшелонные трещины отрыва — параллельно ему (Nelson, 2001). Характер разрывных нарушений в пределах исследуемого месторождения

Таблица 1. Распределение литологических типов известняков в продуктивных пластах

Table 1. Distribution of limestones lithological types in productive strata



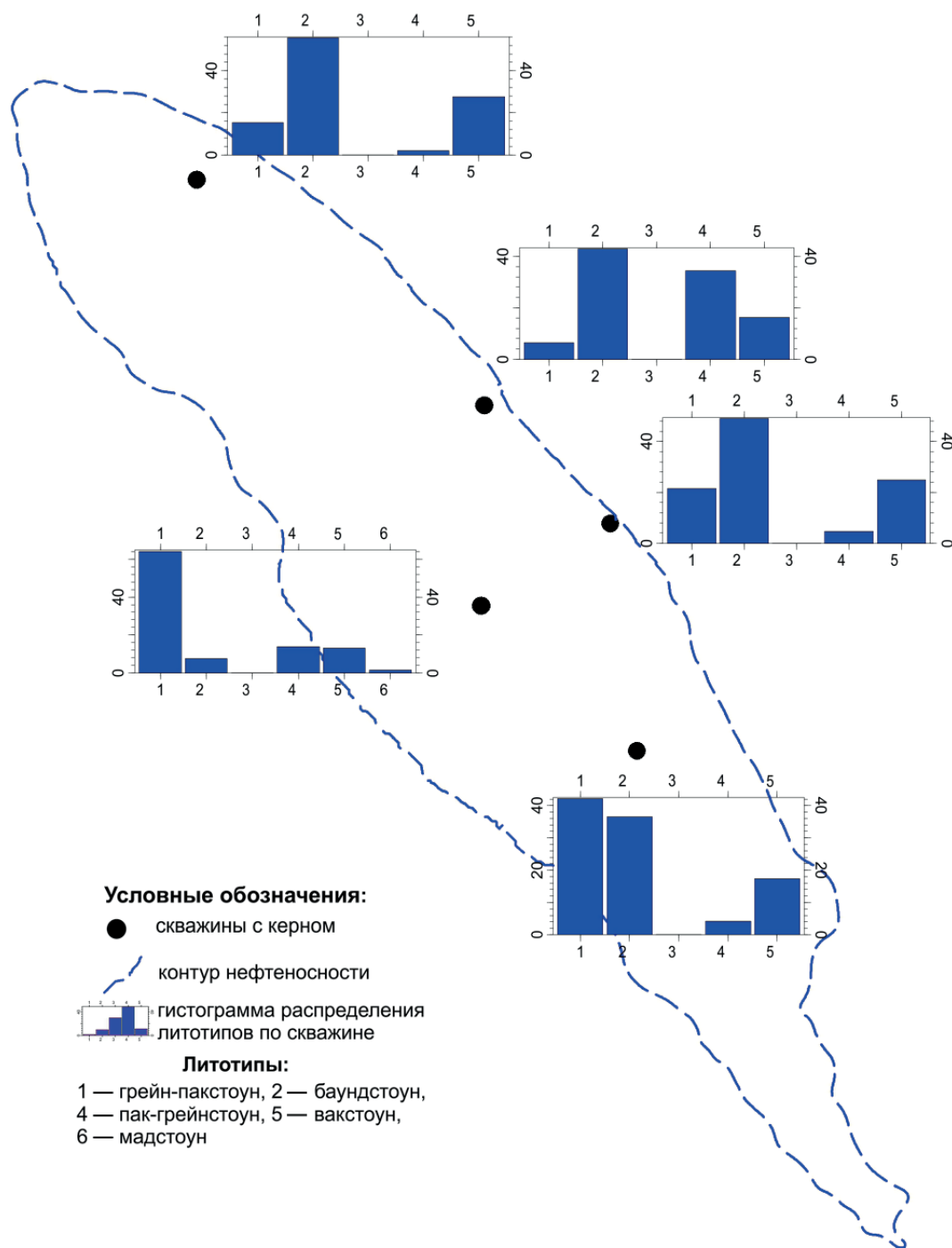


Рис. 3. Схема расположения скважин с керном и гистограммы распределения литотипов по ним (%)

Fig. 3. Layout of wells with core and histograms of lithotype distribution (%)

указывает на наличие сдвиговых смещений, которые также могут формироваться в обстановках сжатия. Согласно модели Кулона – Андерсона (модели чистого сдвига), при сдвиге симметрично относительно направления минимального стресса формируются сопряженные трещины скола.

В ходе исследования была проведена классификация трещин по данным керна и пластовых микроимиджеров. Это обусловлено тем, что в пределах месторождения — небольшое количество скважин с отобраным керном, кроме того, керн не ориентирован в пространстве. При определении типа трещин по данным керна учитывалась их форма, протяжённость и взаимное расположение. Тип трещин по данным пластовых микроимиджеров определён с учётом азиму-

тов простирания. В результате выделены две группы трещин. Первая группа — трещины сжатия: стилолитовые трещины образуются неровными поверхностями отдельности, покрытыми тонкими выступами и шипами; эшелонные трещины отрыва образуют парагенезисы со стилолитовыми трещинами, их простирание не совпадает с простиранием стилолитовых трещин; трещины разгрузки образуют парагенезисы со стилолитовыми трещинами, их простирание совпадает с простиранием стилолитовых трещин. Вторая группа — трещины сдвига: трещины скола, формирующие две сопряженные системы и не формирующие парагенезисы со стилолитовыми трещинами. При этом трещины сжатия существенно преобладают в пределах исследуемых пластов (рис. 5).



Таблица 2. Пористость и проницаемость литологических типов известняков по продуктивным пластам
Table 2. Porosity and permeability of limestones lithological types in productive strata



Для оценки влияния трещин сжатия на фильтрационно-ёмкостные свойства было проведено сопоставление плотности трещиноватости по данным керна с объёмной плотностью пород и первичной пористостью, определённым по ГИС.

По результатам анализа отмечается, что плотность трещиноватости увеличивается с ростом объёмной плотности пород и уменьшается с ростом первичной пористости, то есть трещины сжатия формировались преимущественно в первично более плотных и, соответственно, менее пористых породах (Шабурова, 2024).

Анализ вторичных изменений, сопутствующих трещинам по данным керна (Шабурова, 2024), показал, что процессы выщелачивания существенно преобладают над другими. Таким образом, трещины сжа-

тия формировались преимущественно в породах с более низкой первичной ёмкостью, однако выщелачивание по этим трещинам способствовало улучшению фильтрационно-ёмкостных свойств за счёт увеличения проницаемости.

Для классификации трещин по данным пластовых микроимиджеров были использованы представления об ориентировке палеополей напряжений. В среднем карбоне – ранней перми она определена исходя из простирания разрывных нарушений: направление максимального горизонтального напряжения перпендикулярно простиранию взброса, ограничивающего залежь; направление минимального горизонтального напряжения параллельно ему (Шабурова, 2025). Ориентировка палеополей напряжений в триасе определена по простиранию оси складки: направление мак-

симального горизонтального напряжения перпендикулярно простиранию оси складки, направление минимального горизонтального напряжения параллельно ей (Шабурова, 2025).

Трещины, ориентированные вдоль направления максимального сжатия, были отнесены к эшелонным

трещинам отрыва; трещины, ориентированные перпендикулярно направлению максимального сжатия — к стилолитовым трещинам и трещинам разгрузки; трещины, ориентированные под углом к направлению максимального сжатия — к трещинам скола. Разное простирание и состав парагенезисов структурных эле-

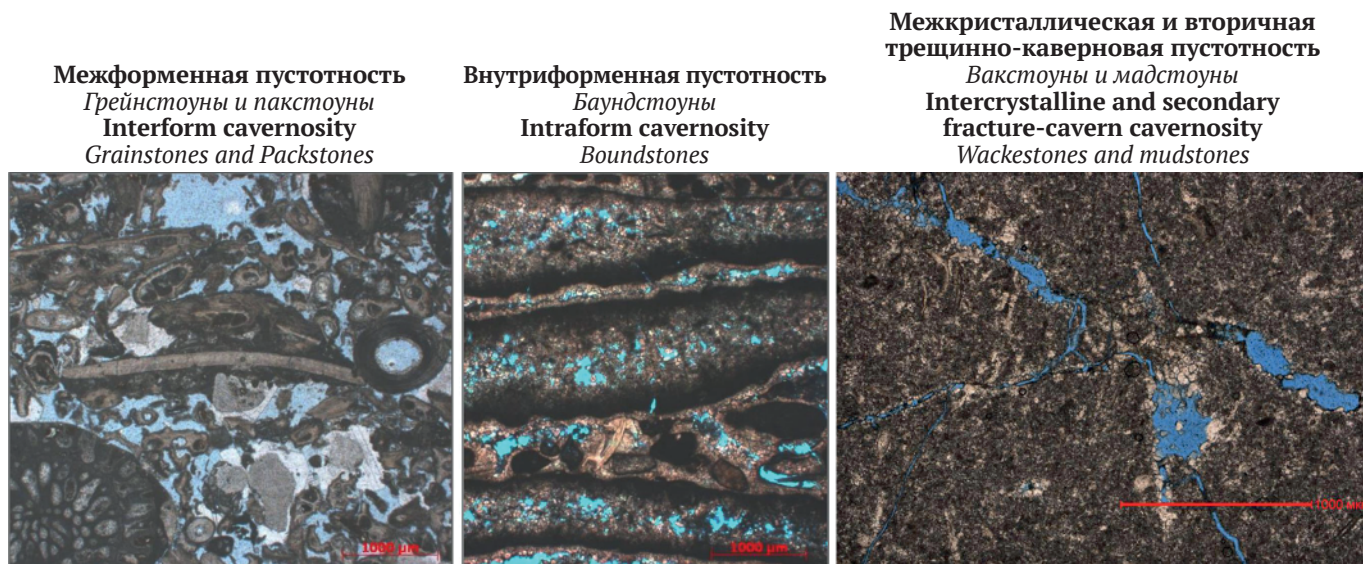


Рис. 4. Различные типы строения пустотного пространства известняков нефтяного месторождения в пределах северного окончания вала Сорокина

Fig. 4. Different types of cavernous structure in limestones of the oil deposit within the northern end of Sorokin Swell

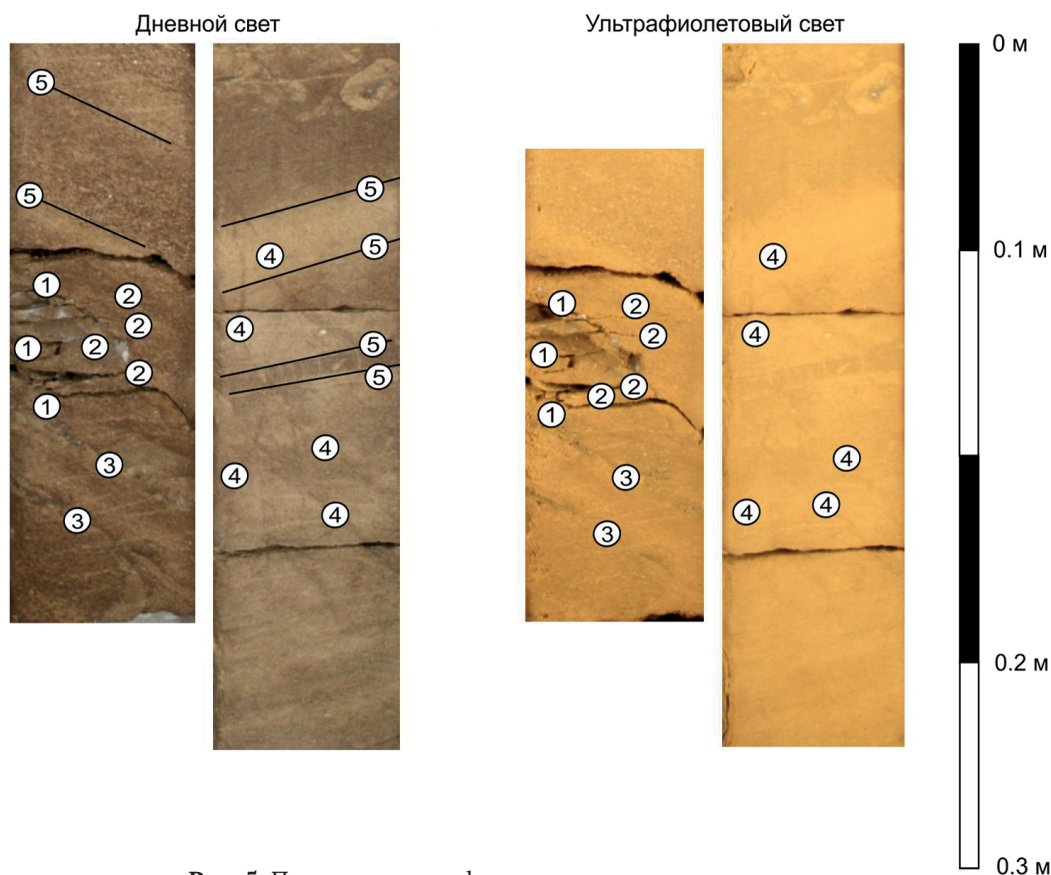


Рис. 5. Примеры классификации трещин по данным керна.

Условные обозначения: 1 — стилолитовые трещины, 2 — эшелонные трещины отрыва, 3 — трещины разгрузки, 4 — трещины скола, 5 — плоскости наслоения породы

Fig. 5. Examples of fractures classification based on core data.

Legend: 1 — stylolite cracks, 2 — echelon fractures, 3 — release cracks, 4 — shear cracks, 5 — rock bedding planes

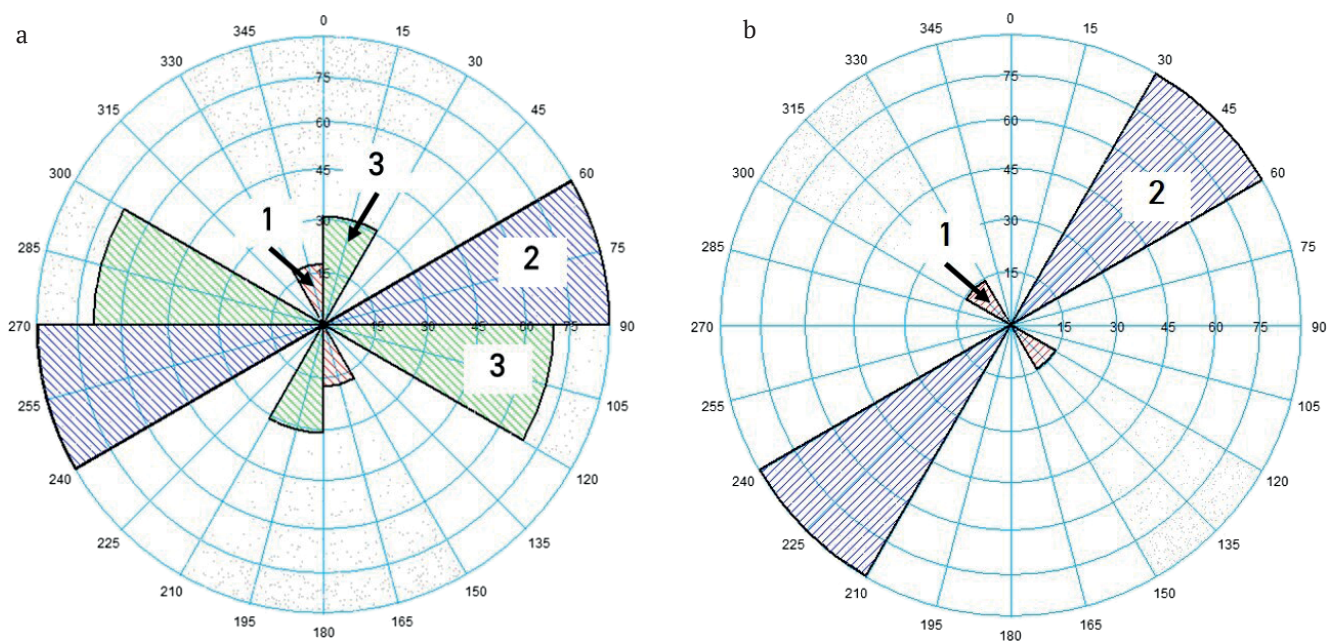


Рис. 6. Роза-диаграмма простираения выделенных типов трещин.

Условные обозначения: а — парагенезис среднего карбона – нижней перми, б — парагенезис триаса; 1 — стилолитовые трещины и трещины разгрузки, 2 — эшелонные трещины отрыва, 3 — трещины скола

Fig. 6. Stereonet of the classified fractures strike-azimuth

Legend: a — Middle Carboniferous – Lower Permian paragenesis, b — Triassic paragenesis; 1 — stylolite fractures and release fractures, 2 — echelon fractures, 3 — shear fractures

ментов в среднем карбоне – нижней перми и триасе указывает на изменение тектонического режима, поэтому в пределах продуктивного пласта также должны были формироваться разные парагенезисы трещин (рис. 6).

В процессе эксплуатации минимальное сопротивление фильтрации флюида возникает в трещинах, расположенных вдоль направления максимального горизонтального напряжения, соответственно, такие трещины должны обладать наибольшей раскрытостью.

Ориентировка современного максимального и минимального горизонтального напряжения может быть определена по данным пластовых микроимиджеров: техногенная трещиноватость и «вывалы» стволов скважин позволяют оценить направление максимального и минимального горизонтального стресса в вертикальной скважине. Под «вывалами» подразумевается разрушение стенок скважины, которое приводит к потере устойчивости ствола; под техногенными трещинами — трещины, которые образуются вблизи ствола скважины в процессе бурения. Техногенные трещины на имиджах имеют вид узких непрерывных вертикальных полос или вид фрагментарных наклонных штрихов строго выдержанного направления. «Вывалы» определяются по имиджам как вертикальные полосы различной ширины. Как правило, в местах «вывалов» отмечается плохой контраст сопротивлений в силу отсутствия надлежащего прижатия башмаков прибора к стенкам скважины.

Техногенные трещины в вертикальной скважине образуются параллельно к направлению максимального горизонтального напряжения, в то время как «вывалы» — перпендикулярно (рис. 7). Таким образом, максимальной раскрытостью обладают стилолитовые трещины и трещины разгрузки триасового парагенезиса.

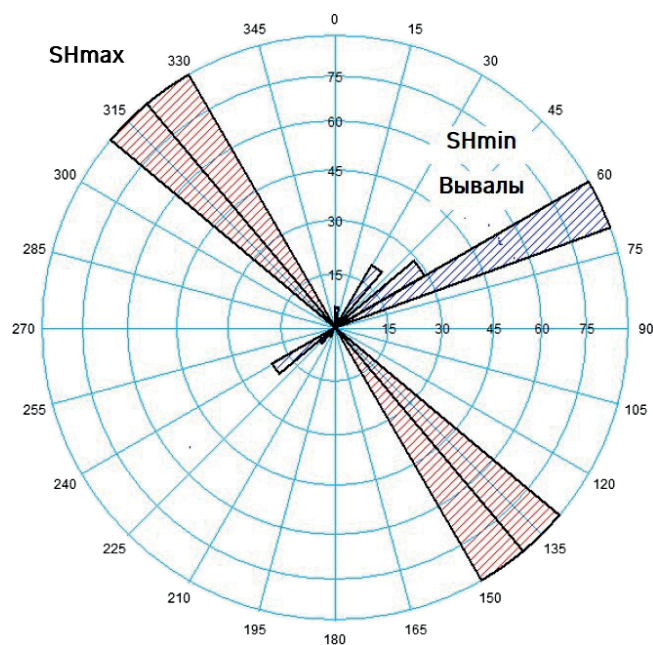


Рис. 7. Роза-диаграмма простираения «вывалов» стволов скважин и современной ориентации главных осей горизонтальных напряжений.

Условные обозначения: SH_{max} — ориентация максимального горизонтального напряжения, SH_{min} — направление минимального горизонтального напряжения

Fig. 7. Stereonet of the borehole break-out and modern maximum stress strike-azimuth.

Legend: SH_{max} — orientation of maximum horizontal stress, SH_{min} — direction of minimum horizontal stress

Результаты построения геологической модели

Результаты построения литологической модели представлены на рисунке 8.

Результаты моделирования фильтрационно-ёмкостных свойств представлены в виде карт средней пористости и произведения средней проницаемости на среднюю толщину для каждого литотипа на рис. 9, 10.

Результат построения модели отражает зональность распределения ёмкостных свойств по площади и по разрезу, подтверждённую результатами анализа керна, и

её связь с особенностями осадконакопления, а также учитывает влияние трещиноватости на проницаемость коллекторов. Такой подход повышает качество прогноза фильтрационно-ёмкостных свойств коллектора, поэтому полученная детализированная модель была использована для выделения перспективных с точки зрения восполнения ресурсной базы зон в отложениях продуктивного пласта верхнего карбона.

Зоны, перспективные с точки зрения поддержания уровня добычи, должны характеризоваться наи-

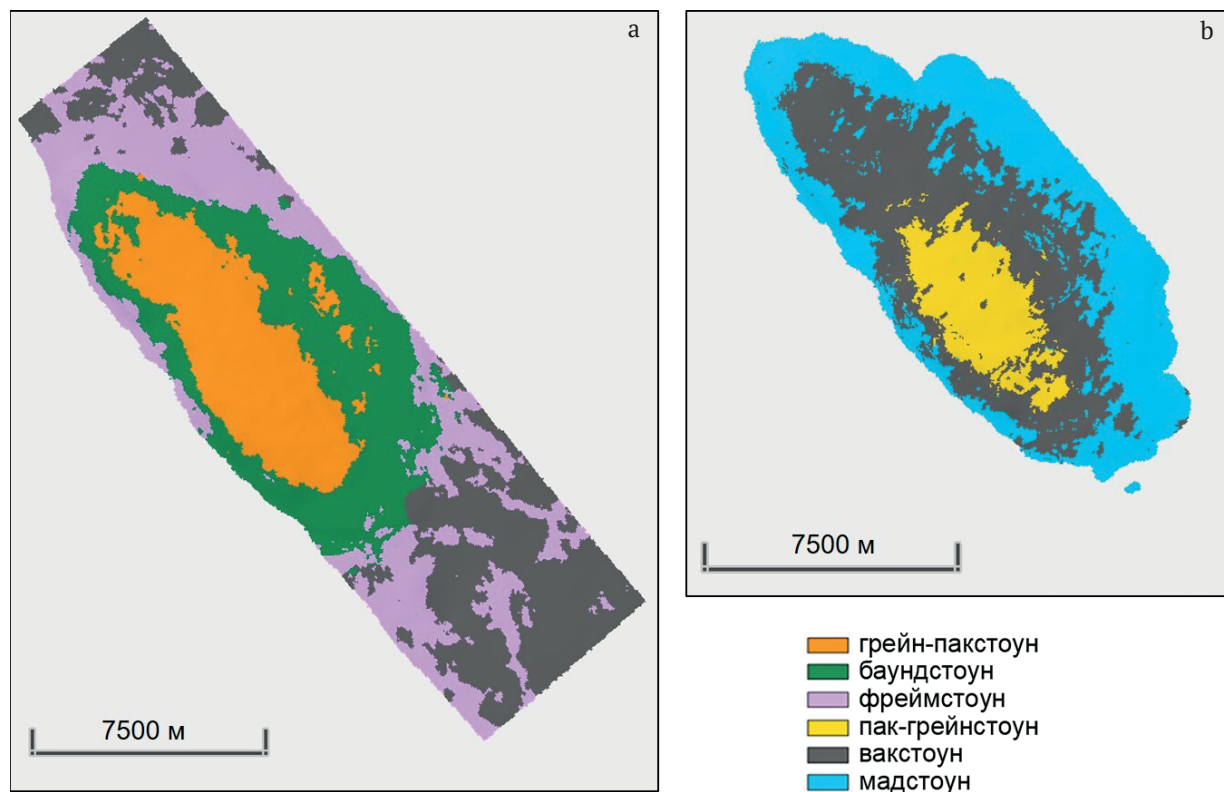


Рис. 8. Схема распространения литологических типов известняков: а — в отложениях P_{1a+s} , б — в отложениях C_{3g}

Fig. 8. Distribution of limestones lithological types: а — in productive layer P_{1a+s} , б — in productive layer C_{3g}

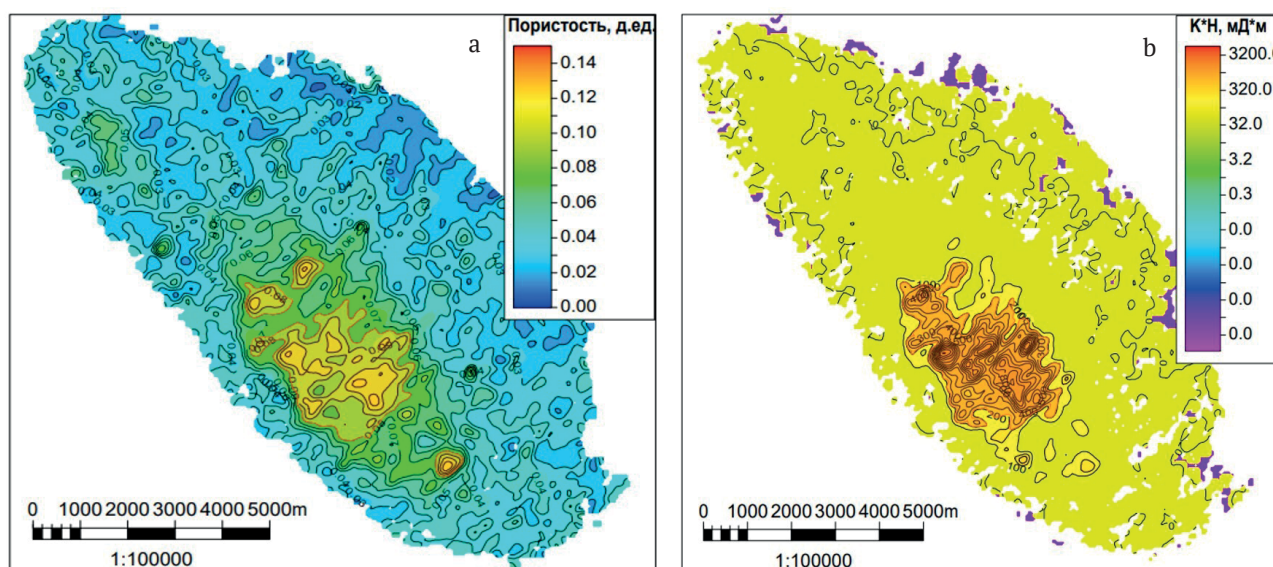


Рис. 9. Результаты моделирования ФЕС пак-грейнстоунов: а — пористости, б — произведения проницаемости и толщины пак-грейнстоунов

Fig.9. Modeling results of pack-grainstones filtration-capacitance properties: а — porosity, б — product of permeability and thickness

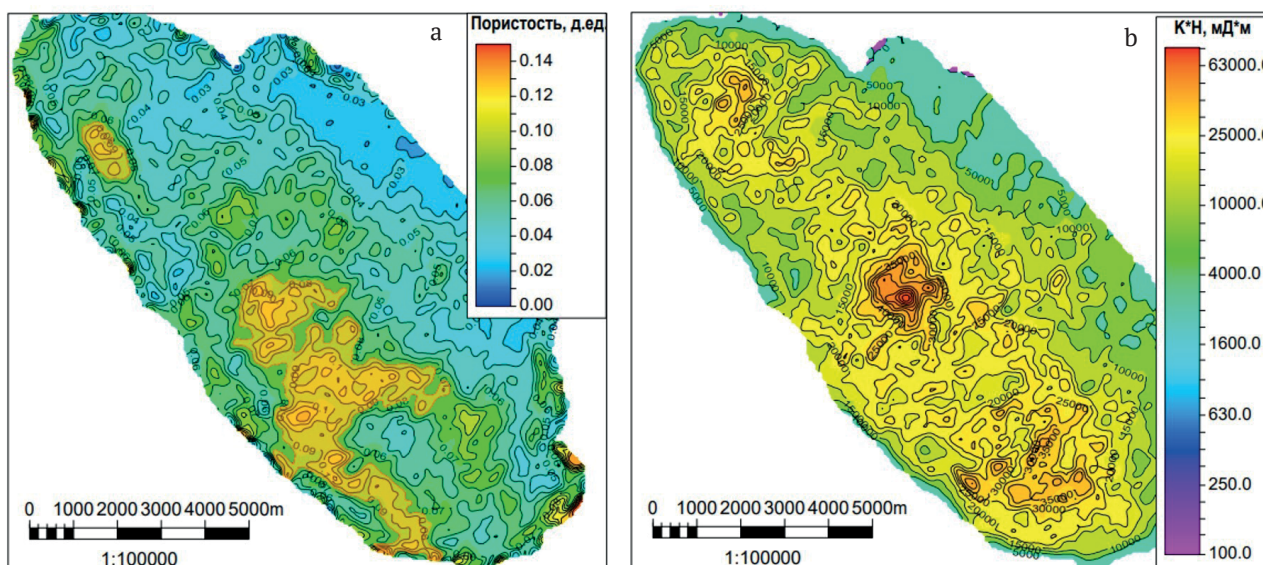


Рис. 10. Результаты моделирования ФЕС вакстоунов: а — пористости, б — произведения проницаемости и толщины
Fig. 10. Modeling results of wackstones filtration-capacitance properties: а — porosity, б — product of permeability and thickness

большей величиной запасов и высокой продуктивностью. В карбонатных коллекторах на величину начальных геологических запасов в первую очередь влияет ёмкость коллекторов, на продуктивность — проницаемость. Поэтому стояла задача выделить зоны, в которых эти параметры характеризуются наибольшими значениями. Таким образом, зона развития улучшенных фильтрационно-ёмкостных свойств продуктивных отложений гжельского яруса верхнего карбона расположена в центральной части и связана с улучшением ёмкости пак-грейнстоунов и повышением трещиноватости вакстоунов (рис. 11).

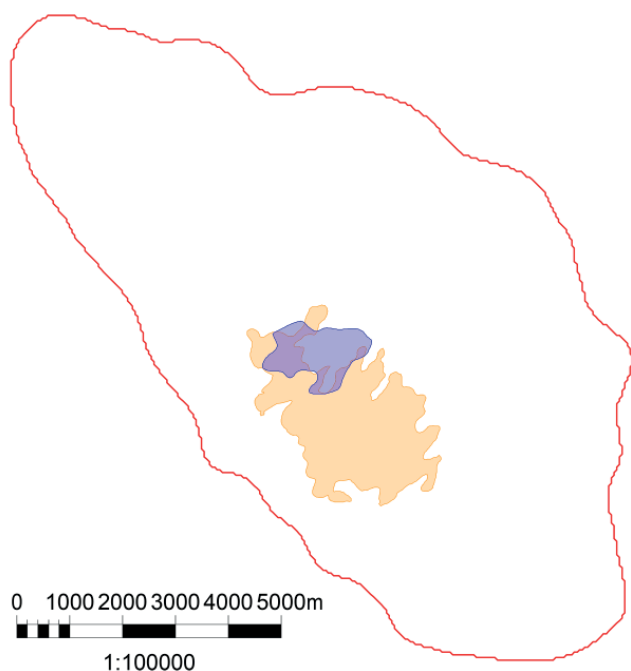


Рис. 11. Зона развития улучшенных фильтрационно-ёмкостных свойств в интервале продуктивного пласта гжельского яруса верхнего карбона

Fig. 11. Zone of improved filtration-capacitance properties of Upper Carboniferous productive reservoir

Заключение

В ходе исследования проведена классификация пород-коллекторов, выявлены закономерности распространения различных литологических типов известняков по площади и по разрезу; определён преобладающий тип пустотности и характерный диапазон фильтрационно-ёмкостных свойств для каждого выделенного литологического типа. Кроме того, проведена классификация трещин с использованием данных керна и пластовых микроимиджеров, установлена связь плотности трещиноватости с объёмной плотностью пород и первичной пористостью, подтверждено положительное влияние парагенезисов трещин на проницаемость низкоёмких коллекторов.

Результаты проведённых исследований послужили основой для детализации геологической модели строения карбонатных коллекторов исследуемого нефтяного месторождения в части прогноза ёмкости с учётом особенностей осадконакопления, а также прогноза проницаемости с учётом трещиноватости. Полученная детализированная геологическая модель послужила основой для прогноза развития зоны улучшенных фильтрационно-ёмкостных свойств в продуктивных отложениях верхнего карбона.

Литература / References

- Багринцева К. И., Дмитриевский А. Н., Бочко Р. А. Атлас карбонатных коллекторов месторождений нефти и газа Восточно-Европейской и Сибирской платформ. М.: РГГУ, 2003. 264 с.
- Bagrinceva K. I., Dmitrievsky A. N., Bochko R. A. Atlas of carbonate reservoirs of oil and gas fields of the East European and Siberian platforms. Moscow: RSHU, 2003, 264 p. (in Russian)
- Дзюбло А. Д., Сидоров В. В., Зонн М. С., Агаджанянц И. Г. Перспективы нефтегазоносности ордовикско-нижнефранского мегакомплекса шельфа Печорского моря // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2021 № 4. С. 70–81.



- Dzjublo A. D., Sidorov V. V., Zonn M. S., Agadzhanjanc I. G. Prospects for oil and gas potential of the Ordovician-Lower Frasnian megacomplex of the Pechora Sea shelf. *Vestnik of Moscow University, series 4, Geology*, 2021, No. 4, pp. 70–81 (in Russian)
- Журавлёв В. А., Кораго Е. А., Костин Д. А., Зуйкова О. Н. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-39, 40 — о. Колгуев — прол. Карские Ворота. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 405 с.
- Zhuravljov V. A., Korago E. A., Kostin D. A., Zujkova O. N. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). North Kara-Barents Sea series. Sheet R-39.40 — Kolguev Island. Kara Gate. Explanatory letter. St. Petersburg: VSEGEI Map factory, 2014, 405 p. (in Russian)
- Шабурова М. Е. Влияние трещиноватости на фильтрационно-емкостные характеристики карбонатных коллекторов на примере нефтяного месторождения Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 8. С. 48–53.
- Shaburova M. E. The fractures influence on the filtration and capacitance characteristics of carbonate reservoirs on the example of an oil field in the Timan-Pechora oil and gas province. *Oil and Gas Exposition*, 2024, No. 8, pp. 48–53 (in Russian)
- Шабурова М. Е. Прогноз развития трещиноватости в карбонатных коллекторах с учётом особенностей тектонического развития региона // Интерэкспо Гео-Сибирь: XXI Международный научный конгресс. Новосибирск, 2025. С. 25–32.
- Shaburova M. E. Prediction of carbonate reservoirs fracturing based on tectonic development features of the region. *Interexpo Geo-Siberia. XXI International Scientific Congress*. Novosibirsk, 2025, pp. 25–32 (in Russian)
- Dunham R. J. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture // *Symposium «Classifications of Carbonate Rocks»*. 1961. P. 108–121.
- Embry A. F. A Late Devonian Reef Tract on Northeastern Banks Island // *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*. Vol. 19. No. 4. 1971. P. 730–781.
- Nelson R. A. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. United States of America. 2001. 332 p.

Поступила в редакцию / Received 04.07.2025



Микроструктурные особенности нижнепермских ооидных известняков (Южный Тиман)

О. С. Ветошкина

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

vetoshkina@geo.komisc.ru

На основании электронно-микроскопических исследований ооидных известняков из разреза нижнепермских отложений Южного Тимана были выделены морфологические признаки, свидетельствующие об образовании карбонатов в результате процессов органоминерализации, обусловленных присутствием и деятельностью микроорганизмов (микробный метаболизм) и влиянием слизистых веществ, действующих как матрица для зарождения и роста кристаллов. В результате исследований были идентифицированы минерализованные тела организмов, биогенные микроструктуры, бактериальные биопленки и нити, сохранившиеся в различных формах. Получены новые данные, представляющие дополнительные свидетельства органоминерализации при образовании ископаемых ооидов.

Ключевые слова: карбонаты, известняки, ооиды, органоминерализация, диагенез, биогенные микроструктуры

Microstructural features of Lower Permian ooid limestones (South Timan)

O. S. Vetoshkina

Institute of geology FRC Komi SC UB RAS, Syktывkar, Russia

Based on electron microscopic studies of ooid limestones from the Lower Permian section of the Southern Timan, morphological features have been identified that indicate the formation of carbonates as a result of organomineralization processes caused by the presence and activity of microorganisms (microbial metabolism) and the influence of mucous substances acting as a matrix for crystal nucleation and growth. As a result of the research, mineralized bodies of organisms, biogenic microstructures, bacterial biofilms and filaments preserved in various forms have been identified. The obtained novel data testify to organomineralization at the formation of fossil ooids.

Keywords: carbonates, limestones, ooids, organomineralization, diagenesis, biogenic microstructures

Введение

Большое значение микробиоты при образовании минералов и пород в настоящее время не вызывает сомнений. Детальное изучение микробно-минеральных систем в отложениях началось с развитием электронно-микроскопической техники. Сейчас имеется представление о распространении и деятельности микроорганизмов в осадках, их значительной геологической роли при формировании отложений и осадочных полезных ископаемых. Известно, что микроорганизмы участвуют в образовании минералов, которые являются основой многих осадочных пород, включая кальцит, доломит, фосфаты, оксиды железа, сульфиды (Бактериальная..., 2002).

Ранее в литературе неоднократно отмечалось участие микроорганизмов: бактерий, цианобактерий, водорослей и грибов — в процессах морского карбонатобразования (Folk, Lynch, 2001; O'Reilly et al., 2017 и др.). Формирование кальцита обусловлено в основном биологическими факторами, включающими метаболическую активность микробов, побочные продукты кото-

рой могут повышать pH и/или растворять неорганический углерод (Folk, Lynch, 2001; O'Reilly et al., 2017; Antoshkina et al., 2020). Судя по результатам исследований, образование морских карбонатов происходило по пути органоминерализации благодаря биологически обусловленному механизму (активное осаждение), осуществляемому через автотрофный или гетеротрофный метаболизм (Dupraz, Visscher, 2005; Diaz, Eberli, 2019; Harris et al., 2019), и/или пассивному механизму, когда определенные фрагменты слизистого внеклеточного полимерного вещества (EPS) или клеточных стенок действуют как центры зарождения карбонатных фаз (Dupraz, Visscher, 2005; Diaz, Eberli, 2019; Harris et al., 2019).

В качестве объекта настоящего исследования были выбраны нижнепермские ооидные известняки, выходящие на поверхность в северо-восточной части Восточно-Европейской платформы (рис. 1), в излучине Вычегды (около с. Усть-Нем), прилегающей с востока к возвышенности Южного Тимана — Жезимпарме.

Информация о седиментологической обстановке в этом районе дана в работе (Государственная..., 2021).

Для цитирования: Ветошкина О. С. Микроструктурные особенности нижнепермских ооидных известняков (Южный Тиман) // Вестник геонаук. 2025. 9(369). С. 19–27. DOI: 10.19110/geov.2025.9.3

For citation: Vetoshkina O. S. Microstructural features of Lower Permian ooid limestones (South Timan). Vestnik of Geosciences, 2025, 9(369), pp. 19–27, doi: 10.19110/geov.2025.9.3



Рис. 1. Схема расположения места отбора образцов

Fig. 1. Scheme of sampling location

Карбонатные отложения представлены преимущественно мелководно-морскими и лагунными осадками. В составе нижнепермских отложений выделены нерасчлененные артинский и кунгурский ярусы (Государственная..., 2021), представленные преимущественно доломитами, известняками, доломитизированными известняками, иногда с прослоями ангидрита и гипса (Ветошкина, Радаев, 2023). Известняки представляют собой массивные светло-серые органо-генно-обломочные породы, участками оолитовые, ино-

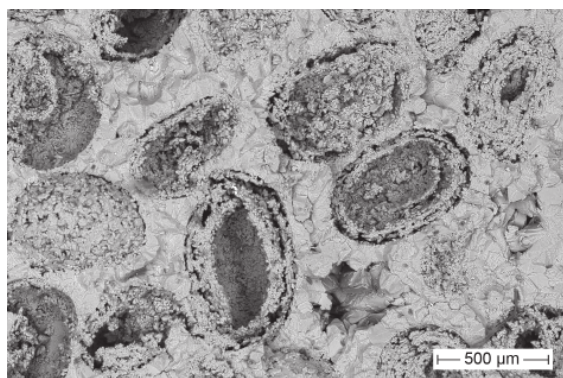
гда доломитизированные, с остатками раковин моллюсков, фораминифер, водорослей, с небольшими примесями кварца.

Идентификация различных продуктов жизнедеятельности бактерий, отраженных в литологических особенностях известняков, дает возможность не только понять механизм образования карбонатов, но и в какой-то мере представить условия их формирования. С этой целью в настоящей работе проанализированы образцы ооидных известняков с использованием комплекса методов, включающих сканирующую электронную микроскопию, определение химического и изотопного состава. Важное значение имеет определение механизма происхождения тонкозернистого карбоната путем органо-минерализации с участием различных микроорганизмов и продуктов их метаболизма.

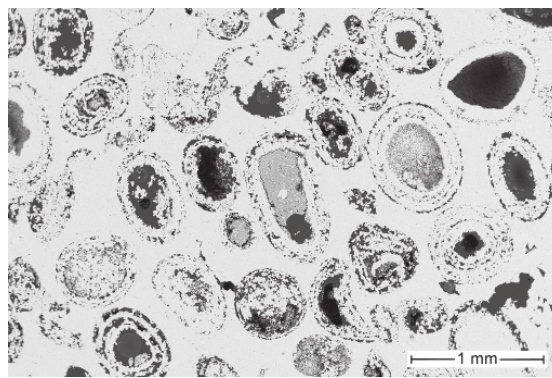
Методы исследования

Анализы проводились в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ ФИЦ УрО РАН. Состав карбонатных пород определялся в лаборатории химии минерального сырья по стандартной методике 8-компонентного карбонатного анализа. Данные обрабатывали путем пересчета их на нормативные минералы: CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 , MnCO_3 .

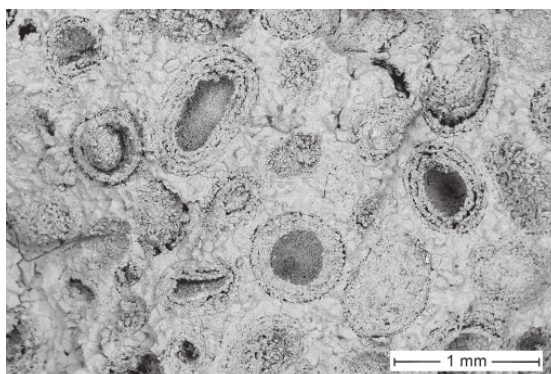
Определение минерального состава и деталей структуры проводилось посредством рентгенодифрактометра и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) вместе с микрозондовым анализом (ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с энергодисперсионной приставкой TrueSight) при углеродистом напылении. Пробы представляли собой свежие сколы и полированные аншлифы (аналитик В. А. Радаев).



a



b



c

Рис. 2. Нижнепермский ооидный известняк. Скопления ооидов в известняке: а, с — сколы, b — аншлиф (режим BSE)

Fig. 2. Lower Permian ooid limestones (a, b, c). Clusters of ooids in limestone: a, c — shears, b — polished section (BSE mode)



Изотопный состав кислорода и углерода в карбонатных образцах определялся на аналитическом комплексе, включающем в себя систему подготовки и ввода проб GasBench II, соединенную с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ даны в промилле относительно стандарта V-PDB. Ошибка определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляет $\pm 0.15\text{‰}$ (1σ).

Результаты

По данным химического анализа, доля карбонатов в образцах достигает 95 %. Содержание главных компонентов (мас. %): CaO — от 53.09 до 54.38 и MgO — от 0.38 до 0.69. Согласно нормативному пересчету, на долю CaCO_3 приходится практически 100 %. Кальцит, слагающий известняк, содержит незначительное количество Mg^{2+} , замещающего Ca^{2+} . По рентгеноструктурным данным, карбонатный материал представлен кальцитом. Очень редко встречается доломит. Известняки в основном сложены кальцитом с низким содержанием Mg.

Электронно-микроскопическое изучение образцов показало разные структурные элементы. Микроскопическими методами выявляются ооиды (рис. 2, а–с), разные фаунистические остатки, водорослеподобные структуры. Пространство между ооидами выполнено относительно крупнозернистым кальцитом.

Ооиды представляют собой обособленные образования сферической, эллипсоидной форм, размер которых составляет от 0.5 до 0.7 мм. Для них характерно концентрическое строение. Карбонатная оболочка (кора) может состоять из одного или нескольких слоев с микрозернистым и радиально-волокнистым строением (рис. 3, а–д).

Значительное распространение в известняках получили различного рода органические остатки (рис. 4, а–д), включающие остатки фораминифер (рис. 4, b–d), например *Nodosaria* (рис. 4, b). Наблюдается выполнение полостей раковин и замещение остатков организмов тонкозернистым кальцитом. Некоторые оторочены каемками мелких кристаллов (рис. 4, d). Цемент представлен плотно прилегающими друг к другу зернами, (рис. 2, 3), обычно размером менее 150 мкм. В отличие от ооидных доломитов из этого разреза с более рыхлой упаковкой и значительной пористостью (Ветошкина, 2024), известняки представляют собой плотный агрегат.

Проведенное СЭМ-исследование показало наличие столбчатых агрегатов кальцита (рис. 5), состоящих из зерен размером от 2 до 12 мкм, и скаленоэдрических кристаллов (рис. 6), длина которых может составлять несколько сотен микрон. Иногда в порах встречаются относительно крупные зерна кальцита, достигающие 300 мкм (рис. 7). Обнаружены признаки частичного растворения кальцитовых зерен (рис. 8). Редкие зерна доломита в известняке плотно контактируют с окружающим кальцитом (рис. 9).

Электронно-микроскопические исследования образцов показали наличие различного вида углеродистых (органических) микрообразований в виде пленок и нитей, сохранившихся в различных формах. Изображения, полученные с помощью СЭМ, демонстрируют связь между карбонатами и эндолитическими микробными сообществами, такими как нитевидные бактерии (рис. 10, а, b). По текстуре нити представляют собой плотную ткань. Для них характерно сложное переплетение, иногда ветвление (рис. 10, b). Поперечный размер нитей около 15 мкм. По морфологическим при-

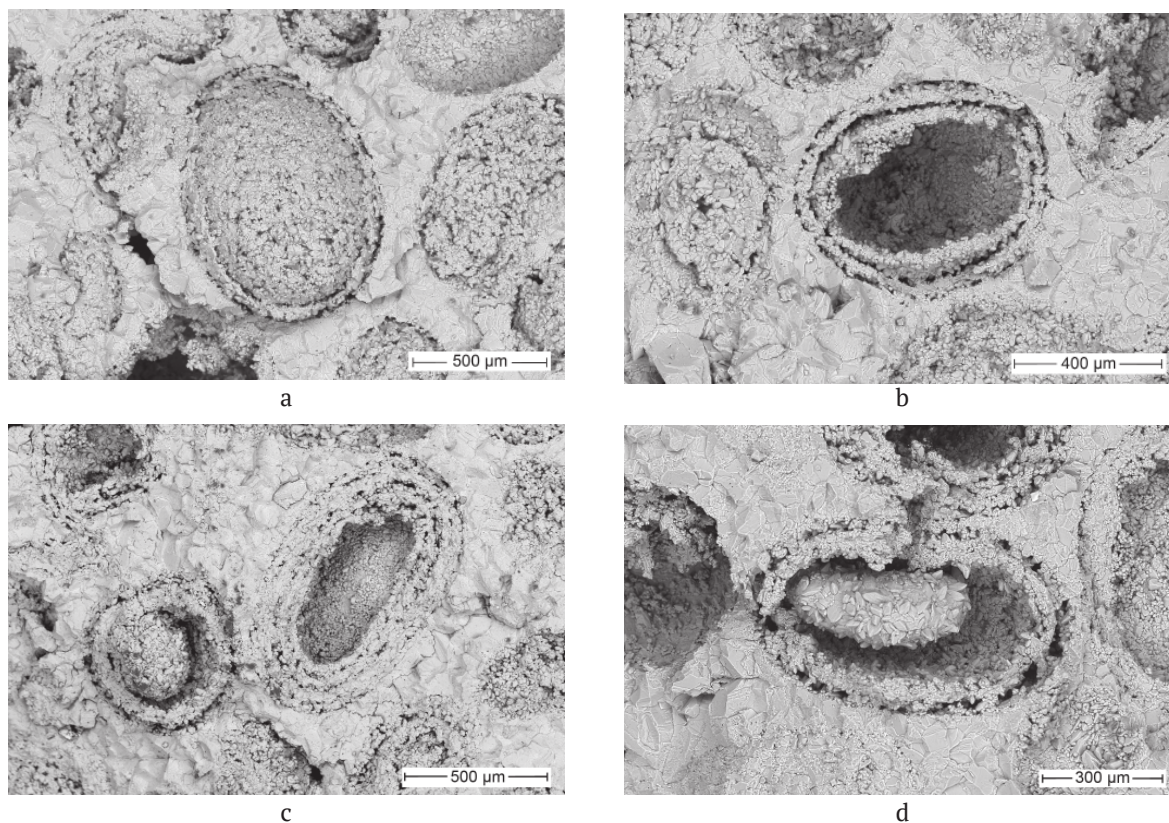


Рис. 3. Кальцитовые ооиды (сколы, режим BSE)

Fig. 3. Calcite ooids (shears, BSE mode)

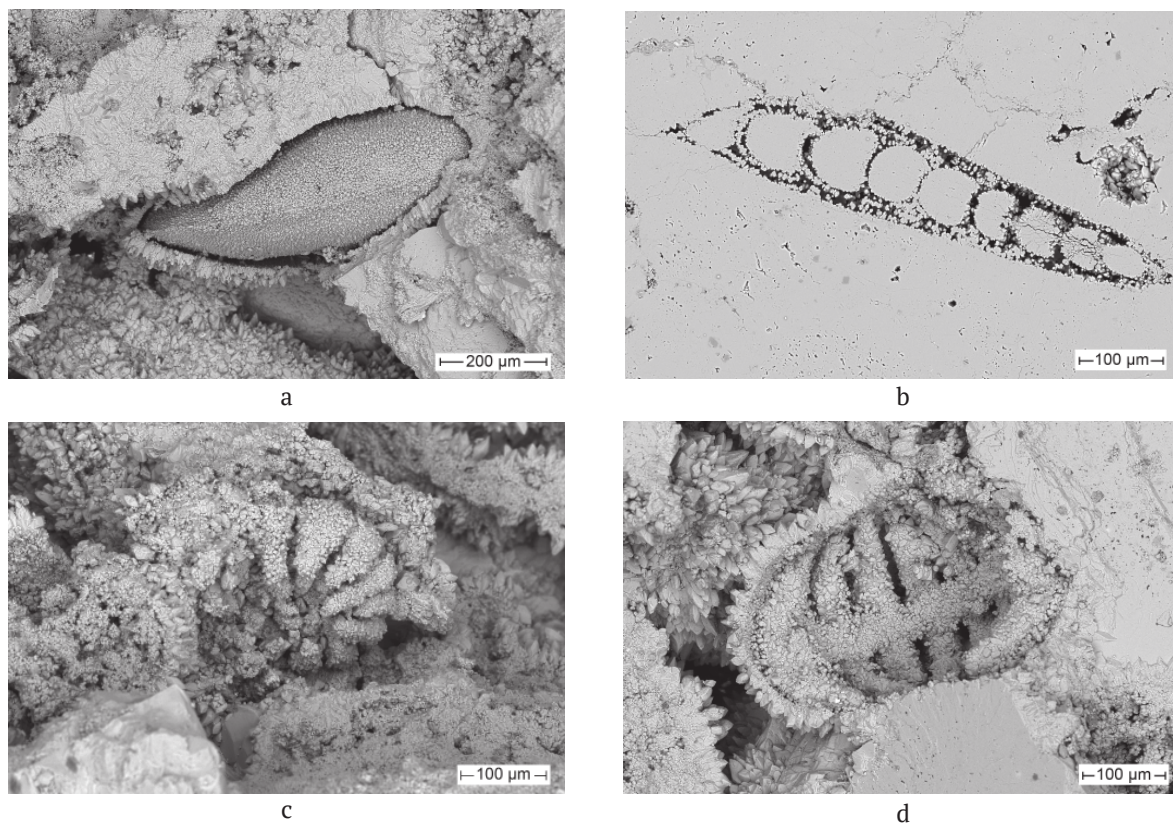


Рис. 4. Микрофоссилии (а — остракода (?); b–d — фораминиферы). а, с, d — сколы, b — аншлиф (режим BSE)

Fig. 4. Microfossils (a — ostracode (?); b–d — foraminifers). a, c, d — shears, b — polished section (BSE mode)

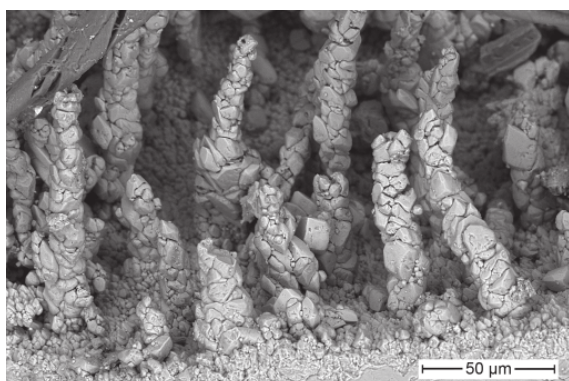


Рис. 5. Столбчатые агрегаты кальцита (скол, режим BSE)

Fig. 5. Columnar calcite aggregates (shear, BSE mode)

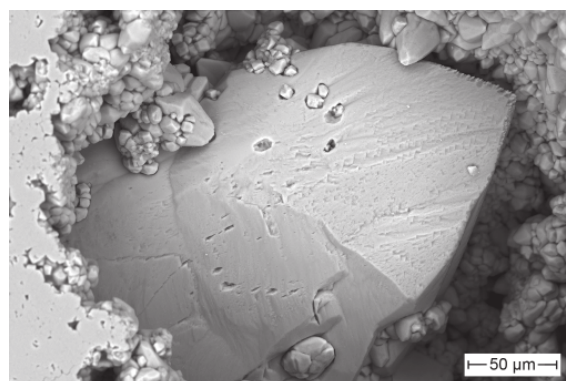


Рис. 7. Относительно крупные кристаллы кальцита в порах (аншлиф, режим BSE)

Fig. 7. Relatively large crystals of calcite in the pores (shear, BSE mode)

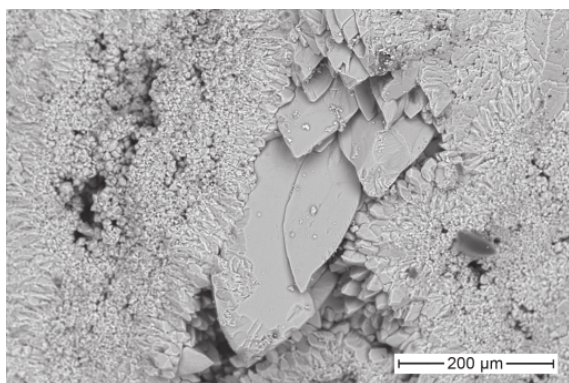


Рис. 6. Скаленоэдрические кристаллы кальцита (скол, режим BSE)

Fig. 6. Scalenohedral calcite crystals (shear, BSE mode)

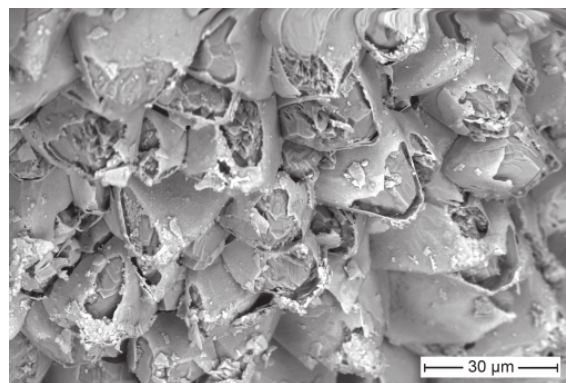


Рис. 8. Признаки растворения зерен кальцита (скол, режим BSE)

Fig. 8. Signs of dissolution of calcite grains (shear, BSE mode)

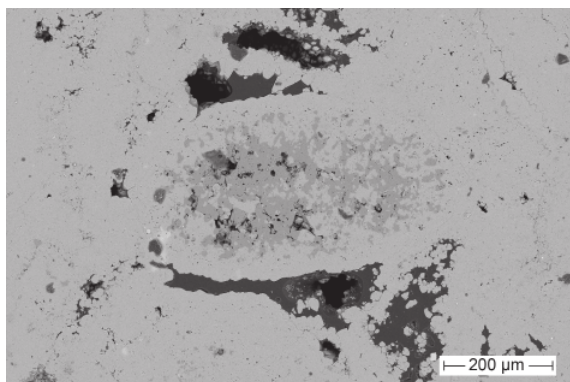


Рис. 9. Зерна доломита (тёмное) в известняке (аншлиф, режим BSE)

Fig. 9. Dolomite grains (dark) in limestone (polished section, BSE mode)

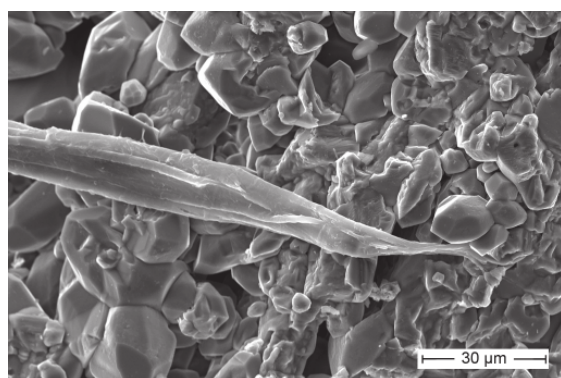
знакам, таким как форма, размер и структура поверхности, нити вполне отвечают fossilized остаткам цианобактерий (Ископаемые..., 2011). Но это определение требует уточнения.

Кроме нитей между слоями в ооидах обнаружены оболочки (рис. 10, c) органического материала (органические субстанции), которые могут быть отнесены к следам микробной активности (реликты бактериальных пленок?), а значит, они могли создать ту локальную биогеохимическую обстановку, которая обусловила выделение кальцита. В ископаемых ооидах бывшие микробиальные пленки представлены органическим веществом — липидными компонентами

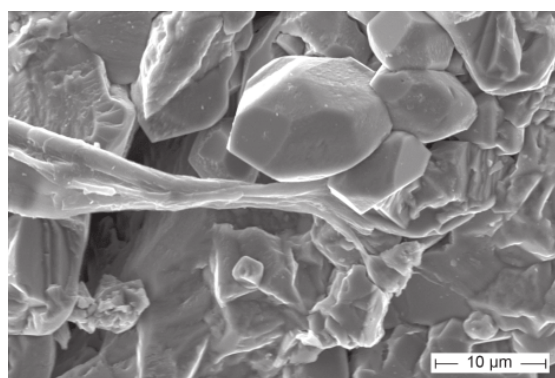
(Кузнецов, Журавлева, 2022). Морфологически эти углеродистые (органические) микрообразования, нити и пленки, не имеют резких отличий от аналогичных образований, наблюдаемых в СЭМ и описанных в других работах (Ископаемые..., 2011). Подобные образования были обнаружены в доломитах из этого разреза (Ветошкина, 2024).

В известняках выявлен еще один тип микроструктур — тонкие обволакивающие минерализованные (карбонатные) пленки (рис. 11, a, b). В межзерновых зонах и на поверхностях зерен широко распространены fossilized биопленки (биообрастания). Они часто встречаются в сочетании с нанозернистыми структурами CaCO_3 (рис. 11, b), которые по морфологии и размеру сходны с наночастицами, идентифицированными М. Р. Диазом с соавторами (Diaz et al., 2015, 2017). Нанозерна могут появляться как в виде отдельных частиц, так и в виде скоплений.

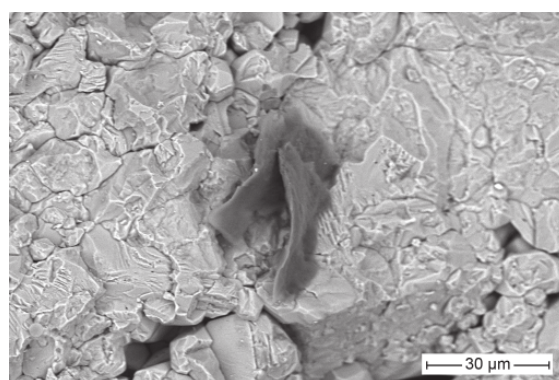
При изучении особенностей минерализации методом электронной микроскопии и микрозондового анализа было установлено широкое развитие сульфида железа в карбонатном матриксе. Одной из форм его выделения являются фрамбоиды диаметром около 10 мкм, имеющие правильную сферическую форму (рис. 12) и сложенные калиброванными по размеру микрокристаллами октаэдрического габитуса. Размер кристаллитов 1 мкм. Согласно ЭДС-спектрам, фрамбоиды представлены сульфидом железа (пиритом?). Поскольку электронно-микроскопическое изучение образца проводилось на свежих сколах, дающих лишь качественную информацию, более точное



a



b



c

Рис. 10. Углеродные микрообразования в нижнепермских ооидах: а — нитевидные формы, похожие на цианобактерии (скол, режим SE), b — детализация (скол, режим SE); c — оболочки (био пленки?) органического материала (скол, режим BSE)

Fig. 10. Carbon microformations in Lower Permian ooids: a — filamentous forms similar to cyanobacteria (shear, SE mode); b — details (shear, SE mode); c — shells (biofilms?) of organic material (shear, BSE mode)

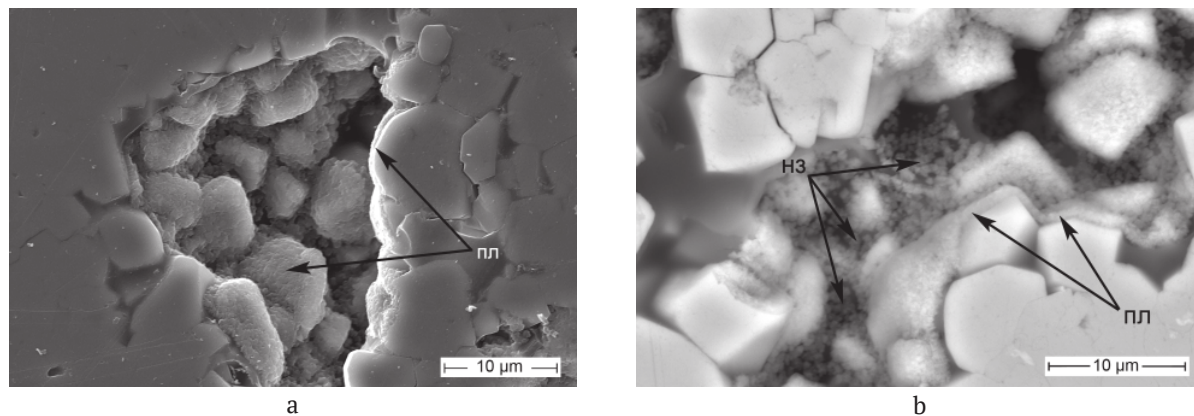


Рис. 11. Минерализованные (карбонатные) биопленки (а — аншлиф, режим SE; б — аншлиф, режим BSE).
Пл — пленки; нз — зерна

Fig. 11. Mineralized (carbonate) biofilms (a — polished section SE mode, b — polished section, BSE mode).
Пл — films; нз — grains

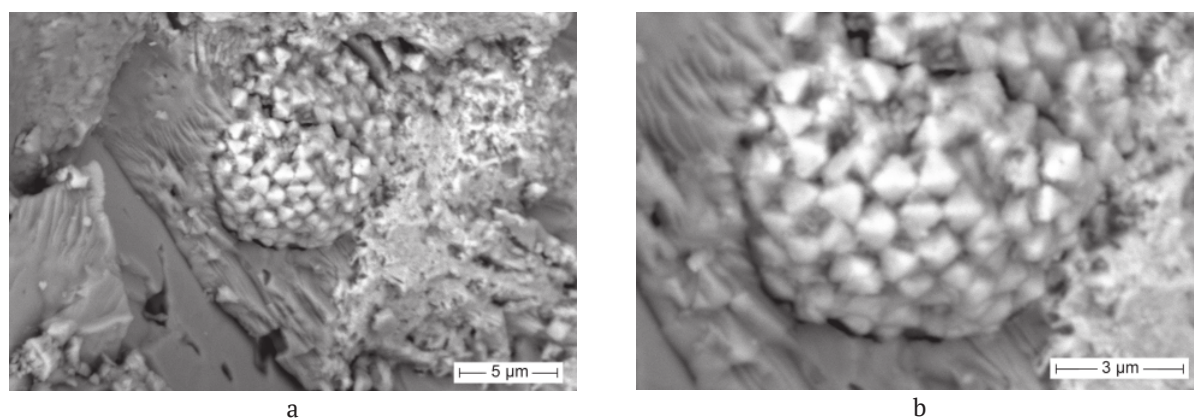


Рис. 12. Фрамбонды, представленные сульфидом железа, сложены микрокристаллами октаэдрического габитуса:
а — общий вид, б — детализация

Fig. 12. Framboids, represented by iron sulfide, are composed of octahedral habit microcrystals: a — general view, b — details

определение минерала не представляется возможным. Встречаются кристаллы сульфида железа в виде россыпи.

Судя по микронзондовым исследованиям, железо в породе не всегда присутствует в виде сульфидов. В образцах обнаружены фазы с низким содержанием серы или ее отсутствием. Форма их выделений фрамбональная (рис. 13). Минералы железа в данном случае рассматриваются как продукты окисления пирита.

В исследованных образцах были обнаружены и другие железосодержащие фазы, также, несомненно, биогенного генезиса. При большом увеличении видны мелкие округлые образования размером до 2.5 мкм (рис. 14, а, б), располагающиеся непосредственно на стенках полостей. Морфологически они вполне отвечают скоплениям современных коккоидных бактерий. Их наружная поверхность имеет ажурное строение. По результатам микронзондового анализа эти формы содержат в основном Fe, Ca, Mg и Si. В образцах встречаются и минералы Mn в виде волоконистых агрегатов.

Значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют в пределах от 4.0 до 5.6 ‰ (PDB). Диапазон изменения величин $\delta^{18}\text{O}$ составляет от -8.1 до -6.3 ‰ (PDB). Полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ отличаются от известных данных по пермским морским карбонатам.

Обсуждение

Результаты электронно-микроскопических исследований ооидных известняков указывают на сложные микробиологические процессы в диагенезе. Разнообразные микроорганизмы наряду с цианобактериями определяли протекающие в сообществе биогеохимические процессы. Присутствие нитевидных микроорганизмов в пустотах образцов, подтвержденное результатами исследований в СЭМ, позволяет предположить, что они влияли на цементацию карбонатов, принимая участие в минералообразовании. Как подтверждено в лабораторных экспериментах (Орлеанский и др., 2002) образование древних ископаемых онколитов — это не литификация кокковых организмов фитоооидного происхождения, а продукт жизнедеятельности нитчатых цианобактерий.

В процессе активной жизнедеятельности бактерии способствовали осаждению тех или иных протоминеральных фаз, возможно за счет изменения химизма среды (Бактериальная..., 2002). Некоторые метаболические процессы, осуществляемые гетеротрофными бактериями, повышали щелочность воды и способствовали осаждению карбонатов (Antoshkina et al., 2020).

Давно известно, что начало образования карбоната как в природных условиях, так и в бактериальных

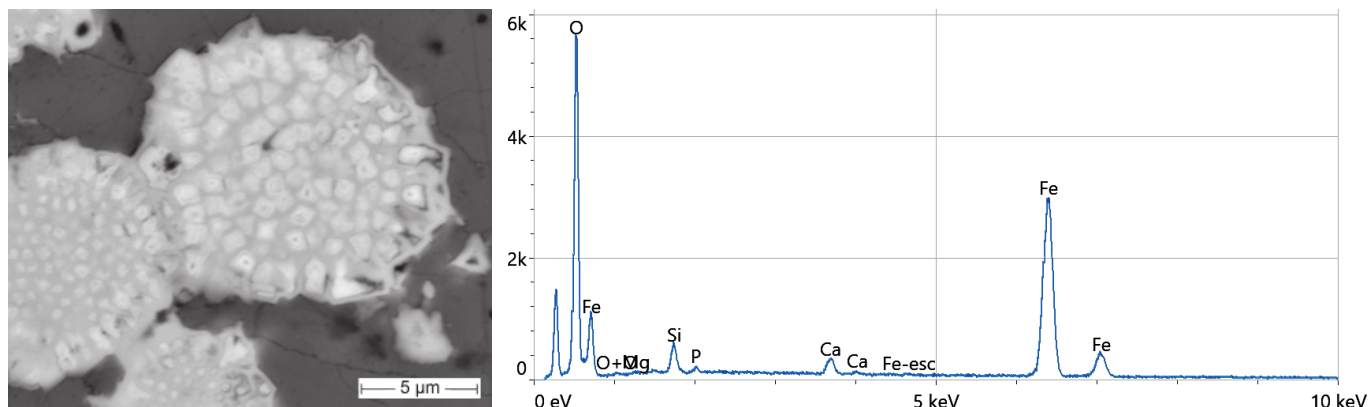


Рис. 13. Продукты окисления пирита (аншлиф, режим BSE)

Fig. 13. Pyrite oxidation products (polished section, BSE mode)

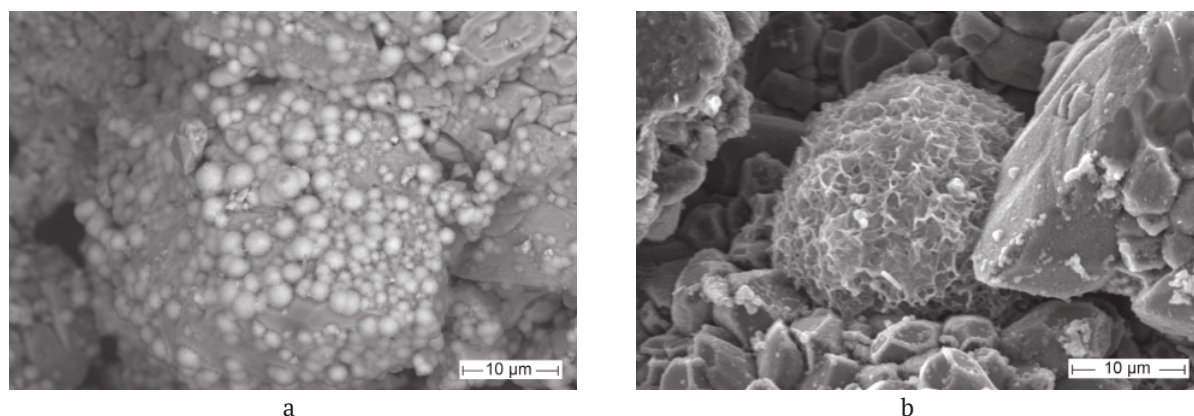


Рис. 14. Скопления коккоидных фоссилизированных бактерий (a — скол, режим BSE; b — скол, режим SE)

Fig. 14. Clusters of coccoid fossilized bacteria (a — shear, BSE mode, b — shear, SE mode)

культурах происходит в слизистых выделениях бактерий (Исаченко, 1950). Микроорганизмы, развиваясь на поверхности твердых субстратов, образовывали на ней биопленки (биообрастания), которые претерпевали ряд превращений, связанных с жизнедеятельностью присутствующих здесь микроорганизмов. Иногда благодаря фоссилизации сохранялись разные стадии развития биопленок. На ископаемом материале видим результат преобразования и минерализации биообрастаний.

По мнению некоторых исследователей (Шульц, 1962; Diaz, Eberli, 2022), продуктом бактериальной деятельности сначала являлись аморфные карбонаты. При формировании каждого концентрического слоя осаждался слой аморфного вещества, а затем происходило постепенное образование микрокристаллов кальцита (Шульц, 1962; Diaz, Eberli, 2022). При исследовании природы и механизма образования ооидов в палеозойских карбонатных породах ранее было отмечено присутствие зародышей нанозерен карбоната кальция в биопленках на поверхностях и в структуре образовавшихся ооидных корок (Antoshkina et al., 2020). Развитие ACC приводило к появлению кристаллической фазы карбоната кальция, создающей новый слой оболочки поверх существующего слоя (Antoshkina et al., 2020). Раннедиагенетическое карбонатообразование изначально регулировалось биологическими механизмами, тесно связанными с метаболическими взаимодействиями и биопленками, которые сначала представляли слизистую оболочку.

В настоящей работе получены новые данные, представляющие дополнительные свидетельства предложенным ранее моделям органоминарализации при образовании ископаемых ооидов. В нижнепермских кальцитовых ооидах видны начальные стадии отложения аутигенного вещества. На пленке сохранились субмикроскопические выделения карбоната кальция (рис. 11), которые служили основой для роста кристаллов. Затем формировался минеральный карбонатный прослой.

Как видно, биопленки служили центрами зарождения зародышей для осаждения карбоната, создавая условия пересыщения растворов при выделении карбонатов (Dupraz, Visscher, 2005; Diaz, Eberli, 2019). Присутствие нанозерен в межзерновых пространствах является индикатором микробиологической органоминарализации (Diaz et al., 2017; Diaz, Eberli, 2022).

Полученные данные согласуются с предыдущими исследованиями, в которых подчеркивается, что карбонаты являются микробиологически индуцированными образованиями, формированию которых способствовала активность микробов и/или слизистых органических веществ (O'Reilly et al., 2017).

Пирит — часто встречающийся компонент в богатых органическим веществом известняках. Изучение особенностей морфологии, строения агрегатов и локализации пирита позволяет связать его происхождение с деятельностью бактерий в местах развития микрোকолоний, в которых и шло его формирование на стадии диагенеза в ходе деятельности сульфатредуцирующих бактерий.

Изотопные показатели карбонатов ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$) в известняках, скорее всего, являются общими значениями нескольких генераций карбонатов, которые перекрывают биологические изотопные характеристики исходного осадка. Изотопный состав углерода (до 5.6 ‰ PDB) и кислорода (до -6.3‰ PDB) в карбонатных породах указывает на небольшое повышение величины $\delta^{13}\text{C}$ и понижение $\delta^{18}\text{O}$ по сравнению с морскими известняками. Такие отклонения от морских показателей указывают на диагенетические отпечатки на изученных породах. Величины $\delta^{13}\text{C}$ для осадочных карбонатов в условиях полного равновесия с атмосферной CO_2 в современных обстановках обычно не превышают +5 ‰. Нахождение относительно тяжелых по углероду карбонатов в осадочном комплексе нижнепермского разреза (до 5.6 ‰) обусловлено особенностями карбонатонакопления. Скорее всего, небольшое повышение величины $\delta^{13}\text{C}$ известняков может быть связано с повышением продуктивности в бассейне осадконакопления (Фор, 1989). Высокие значения $\delta^{13}\text{C}$ в осадках с высокой продуктивностью фиксируются и в современных бассейнах. Предполагается, что обогащение ^{13}C пород обусловлено преимущественным извлечением ^{12}C органическим веществом в замкнутых бассейнах (Фор, 1989).

Выводы

Результаты электронно-микроскопических исследований нижнепермских ооидных известняков показали, что разнообразные микроорганизмы наряду с цианобактериями определяли протекающие в сообществе биогеохимические процессы. В процессе активной жизнедеятельности бактерии катализировали осаждение различных протоминеральных фаз. Развиваясь на поверхности твердых субстратов, микроорганизмы образовывали на ней биопленки (биообращаения), которые претерпевали превращения, связанные с их жизнедеятельностью. Иногда благодаря фоссилизации сохранялись разные стадии развития биопленок. В структуре образовавшихся ооидных корок отмечено присутствие нанозерен карбоната кальция, которые служили основой для роста кристаллов. В этом механизме (пассивное осаждение) биопленки служат центрами оообразования зародышей для осаждения карбоната.

Автор выражает благодарность В. А. Радаеву за помощь в проведении электронно-микроскопических исследований и микронзондового анализа.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600013-9).

Литература / References

- Астафьева М. М., Розанов А. Ю., Хувер Р. Фрамбоиды: их структура и происхождение // Палеонтол. журн. 2005. № 5. С. 1—7.
- Astafieva M. M., Rozanov A. Yu., Huver R. Framboids: their structure and origin. Paleontol. J., 2005, No. 5, pp. 1—7. (in Russian)
- Бактериальная палеонтология / С. С. Абызов и др.; под ред. А. Ю. Розанова. М.: ПИН РАН, 2002. 188 с.
- Bacterial paleontology. S. S. Abyzov et al., ed. by A. Yu. Rozanov. Moscow: PIN RAS, 2002, 188 p. (in Russian)
- Ветошкина О. С. Результаты электронно-микроскопических исследований нижнепермских ооидных доломитов (Южный Тиман) // Вестник геонаук. 2024. 9(357). С. 12—20. DOI: 10.19110/geov.2024.9.2
- Vetoshkina O. S. Results of electron microscopic studies of Lower Permian ooid dolomites (Southern Timan). Vestnik of Geosciences, 2024, No. 9(357). (in Russian)
- Ветошкина О. С., Радаев В. А. Биогенные микроструктуры в нижнепермских карбонатных отложениях, Южный Тиман // Литогенез и минерогенез осадочных комплексов докембрия и фанерозоя Евразии: Материалы X Международного совещания по литологии (Воронеж, ВГУ, 18–23 сентября 2023 г.). Воронеж, 2023. С. 56–60.
- Vetoshkina O. S., Radaev V. A. Biogenic microstructures in Lower Permian carbonate deposits, Southern Timan. Lithogenesis and minerageny of Precambrian and Phanerozoic sedimentary complexes of Eurasia. Proceedings of the 10th International Meeting on Lithology (Voronezh, VSU, September 18–23, 2023). Voronezh, 2023, pp. 56–60. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Тиманская. Лист Р-40-XX (Тимшер). Объяснительная записка / С. И. Кириллин, В. А. Жарков, А. В. Шумилов и др.; Минприроды России, Роснедра, ЗАО ГГК «МИРЕКО», ОАО «Полярноуралгеология», Вычегодская ГРЭ. М.: Моск. филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021.
- State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:200,000. Second edition. Timan Series. Sheet P-40-XX (Timsher). Explanatory Note. S. I. Kirillin, V. A. Zharkov, A. V. Shumilov, et al.; Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Rosnedra, MIREKO, Polar Uralgeologiya, Vychegodskaya GRE. Moscow: Moscow branch of VSEGEI, 2021. (in Russian)
- Исаченко Б. Л. Геологическая деятельность микробов // Природа. 1950. № 8. С. 34—47.
- Isachenko B. L. Geological activity of microbes. Nature, 1950, No. 8, pp. 34—47. (in Russian)
- Ископаемые бактерии и другие микроорганизмы в земных породах и астроматериалах / М. М. Астафьева и др.; под ред. А. Ю. Розанова, Г. Т. Ушатинской. М.: ПИН РАН, 2011. 172 с.
- Fossil bacteria and other microorganisms in terrestrial rocks and astromaterials. M. M. Astafieva et al., edited by A. Yu. Rozanov, G. T. Ushatinskaya. Moscow: PIN RAS, 2011, 172 p. (in Russian)
- Кузнецов В. Г., Журавлева Л. М. Микробиальные карбонатные породы: состав, структуры, текстуры, механизмы и обстановки образования. Процессы и обстановки образования микробиолитов. Статья 2 // Изв. вузов. Геология и разведка. 2022. № 64 (4). С. 10—21.
- Kuznetsov V. G., Zhuravleva L. M. Microbial carbonate rocks: composition, structures, textures, mechanisms and environments of formation. Processes and environments of microbiolite formation. Article 2. News of universities. Geology and exploration, 2022, No. 64 (4), pp. 10—21. (in Russian)
- Орлеанский В. К., Герасименко Л. М., Пауль Р. К., Жегалло Е. А. Осцилляториевые цианобактерии — продуценты онколитов группы Osagia // Бактериальная палеонтология: Тез. докл. междунар. конф., 21—23 мая 2002 г. / ПИН РАН. М., 2002. С. 58.
- Orleanskiy V. K., Gerasimenko L. M., Paul R. K., Zhegallo



- E. A. Oscillatorium cyanobacteria — producers of oncolites of the Osagia group. Bacterial paleontology: Abstracts of reports of the international. conf., May 21—23, 2002, PIN RAS. Moscow, 2002, p. 58. (in Russian)
- Фоп Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
- Faure G. Fundamentals of Isotope Geology. Moscow: Mir, 1989, 590 p. (in Russian)
- Шульц С. С. Оолитообразование в современных осадках северной части Каспийского моря // Информ. сб. ВСЕГЕИ. 1962. № 57. С. 61—75.
- Shultz S. S. Oolitic Formation in Modern Sediments of the Northern Caspian Sea. Inform. collection of VSEGEI, 1962, No. 57, pp. 61—75. (in Russian)
- Antoshkina A. I., Zhegallo E. A., Isaenko S. I. Microbially mediated organomineralization in Paleozoic carbonate ooids // Paleontological Journal. 2020, 54. No. 8. P. 17—26.
- Diaz M. R., Eberli G. P. Decoding the mechanism of formation in marine ooids: a review. Earth Sci. Rev. 2019. 190, P. 536—556. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.016>
- Diaz M. R., Eberli G. P., Blackwelder P., Phillips B., Swart, P. K. Microbially mediated organomineralization in the formation of ooids. Geology. 2017. 45. P. 771—774.
- Diaz M. R., Eberli G. P. Microbial contribution to early marine cementation // Sedimentology. 2022. 69. P. 798—822.
- Diaz M. R., Swart P. K., Eberli G. P., Oehlert A. M., Devlin Q., Saied A. and Altabet M. A. Geochemical evidence of microbial activity within ooids / Sedimentology. 2015. 62. P. 2090—2112. <https://doi.org/10.1111/sed.12218>
- Dupraz C., Visscher P. T. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. Trends Microbiol. 2005. 13. P. 429—438.
- Folk R. L., Lynch F. L. Organic matter, putative nannobacteria and the formation of ooids and hardgrounds. Sedimentology. 2001. 48. P. 215—229.
- Harris P. M., Diaz M. R., Eberli G. P. The formation and distribution of modern ooids on Great Bahama Bank. Ann. Rev. Mar. Sci. 2019. 11. P. 491—516.
- O'Reilly S. S., Mariotti G., Winter A. R., Newman S. A., Matys E. D., McDermott F., Pruss S. B., Bosak T., Summons R. E. and Klepac-Ceraj V. Molecular biosignatures reveal common benthic microbial sources of organic matter in ooids and grapestones from Pigeon Cay, The Bahamas. Geobiology. 2017. 15. P. 112—130.

Поступила в редакцию / Received 06.06.2025

Результаты анализа современных данных геоэкологического мониторинга заброшенного Тырныаузского хвостохранилища

А. Х. Шерхов

Высокогорный геофизический институт, Нальчик, Россия

fff.ddd.11@mail.ru

Значительная активизация в последние десятилетия негативных природных явлений в горах обуславливает растущую актуальность проблемы безопасного содержания накопителей отходов горнодобывающей промышленности. В статье рассматривается ситуация, сложившаяся на хвостохранилище Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК). В процессе исследования реализованы современные технологии мониторинга, позволяющие получать максимально достоверные данные в оперативном режиме. В рамках работы выявлены уязвимые места, участки, подверженные риску размыва. В качестве мер предохранения основной дамбы от разрушения предложены варианты обеспечения проектной пропускной способности водоотводным тоннелем, а также восстановления работоспособности открытого аварийного водоотводного канала.

Ключевые слова: хвостохранилище, селевой поток, экологическая катастрофа, мониторинг, токсичные отходы

Results of analysis of modern geoecological monitoring data of the abandoned Tyrnyauz tailings facility

A. Kh. Sherkhov

High-Mountain Geophysical Institute, Nalchik, Russia

The significant intensification of negative natural phenomena in mountainous areas in recent decades has increased the urgency of ensuring the safe maintenance of tailings storage facilities for the mining industry. The article examines the situation at the tailings storage facility of the Tyrnyauz Mining and Processing Complex. During the research, modern monitoring technologies were implemented, enabling the acquisition of highly reliable data in real-time. As part of the work, vulnerable areas and sections prone to washout risk were identified. As protective measures for the main dam to prevent failure, options have been proposed to ensure the design discharge capacity of the drainage tunnel and to restore the operational functionality of the open emergency spillway channel.

Keywords: tailings pond, mudflow, environmental disaster, monitoring, toxic waste

Введение

Современные изменения климата, сопровождающиеся нарушением устоявшегося баланса температуры и влажности в горах, приводят к увеличению частоты экстремальных погодных явлений, создавая предпосылки для активизации опасных склоновых и русловых процессов (Мальнева, 2023; Лехатинов, 2020). Таким образом, возникает угроза безопасной жизнедеятельности на селитебных территориях там, где ранее присутствие подобных рисков не отмечалось. В этом контексте геоэкологический мониторинг промышленно-индустриальных объектов, расположенных в горной местности, таких как хвостохранилища, становится неотъемлемой частью стратегии предотвращения техногенных катастроф (Дубинин, 2016; Ковлеков, 2016; Мельников, 2015; Шабалина, 2016). Так, серьезные опасения в настоящий момент вызывает ситуация, складывающаяся на заброшенном хвостохранилище ТГОК (Валиев, 2025; Запороженченко, 2019с). Глобальные климатические изменения сказались на гидрологической системе бассейна р. Гижгит (Эльбрусский район Кабардино-Балкарской республики, между Скалистым

и Передовым хребтами), в пойме которой было запроектировано хвостохранилище. Так, согласно прогнозным оценкам изменения климата (Ледники..., 2020; Третий..., 2022), в данном районе в течение всего XXI в. продолжится рост зимних и летних температур, увеличатся максимальные суточные суммы осадков (для зимы — более чем на четверть). Это означает, что осадки будут выпадать в виде более интенсивных ливней и снегопадов. Сейчас почти в 80 % случаев осадки имеют интенсивность до 10 мм/сутки. Однако отмечается тенденция к увеличению количества дождей интенсивностью более 20 мм/сутки, которая может рассматриваться как селеобразующая для Центрального Кавказа (Сейнова, 2018). Вследствие текущих изменений с начала 2000-х годов р. Гижгит стала пропускать значительные паводки в селевом режиме (2002, 2014 гг.) Водоотводная инфраструктура комплекса накопителя отходов ТГОК, и без того находящаяся в крайне запущенном состоянии, не рассчитана на пропуск селевых потоков, и при развитии событий по негативному сценарию возможно переполнение водоема-отстойника с переливом потока через отсечную дамбу и выходом

Для цитирования: Шерхов А. Х. Результаты анализа современных данных геоэкологического мониторинга заброшенного Тырныаузского хвостохранилища // Вестник геонаук. 2025. 9(369). С. 28–35. DOI: 10.19110/geov.2025.9.4

For citation: Sherkhov A. Kh. Results of analysis of modern geoecological monitoring data of the abandoned Tyrnyauz tailings facility. Vestnik of Geosciences, 2025, 9(369), pp. 28–35, doi: 10.19110/geov.2025.9.4



его на пляж хвостохранилища (Докукин, 2020; Шерхов, 2022). Такое положение чревато переувлажнением складированной массы токсичных отходов (118 млн т) и размывом основной дамбы хвостохранилища, что, в свою очередь, приведет к образованию катастрофического по своим масштабам селевого потока, выходящего в р. Баксан.

Оптимальным способом контроля ситуации на данном объекте представляется регулярное проведение геоэкологического мониторинга ландшафта территории с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Выбор этого метода исследований обусловлен тем, что материалы разновременной аэрофотосъемки путем цифровой обработки позволяют с минимальными затратами и в оперативном режиме получать данные, сопоставительный анализ которых дает возможность с высокой степенью достоверности отслеживать изменения геоморфологических параметров ландшафта обследуемых участков. Целью таких обследований является прогностическая оценка динамики рисков техногенного характера на территории прилегающей к хвостохранилищу ТГОК вследствие селепроявлений по р. Гижгит.

В настоящей работе ставилась задача определения пространственно-временных изменений морфометрических параметров сегментов ландшафта гидротехнических сооружений (ГТС) ТГОК, характеризующихся очевидными предпосылками возникновения чрезвычайных ситуаций. Наибольшие опасения вызывают: водоотводный тоннель № 2, отводящий воду р. Гижгит мимо хвостохранилища в р. Баксан; открытый аварийный канал, построенный в 2007 году с целью отвода потока в случае перекрытия/завала входного портала водоотводного тоннеля; отсечная дамба, препятствующая выходу потока на пляж хвостохранилища и перенаправляющая его в створ открытого аварийного канала.

Объект исследований

Заброшенное хвостохранилище ТГОК является крупнейшим на Северном Кавказе накопителем отходов добычи молибденовой и вольфрамовой руды — мелкозернистой грунтовой массы (пульпы), содержащей до 30 разновидностей химических элементов и их соединений, в том числе и высокотоксичных. Детальное устройство этого объекта подробно описано в многочисленных современных исследованиях, посвященных проблемам промышленной безопасности и экологии (Бортников и др., 2013; Гегиев и др., 2018; Докукин и др., 2020; Запороженченко и др., 2019a–d; Запороженченко, 2004a, b; 2014, 2015). Ниже приведены некоторые его характеристики, актуальные в настоящей работе.

Сооружение, спроектированное Ленинградским институтом «Гипронибель» и построенное в середине XX века, введено в эксплуатацию в 1966 году, с проектной емкостью накопителя 180 млн м³. На момент остановки работ на Тырныаузском ГОК в 1997 году накопленный объем отходов горнодобывающего производства составил 118 млн м³. Эта масса удерживается каскадом насыпных грунтовых дамб, сформированных в устье р. Гижгит (левого притока р. Баксан). Перепад высот между подпорной стенкой (нижний бьеф) и верхней точкой насыпи (верхний бьеф) составляет 168 м,

а абсолютная отметка гребня плотины достигает 1245 м над уровнем моря, длина плотины — 1400 м. Низовой откос плотины имеет критическую крутизну (12.5°), что создает риск сдвиговых деформаций. В основании плотины наблюдается постоянное фильтрационное высачивание воды. Для регулирования возможного перелива из водоема-отстойника хвостохранилища (так называемого «озера Гижгит») емкостью ~1–1.2 млн м³ была построена отсечная дамба.

Сток самой р. Гижгит в р. Баксан осуществляется в обход накопителя по бетонному тоннелю длиной 3600 м и сечением 3 × 3 м. Перепад высот от входного портала тоннеля до выхода в р. Баксан — более 210 м, расчетная пропускная способность — 65 м³/с.

На рисунке 1 представлена схема расположения объектов хвостохранилища и прилегающей территории.

Необходимо отметить, что рассматриваемое сооружение относится к первому классу капитальности, что подчеркивает его исключительную значимость и высочайший уровень ответственности. Разрушение или авария данного объекта способны повлечь за собой катастрофические последствия для близлежащих населенных пунктов и промышленных предприятий, а также привести к масштабному химическому загрязнению источников питьевого водоснабжения, водоемов и водотоков. Потенциальная опасность объекта многократно усугубляется его непосредственной близостью к жилой зоне. Менее чем в одном километре ниже, на противоположном (правом) борту Баксанского ущелья расположено сельское поселение Былым, население которого составляет более 2000 человек. Таким образом, в случае нарушения целостности сооружения угрозе подвергается жизнь и здоровье тысяч людей, а также уникальная экосистема всего региона.

Поскольку в районе исследований отмечены оползневые и селевые проявления, следует упомянуть о геологическом строении района исследований и гидрогеологической ситуации. Согласно данным Государственной геологической карты масштаба 1 : 200 000 (Геологическая..., 2004), борта и днище долины бассейна р. Гижгит, в пойме которой было запроектировано хвостохранилище, сложены осадочными (сцементированными и несцементированными) и метаморфическими породами. Выходы магматических пород единичны. По всей долине, за исключением нивального пояса, наблюдаются выходы грунтовых вод, дешифрируемые на снимках, в том числе по смене растительности. В силу особенностей геологического строения эти участки переувлажнены и часто подвержены оползневым процессам, а также массовому смещению рыхлого обломочного материала по склонам.

Методы исследования

Объектами пристального внимания специалистов на протяжении последних двух десятилетий являются элементы ГТС комплекса, нуждающиеся в адаптации к изменившимся природным условиям. Регулярные наблюдения ведутся с начала 2000-х до настоящего времени, при этом с 2021 года обследования проводятся с применением беспилотных летательных аппаратов и специализированного программного обеспечения (ПО) для обработки получаемых с них данных.



Рис. 1. Схема хвостохранилища Тырнаузского горно-обогатительного комбината на основе космоснимка сервиса GoogleEarth: 1 — селевые отложения 2002, 2014 гг. в русле р. Гижгит на подходе к входному portalу водоотводного тоннеля № 2; 2 — входной портал водоотводного тоннеля № 2; 3 — водоотводный тоннель № 2; 4 — основной водоем-отстойник, емкость — 1–1,2 млн м³; 5 — отсечная плотина при выходе на пляж хвостохранилища; 6 — оползневой участок по правому борту водоотводного канала; 7 — гребень основной плотины; 8 — аварийный открытый водоотводный канал; 9 — расположение очагов высачивания фильтрационных вод в теле основной плотины; 10 — выходной портал водоотводного тоннеля № 2; 11 — русло р. Баксан; 12 — федеральная автодорога; 13 — с. п. Былым

Fig. 1. Scheme of the tailings dam of the Tyrnauz Mining and Processing plant based on a Google Earth satellite image: 1 — mudflow deposits of 2002, 2014 in the Gizhgits riverbed on the approach to the entrance portal of the drainage tunnel No 2; 2 — entrance portal of the drainage tunnel No 2; 3 — drainage tunnel No 2; 4 — main reservoir-settling tank, capacity — 1–1.2 million m³; 5 — cut-off dam at the exit to the beach of the tailings dam; 6 — landslide section on the starboard side of the drainage channel; 7 — crest of the main dam; 8 — emergency open drainage channel; 9 — location of filtration water seepage foci in the body of the main dam; 10 — exit portal of the drainage tunnel No 2; 11 — Baksan riverbed; 12 — federal highway; 13 — village of Bylym

Наземные рекогносцировочные обследования проводились в рамках текущего этапа геоэкологического мониторинга хвостохранилища 19.06.2025 г. специалистами совместной группы ФГБУ «ВГИ» и ГУ МЧС России по КБР с применением БПЛА «Геоскан» и DJI Mavic Air 2. Параметры полетов задавались с учетом особенностей аэрофотосъемки в горной местности: в ясную погоду; на высоте, соответствующей рельефу (в нашем случае 150 — 280 м от точки взлета); с ориентацией маршрутов перпендикулярно к направлению склона для достижения максимальной эффективности функции расчёта маршрута с учётом цифровых моделей рельефа/местности (ЦМР/ЦММ); с ориентацией маршрута посадки против направления ветра и пр. Режимы съемки подбирались в зависимости от используемого аппарата, а также условий рельефа и площади исследуемой территории. Применялось продольное и поперечное перекрытие 75 × 75 %; во избежание расфокусировки камеры на высотах ниже 200 м непосредственно перед вылетом настраивался автофокус.

Цифровая обработка материалов аэрофотосъемки выполнялась с использованием программного обеспечения группы компаний «Геоскан»: Agisoft Photoscan для фотограмметрической обработки снимков и Agisoft Metashape Professional для создания геопривязанных ортофотопланов, ЦМР/ЦММ и текстурированных 3D-моделей.

Обработка данных БПЛА включала в себя несколько этапов. На первом этапе осуществлялось выравнивание снимков и генерация опорных точек с использованием профильного программного обеспечения. В

процессе калибровки и исключения дефектных кадров было отбраковано 28 из более чем 500 фотографий. В результате для двух разновременных проектов (2021 и 2024 гг.) было сгенерировано 461 тыс. опорных точек.

На основе этих данных было построено плотное облако объемом 167.7 млн точек, формирующее дискретную пространственную модель территории. Последующая генерация цифровой модели местности (ЦММ) выявила наличие шумовых артефактов в виде интерференционных волн на границах съемочного полигона, что обусловлено геометрическими искажениями краевых участков снимков. Для минимизации данных эффектов рекомендуется планировать съемку с буферной зоной, превышающей границы изучаемого объекта.

Завершающим этапом являлось создание ортофотоплана, обеспечивающего детальный анализ визуальных характеристик поверхности. Проведенный сравнительный анализ разновременных 3D-моделей позволил количественно оценить пространственно-временную трансформацию рельефа изучаемого участка хвостохранилища.

Результаты и обсуждение

Ключевым фактором развития событий по негативному сценарию (разрушение основной дамбы хвостохранилища с последующим выходом селевого потока катастрофических масштабов в р. Баксан) в случае значительных селепроявлений по р. Гижгит является перекрытие грязекаменным потоком входного

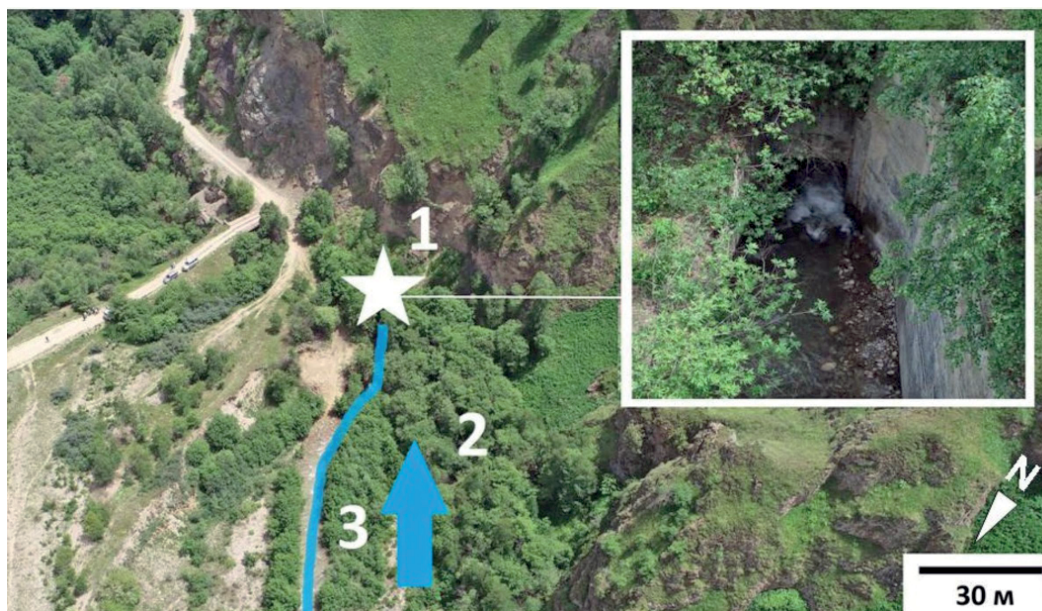


Рис. 2. Входной портал водоотводного тоннеля № 2: 1 — приемный оголовок тоннеля; 2 — залесенные отложения в пойменном участке р. Гижигит перед тоннелем; 3 — современное русло р. Гижигит (стрелкой показано направление течения). Фото с квадрокоптера ГУ МЧС России по КБР. 19.06.2025

Fig. 2. Entrance portal of drainage tunnel No. 2: 1 — receiving end of the tunnel; 2 — forested sediments in the flood plain area of the Gizhgit river in front of the tunnel; 3 — modern bed of the Gizhgit river (the arrow shows the direction of the current). Photo from the quadcopter of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the KBR. 06/19/2025

отверстия водоотводного тоннеля № 2 и переполнение в дальнейшем водоема-отстойника хвостохранилища. В этом случае во избежание выхода селя на поверхность пляжа отходов с размывом и переувлажнением складированной массы необходимо контролируемое отведение потока отсечной дамбой в приемный створ аварийного водоотводного канала. Русло канала, в свою очередь, на всем протяжении должно сохранять пропускную способность, достаточную для обеспечения безопасного прохода по нему значительных паводков в селевом режиме. В противном случае воз-

можен выплеск потока влево, на правую оконечность основной плотины с последующим её размывом и разрушением.

Со времени остановки работы горно-обогатительного комбината в 1997 году тоннель № 2 не подвергался сколь-нибудь серьезной ревизии профильных организаций, поэтому данных о внутреннем его состоянии нет. С учетом отсутствия в последние два десятилетия сороудерживающей сетки на приемном отверстии тоннеля возникают вопросы по части сохранения им изначально запроектированной пропускной способ-



Рис. 3. Оползневой участок в русле открытого аварийного водосброса. Синей линией обозначен водоотводный канал, пунктиром — фрагмент русла, заваленный оползнем. Фото с квадрокоптера ГУ МЧС России по КБР. 19.06.2025

Fig. 3. A landslide section in the channel of an open emergency spillway. The blue line indicates the drainage channel, the dotted line — a fragment of the riverbed blocked by a landslide. Photo from the quadcopter of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the KBR. 06/19/2025

ности. Из негативных изменений на момент проведения последнего обследования 19.06.2025 г. следует отметить скопление обломочного материала вдоль правой стенки входного оголовка приемного отверстия, а также значительное увеличение объема растительности в течение периода 2021–2025 гг. на селевых отложениях 2002, 2014 гг. в русле перед входным порталом тоннеля (рис. 2).

Во избежание выхода потока на пляж хвостохранилища в случае перекрытия селевыми отложениями входного отверстия водоотводного тоннеля и переполнения водоема отстойника в 2007 году справа от основной плотины по инициативе Северо-Кавказского института по проектированию водохозяйственного и мелиоративного строительства было начато сооружение открытого аварийного водоотводного канала, которое не было завершено. При этом вследствие подрезки коренного склона активизировался оползень, заваливший русло канала в верхней его части на участке протяженностью 75 м. Согласно результатам сопоставительного анализа по данным съемки БПЛА за 2021–2025 гг., ортофотопланов и ЦММ указанного участка (рис. 3), подвижек оползневого тела не выявлено.

Также не оправдались опасения о накоплении в русле канала потенциального селевого материала в виде осыпающихся грунтово-осколочных масс. Постепенное заполнение русла канала осыпающимися обломками, помимо снижения его пропускной способности ведет к накоплению селеобразующего материала. Сопоставление цифровых моделей местности в границах аварийного водосброса (полигона) позволяет сравнить изменения объемов накоплений в русле канала и численно оценить динамику его засорения (рис. 4).

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы, в русле водоотводного канала за период 2021–2024 гг. не произошло сколь-нибудь существенных изменений объема. Разница значений внутреннего объема русла канала едва превы-

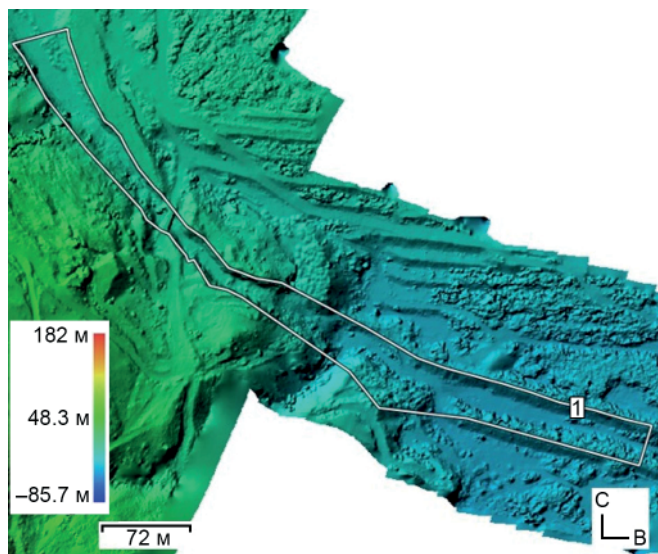


Рис. 4. Границы построенного полигона на цифровой модели рельефа, по которым определены изменения объемов накоплений в канале

Fig. 4. Boundaries of the constructed polygon on the digital elevation model, according to which changes in the volumes of accumulations in the channel are determined

Таблица 1. Внутренние объемы русла открытого аварийного канала в границах обозначенного полигона

Table 1. Internal volumes of the open emergency channel bed within the boundaries of the designated landfill

Внутренний объем русла аварийного канала Internal volume of the emergency channel bed	
2021 год / year	2024 год / year
92 622 м ³	93 293 м ³

шает 1 %, причем в сторону увеличения со временем. Данное расхождение в значениях безусловно укладывается в диапазон погрешностей и, скорее всего, вызвано разницей в объеме растительности в русле на моменты проведения съемок, поскольку при съемке, обработке данных и оцифровке поросль принимается программой за рельеф.

Анализ ЦММ зоны сопряжения отсечной дамбы и русла открытого аварийного водосброса показывает минимальный (около 1 м) перепад по высоте от выхода на дорогу, проходящую с дамбы по пляжу хвостохранилища к подножию плотины. Таким образом, риск выплеска потока помимо входного створа канала в сторону каскада дамб основной плотины остается высоким (рис. 5).

На рисунке 6 представлена ЦММ с обозначением потенциально опасных участков, описанных выше, в зоне перехода от водоема-отстойника к основной плотине хвостохранилища.

Выводы

Результаты анализа данных геоэкологического мониторинга ландшафта Тырнаузского хвостохранилища, в частности с применением БПЛА-технологий, показывают необходимость регулярного контроля текущего состояния ГТС комплекса.

Так, в ходе обследования зафиксировано существенное увеличение количества выросших деревьев и кустарников на селевых отложениях в русловой и пойменной частях долины р. Гижгит на территории, прилегающей к входному portalу водоотводного тоннеля № 2, а также накопления обломочных масс непосредственно перед створом тоннеля. В качестве мероприятий по обеспечению бесперебойного функционирования водоотвода очевидна необходимость вырубки указанной растительности и расчистки отложений с целью предотвращения блокировки входного отверстия тоннеля в случае схода селевого или наносоводного потока, поскольку именно от пропускной способности тоннеля будет зависеть развитие событий в пруду-отстойнике хвостохранилища.

Сопоставительный анализ материалов разновременной (2021–2025 гг.) аэрофотосъемки показывает отсутствие подвижек оползневого тела в русле открытого аварийного водоотводного канала, что позволяет охарактеризовать состояние оползня как стабильное в настоящий момент. Также в самом русле аварийного водопропуска не выявлено сколь-нибудь существенного изменения объема, т. е. накопления в нем грунтово-осколочных масс в указанный период не про-



Рис. 5. Участок сопряжения отсечной дамбы и открытого аварийного водоотводного канала: 1 — русло аварийного водосброса; 2 — отсечная дамба (пунктиром обозначен участок, нуждающийся в доработке); 3 — водоем-отстойник хвостохранилища (стрелкой показано направление движения потока в случае переполнения водосборника). Фото с квадрокоптера ГУ МЧС России по КБР 19.06.2025

Fig. 5. The interface section of the cut-off dam and the open emergency drainage channel. 1 — channel of the emergency spillway; 2 — cut-off dam (the dotted line indicates the area in need of improvement); 3 — pond-settling tank of the tailings dam (the arrow shows the direction of flow in case of overflow of the catchment area). Photo from the quadcopter of the Ministry of Emergency Situations of Russia in the KBR. 06/19/2025

исходит. Однако в качестве мероприятий, необходимых для снижения рисков и минимизации негативных последствий опасных природных явлений, рекомендо-

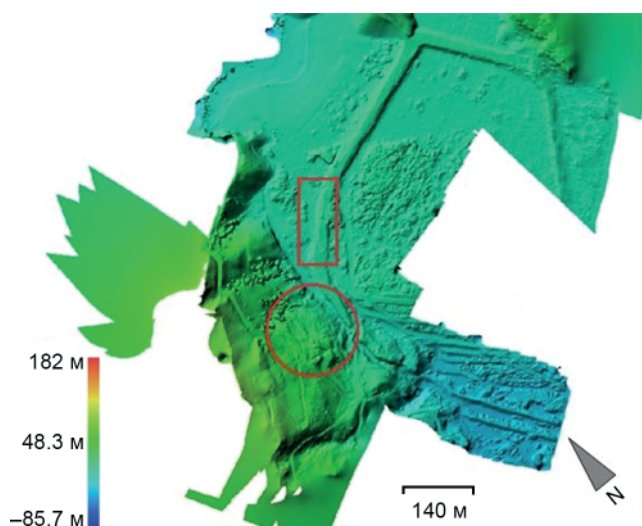


Рис. 6. Цифровая модель местности участка примыкания водоема-отстойника к пляжу хвостохранилища с обозначением наиболее уязвимых элементов ГТС. Прямоугольником обозначена область недостаточно надежного сопряжения отсечной дамбы с входным оголовком открытого аварийного канала, окружностью — оползневой массив, сползающий в русло водопропуска

Fig. 6. Digital terrain model of the area adjacent to the settling pond and the tailings storage facility beach with the designation of the most vulnerable elements. The rectangle indicates the area of insufficiently reliable coupling of the cut-off dam with the entrance head of the open emergency channel, the circle — a landslide mass if blocking the culvert channel

менуется основательная реконструкция открытого аварийного водосброса, включающая расчистку русла канала от оползневых отложений, укрепление оползневого склона, а также дна и стенок канала бетонными конструкциями. В целях организации контролируемого перенаправления потока в обязательном порядке следует доработать правую оконечность отсечной дамбы при выходе на пляж хвостохранилища и обеспечить её надёжное сопряжение с входным оголовком аварийного водосброса.

В заключение хотелось бы отметить высокую эффективность применения БПЛА-технологий для мониторинга геоэкологических процессов в горах. Данные высокоточной съемки позволяют в оперативном режиме, с минимальными временными и ресурсными затратами получать максимально достоверные сведения для оценки динамики пространственно-временных изменений ландшафта наблюдаемых территорий.

Исследования проводились в рамках выполнения научно-исследовательской темы 6.3.2 Росгидромета «Разработка и совершенствование методов мониторинга селей и горных ледников в предгорной и высокогорной зонах»

Литература / References

- Богатилов О. А., Бортников Н. С., Карамурзов Б. С., Гурбанов А. Г., Газзеев В. М., Докучаев А. Я., Лексин А. Б., Шаззо Ю. К., Цуканова Л. Е., Шевченко А. В. Захороненные промышленные отходы Тырныаузского вольфрамово-молибденового комбината // Вестник Владикавказского научного центра. 2013. Т. 13, № 1. С. 41–53.
Bogatikov O. A., Bortnikov N. S., Karamurзов B. S., Gurbanov A. G., Gazzeev V. M., Dokuchaev A. Ya., Leksin

- A. B., Shazzo Yu. K., Tsukanova L. E., Shevchenko A. V. Buried industrial waste of the Tyrnauz tungsten-molybdenum combine. Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center, 2013, V. 13, No. 1, pp. 41–53. (in Russian)
- Валиев Н. Г., Голик В. И., Лебзин М. С. Инертность влияния стоков Тырнаузского вольфрамо-молибденового комбината на гидросистемы Северного Кавказа // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 1-1. С. 5–16.
- Valiev N. G., Golik V. I., Lebzin M. S. Inertia of the influence of runoff from the Tyrnauz tungsten-molybdenum combine on the hydraulic systems of the North Caucasus. Mining Information and Analytical Bulletin, 2025, No. 1–1, pp. 5–16. (in Russian)
- Гегиев К. А., Шерхов А. Х., Гергокова З. Ж., Анахаев К. К. Экологические проблемы Тырнаузского хвостохранилища на реке Гижгит // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13, Вып. 11. С. 1386–1394.
- Gegiev K. A., Sherkhov A. Kh., Gergokova Z. Zh., Anakhayev K. K. Environmental problems of the Tyrnauz tailings dam on the Gizhgit River. Bulletin of MSSU, 2018, V. 13, Issue 11, pp. 1386–1394. (in Russian)
- Докукин М. Д., Запорожченко Э. В., Знаменский Д. В. Хвостохранилища — объекты повышенной селевой опасности // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита: Труды 6-й Международной конференции (Душанбе – Хорог, Таджикистан) / Отв. ред. С. С. Черноморец, К. С. Висхаджиева. Душанбе: Промоушн, 2020. Том 1. С. 25–38.
- Dokukin M. D., Zaporozhchenko E. V., Znamensky D. V. Tailings ponds — objects of increased mudflow hazard. Mudflows: disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Ed. by S. S. Chernomorets, K. S. Viskhadzhieva. Dushanbe: Promotion, 2020, pp. 25–38. (in Russian)
- Дубинин С. В. Анализ геоэкологического ущерба от гидродинамических аварий на хвостохранилищах // Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. Кемерово, 2016. С. 175–191.
- Dubinin S. V. Analysis of geoeological damage from hydrodynamic accidents at tailings ponds. Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev. Kemerovo, 2016, pp. 175–191. (in Russian)
- Запорожченко Э. В. Новые селевые опасности у г. Тырнауза // Устойчивое развитие горных территорий: проблемы и перспективы интеграции науки и образования: Материалы V Международной конференции. Владикавказ, 2004. С. 269–276.
- Zaporozhchenko E. V. New mudflow hazards in the city of Tyrnauz. Sustainable development of mountainous territories: problems and prospects of integration of science and education: Proceedings of the 5th International Conference. Vladikavkaz, 2004, pp. 269–276. (in Russian)
- Запорожченко Э. В. Северный Кавказ: селевые вызовы XXI века // ГеоРиск. 2014. № 3. С. 42–57.
- Zaporozhchenko E. V. North Caucasus: mudflow challenges of the 21st century. GeoRisk, 2014, No. 3, pp. 42–57. (in Russian)
- Запорожченко Э. В. Тырнаузское хвостохранилище на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике: проблемы сохранности, устойчивости и экологической безопасности // Сборник научных трудов ОАО «Севкавгипроводхоз». 2015. Вып. 21. С. 127–38.
- Zaporozhchenko E. V. The Tyrnauz tailings dam on the Gizhgit River in the Kabardino-Balkarian Republic: problems of conservation, sustainability and environmental safety. Collection of scientific papers of JSC Sevkaavgiprovdokhoz, 2015, Issue 21, pp. 127–38. (in Russian)
- Запорожченко Э. В. Река Гижгит — источник паводковой опасности для сооружений Тырнаузского горно-обогатительного комбината (ТТОК) // Вопросы повышения эффективности строительства: Сборник трудов конференции. Нальчик, 2004. Вып. 2. С. 159–169.
- Zaporozhchenko E. V. The Gizhgit river is a source of flood danger for the structures of the Tyrnauz Mining and Processing Plant. Issues of increasing construction efficiency: Proceedings of the conference. Nalchik, 2004, V. 2, pp. 159–169. (in Russian)
- Запорожченко Э. В., Докукин М. Д. Об угрозе разрушения Тырнаузского хвостохранилища на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике // Геориск. 2019а. Т. XIII, № 1. С. 72–85.
- Zaporozhchenko E. V., Dokukin M. D. On the threat of destruction of the Tyrnauz tailings dam on the Gizhgit River in the Kabardino-Balkarian Republic. Georisk, 2019a, V. 13, No. 1, pp. 72–85. (in Russian)
- Запорожченко Э. В., Докукин М. Д. Тырнаузское хвостохранилище — объект повышенного экологического риска // Устойчивое развитие горных территорий Кавказа: Колл. монография. М.: РАН, 2019с. Том II. С. 224–237.
- Zaporozhchenko E. V., Dokukin M. D. The Tyrnauz tailing dump is an object of increased environmental risk. Sustainable development of the mountainous territories of the Caucasus. A collective monograph. Moscow: RAS, 2019s, V. 2, pp. 224–237. (in Russian)
- Запорожченко Э. В., Докукин М. Д. Хвостохранилище на р. Гижгит в Кабардино-Балкарской Республике (Россия) и его проблемы // IX International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction». Tbilisi, Georgia, 2019b. P. 301–310.
- Zaporozhchenko E. V., Dokukin M. D. The tailings dam on the Gizhgit River in the Kabardino-Balkarian Republic (Russia) and its problems. The 9th International scientific and technical conference «Modern problems of water management, environmental protection, architecture and construction». Tbilisi, Georgia, 2019b, pp. 301–310. (in Russian)
- Ковлеков И. И., Константинов А. Ф., Альков С. П., Дмитриев А. А. Рассмотрены причины и последствия потенциальных угроз безопасности на хвостохранилищах // Горнохимический журнал. 2016. № 9. С. 96–97.
- Kovlekov I. I., Konstantinov A. F., Alkov S. P., Dmitriyev A. A. The causes and consequences of potential safety threats at tailings ponds are considered. Mining Chemical Journal, 2016, No. 9, pp. 96–97. (in Russian)
- Лехатинов А. М., Лехатинова Э. Б., Доржиев А. Д. Влияние селевых потоков на биогеноценоз и экологию национального парка «Тункинский» // Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 6-й Международной конференции (Душанбе–Хорог, Таджикистан) / Отв. ред. С. С. Черноморец, К. С. Висхаджиева. Душанбе: Промоушн, 2020. Том 1. С. 470–476.
- Lekhatinov A. M., Lekhatinova E. B., Dorzhiev A. D. The influence of mudflows on the biogeocenosis and ecology



- gy of the Tunkinsky National Park. Mudflows: disasters, risk, forecast, protection. Proceedings of the 6th International Conference (Dushanbe–Khorog, Tajikistan). Volume 1. Ed. by S. S. Chernomorets, K. S. Viskhadzhieva. Dushanbe: Promotion, 2020, pp. 470–476. (in Russian)
- Мальнева И. В., Кононова Н. К. Активность селей на территории России и ближнего зарубежья в XXI веке // ГеоРиск. 2023. № 48. С. 1–10.
- Malineva I. V., Kononova N. K. The activity of mudflows in Russia and neighboring countries in the 21st century. GeoRisk, 2023, No. 48, pp. 1–10. (in Russian)
- Мельников Н. Н., Калашник А. И. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горно-технических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. № 3 (19). С. 66–67.
- Melnikov N. N., Kalashnik A. I. Creation of a multilevel geodynamic monitoring system for mining and oil and gas facilities in the western part of the Russian Arctic sector. Arctic: Ecology and Economics, 2015, No. 3 (19), pp. 66–67. (in Russian)
- Сейнова И. Б., Андреев Ю. Б., Крыленко И. Н., Богаченко Е. М., Феоктистова Е. А. Опыт прогнозирования селей в условиях деградации оледенения на Центральном Кавказе // ГеоРиск. 2018. Том XII, № 4. С. 26–37.
- Seinova I. B., Andreev Yu. B., Krylenko I. N., Bogachenko E. M., Feoktistova E. A. The experience of predicting mudflows in conditions of glaciation degradation in the Central Caucasus. GeoRisk, 2018, V. 12, No. 4, pp. 26–37. (in Russian)
- Шабалина Е. В. Мониторинг состояния окружающей среды на территориях объектов размещения отходов // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: VII Всеросс. науч.-практ. конф. для студентов и учащейся молодежи. 2016. Т. 2. С. 510–512.
- Shabalina E. V. Monitoring the state of the environment in the territories of waste disposal facilities. The 7th All-Russian scientific and practical conference for students and young people «Progressive technologies and economics in mechanical engineering», 2016, V. 2, pp. 510–512. (in Russian)
- Шерхов А. Х., Гергокова З. Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса гидротехнических сооружений хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината // Природообустройство. 2022. № 4. С. 100–106.
- Sherkhov A. Kh., Gergokova Z. Zh. Assessment of the current state of some components of the complex of hydraulic structures of the tailings dam of the Tyrnyauz mining and processing plant. Environmental management, 2022, No. 4, pp. 100–106. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе, серия: Кавказская. Лист К-38-I,VII (Кисловодск). 2004.
- The State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:200,000. Second edition, series: Caucasian. Sheet K-38-I, VII (Kislovodsk), 2004. (in Russian)
- Ледники и климат Эльбруса / Под ред. В. Н. Михаленко. М.; СПб.: Нестор-История, 2020.
- Glaciers and the climate of Elbrus. Ed. V. N. Mikhaleenko, Moscow; St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2020. (in Russian)
- Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / Под ред. В. М. Катцова. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022.
- The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. Ed. V. M. Kattsov. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 16.07.2025

Из опыта преподавания. XVIII. Таблица 27 видов симметрии

Ю. Л. Войтеховский

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия
Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург, Россия
vojtehovskij@herzen.spb.ru

Памяти профессора Горного института А. И. Глазова

В статье рассмотрены две формы таблицы 27 видов симметрии (без кубической сингонии): оси L_{i4} дана своя строка, иные инверсионные оси запрещены; использованы все возможные инверсионные оси. Второй случай особенно интересен при сопоставлении видов симметрии с гладкими геометрическими интерпретациями (конусы и цилиндры) предельных групп симметрии Кюри. Предложено различать 14, а не 7 классов симметрии. Обсуждена их номенклатура с экскурсом в историю вопроса.

Статья учит творческому усвоению фундаментальных результатов, их выводу и осмыслению в деталях. Она предназначена для преподавателей, аспирантов и студентов (геологов, географов, биологов и др.), изучающих основы кристаллографии в геометрическом варианте, без теории групп и линейной алгебры. Статья посвящена профессору А. И. Глазову — последнему представителю кристаллографической школы Е. С. Федорова — А. К. Болдырева — И. И. Шафрановского в Ленинградском горном институте (ныне Санкт-Петербургском горном университете) и сопровождается уникальными фото из личного архива профессора Д. П. Григорьева.

Ключевые слова: виды и классы симметрии кристаллов, композиции элементов симметрии, истинные и ложные инверсионные оси, предельные группы симметрии Кюри

From teaching experience. XVIII. Table of 27 symmetry species

Yu. L. Voytekhovsky

A. I. Herzen Russian State Pedagogical University, Saint Petersburg, Russia
Russian Mineralogical Society, Saint Petersburg, Russia

In memory of A. I. Glazov, Professor at the Mining Institute

The article discusses two forms of the table of 27 symmetry species (without cubic syngony): the L_{i4} axis has its own row, and other inversion axes are forbidden; all possible inversion axes are used. The latter case is particularly interesting when comparing the species of symmetry with smooth geometric interpretations (cones and cylinders) of the limiting Curie symmetry groups. It is proposed to distinguish 14 rather than 7 classes of symmetry. The article discusses their nomenclature with a historical overview.

The article teaches the creative assimilation of fundamental results, their derivation, and comprehension in detail. It is intended for teachers, postgraduate students, and students (geologists, geographers, biologists, etc.) studying the basics of crystallography in a geometric variant without group theory and linear algebra. The article is dedicated to Professor A. I. Glazov, the last representative of the E. S. Fedorov — A. K. Boldyrev — I. I. Shafranovsky crystallographic school at the Leningrad Mining Institute (now the Saint Petersburg Mining University), and is accompanied by unique photos from the personal archive of Professor D. P. Grigoriev.

Keywords: symmetry species and classes of crystals, compositions of symmetry elements, true and false inversion axes, limiting Curie symmetry groups.

Введение

По мнению профессора Горного института в Санкт-Петербурге кристаллографа А. И. Глазова (1941–2023), профессор И. И. Шафрановский (1907–1994) до конца своих дней искал неочевидные закономерности в классической таблице 32 видов симметрии (в. с.). Его завораживало само число 32. Вероятно, он имел в виду, что 2^n — число элементов в булеане (множестве всех подмножеств) n -элементного множества. В. с. кристаллов —

композиции некоторых элементов множества $\{L_1, L_2, L_3, L_4, L_6, L_{i4}, C, P\}$. Задача состоит в том, чтобы выбрать его 5-элементное подмножество, булеан которого даст в точности 32 в. с. Но это лишь наша догадка.

Таблицу 32 в. с. (Попов, Шафрановский, 1964, с. 92) он объяснял студентам ревностно. Это и понятно, ведь он был сотрудником Федоровского института, в котором под началом А. К. Болдырева разработаны указанная таблица и символика 32 в. с., а еще номенклатура



простых форм и пространственных групп симметрии (Болдырев, Доливо-Добровольский, 1934; Шафрановский, Франк-Каменецкий, 1954; Войтеховский, 2020, 2021). И все же мы пошевелим эту классическую таблицу, но не из праздного любопытства, а в ответ на вопросы студентов:

— Известны варианты периодической таблицы химических элементов. А есть ли варианты таблицы 32 в. с.?

— В аксиальном и планальном классах символы в. с. различаются для нечетных и четных осей. Нельзя ли их раздвинуть наподобие подгрупп периодической таблицы химических элементов?

— Можно ли поместить в. с. с осью L_{i4} в свою строку тетрагональной сингонии, ведь это не L_4 ?

— Можно ли передвинуть в. с. с осью L_{i6} из гексагональной сингонии в тригональную, ведь это композиция L_3 с ортогональной плоскостью?

— Как относиться к инверсионным осям кроме L_{i4} ? Они имеют математический смысл, но в кристаллографии вроде не нужны.

Первый вопрос простой. Варианты таблицы уже есть, достаточно сравнить учебник (Попов, Шафрановский, 1964, с. 92) и академическую монографию (Вайнштейн, 1979, с. 100–101). И второй вопрос несложен. В аксиальном и планальном классах сместим символы для нечетных и четных осей влево и вправо — однотипные символы выстроятся в колонки, воспринимать их действительно станет удобнее. На последний вопрос уже дан ответ: «Прибегать к сложным представлениям об инверсионных осях следует только в том случае, если никакого другого более простого толкования нельзя найти» (Болдырев, Доливо-Добровольский, 1934, с. 153). Что до остальных вопро-

совмещаем оси L_n с единичным направлением и добавляем к ним в разных сочетаниях центр инверсии C , поперечную ось L_2 , продольную P и поперечную Π (это обозначение И. И. Шафрановского не прижилось, но здесь удобно) плоскости симметрии.

Здесь полезны два замечания. Начинать надо именно с осей L_n , ведь они есть в каждом в. с., в отличие от других элементов симметрии. В в. с. P и C незримо присутствует L_1 . Фраза «в кристаллах возможны оси симметрии 2-, 3-, 4- и 6-го порядков; оси 1-го порядка не характерны и поэтому здесь не упоминаются» (Попов, Шафрановский, 1964, с. 68) приводит в недоумение. Оси 1-го порядка вездесущи, но указываются только в символе примитивного в. с. триклинной сингонии, где других элементов симметрии нет. Прочерк в ячейке таблицы некорректен.

Второе замечание — о поперечной оси L_2 . Почему только L_2 ? Потому что лишь она, опрокидывая единичное направление, совмещает его с собой.

Шаг 2. После перебора всех композиций, кратко-го обсуждения и устранения повторов получена таблица 27 видов симметрии (Попов, Шафрановский, 1964, с. 89). Но все еще интереснее и требует неспешного анализа. Следует обращать внимание студентов на то, что преобразования симметрии далеко не всегда перестановочны¹. А при сочетании продольных плоскостей P и поперечных осей L_2 надо следить, лежат ли L_2 в P или между ними. В табл. 1 даны композиции осей L_n (левый столбец) с дополнительными элементами симметрии (верхняя строка). Инверсионной оси L_{i4} отведена своя строка, другие инверсионные оси запрещены по совету А. К. Болдырева и В. В. Доливо-Добровольского. Полностью совпадающие столбцы указаны в верхней строке через запятую.

Таблица 1. Композиции осей симметрии с дополнительными C , Π , P и L_2

Table 1. Compositions of symmetry axes with additional C , P , R and L_2

	C	Π	P	L_2	CP	CP, CL_2, CPL_2	$\Pi P, \Pi L_2, \Pi PL_2$	PL_2	CPL_2, CPL_2, CPL_2
1	C	m	m						
2	$2/m$	$2/m$	$2mm$	222	$2/m$	mmm	mmm	mmm	mmm
3	$3C$	$3/m$	$3m$	32		$3mC$	$3/m$	$3mC, 3/m$	
4	$4/m$	$4/m$	$4mm$	422	$4/m$	$4/mmm$	$4/mmm$	$4/mmm$	$4/mmm$
–4			$4m2$	$4m2$				$4m2$	
6	$6/m$	$6/m$	$6mm$	622	$6/m$	$6/mmm$	$6/mmm$	$6/mmm$	$6/mmm$

Примечание. Инверсионная ось 4-го порядка обозначена –4 вместо неудобного при наборе символа с чертой сверху. Другие инверсионные оси далее по тексту аналогично.

Note: The 4th order inversion axis is denoted by –4 instead of the awkward-to-type symbol with a bar over it. Other inversion axes are described similarly below.

сов, то есть уверенность, что замены обозначений и перемещения ячеек в таблице не изменят фундаментальный результат. Но могут обнаружиться любопытные нюансы. К их поиску мы и приступим. Речь пойдет только о в. с. с единичными направлениями. Кубическая сингония весьма специфична и требует отдельного рассмотрения.

Шаг 1. В разговоре о началах нельзя пройти мимо очень давней, но замечательной статьи (Шафрановский, 1945). А полагая элементы симметрии известными, алгоритм вывода в. с. с единичными направлениями найдем в учебнике (Попов, Шафрановский, 1964, с. 84–85):

¹ В алгебраическом описании преобразования симметрии выражаются произведениями матриц, которые в общем случае не перестановочны. На это надо обращать внимание студентов в курсе математики, затем в лекциях по физике и кристаллографии, ибо это перекликается с некоммутативностью геологических процессов. Именно на ней основана возможность реконструкции истории земной коры. Мысленно переставьте местами два метаморфизма, пликтивных или дизъюнктивных процесса — результат будет разный!

К табл. 1 нужны пояснения. 1) В строке оси 3 имеем 7 в. с., то есть запрет инверсионной оси -6 не дал экономии числа столбцов (классов симметрии). 2) В. с. -6 ($3/m$) из инверсионно-примитивного стал центральным, точнее — «ортопланальным», ибо нечетная ось 3 в пересечении с m истинного С не дает. 3) В. с. $-6m2$ ($3/mm$) из инверсионно-планального стал планаксиальным. 4) Комбинация PL_2 дает в. с. $3/mm$ или $-3m$ ($3mC$) при расположении L_2 в Р или между ними. 5) В двух пустых клетках строки комбинация СП порождает L_2 , ортогональную к П и совпадающую с L_3 . Их содействие дает L_6 , неуместную в строке L_3 . Но ситуация напоминает нам, что менее века назад тригональная сингония входила в гексагональную как подсингония (гипосингония) (Болдырев, 1931, с. 35). Затем она стала самостоятельной, сначала с оговорками: «гексагональная и тригональная сингонии <...> имеют так много сходных простых форм, что их часто рассматривают как одну сингонию» (Флинт, 1937, с. 50) (рис. 1), а потом без них. 6) В. с. -4 из инверсионно-примитивного стал примитивным. 7) В. с. $-4m2$ из инверсионно-планального стал планальным или аксиальным (на выбор). 8) По характеру перемещений в таблице видно отличие в. с. с осями -4 и -6 .

Шаг 3. В табл. 1 есть все 27 в. с. с единичными направлениями, но много повторов. В каких ячейках их удалить? Устраним столбцы с избыточными комбинациями добавляемых (к исходным осям) элементов симметрии и те, что поглощаются более полными столбцами. При этом добавим сингонии по известным правилам (Попов, Шафрановский, 1964, с. 93–94). Результат дан в табл. 2. В ней уже видны знакомые классы в. с., но повторов все еще 8 (в квадратных скобках). Из них 6 — следствия теорем о композициях четных осей, ор-



Рис. 1. Д. г.-м. н. Е. Е. Флинт. Получено от Е. В. Цинзерлинг 8.III.1964 (здесь и далее автор подписи к фото Д. П. Григорьев)

Fig. 1. Dr. Sc. (Geol. & Mineral.) E. E. Flint. Received from E. V. Tsinzerling on March, 8, 1964 (here and below the photo captions are by D. P. Grigoriev)

тогональной плоскости П и центра инверсии С (Попов, Шафрановский, 1964, с. 78–79).

Шаг 4. Основная проблема в табл. 2 — два планальных класса П и Р. Но в столбце П почти все в. с. имеют аналоги рядом. Он может быть удален, если в. с. $3/m$ (-6), но тогда и $3/mm$ ($-6m2$), -4 , $-4m2$ вернуть в инверсионные классы. При этом в моноклинной и тетрагональной сингониях будет по одной строке. Результат — табл. 3, хорошо знакомая всем изучавшим кристаллографию. И все же без нюансов не обошлось. Мы поместили в. с. 2 в столбец № 1 (оси — к осям), в. с. $2/m$ — в № 2

Таблица 2. Композиции осей симметрии с С, П, Р, L_2 и указанием сингоний

Table 2. Compositions of symmetry axes with C, P, R, L_2 and indication of syngonies

Сингонии / Syngonies		C	П	P	L_2	CP, CL_2	ПР, PL_2
Триклинная / Triclinic	1	C					
Моноклинная / Monoclinic			[m]	m			
	2	$2/m$	[$2/m$]				
Ромбическая / Rhombic				$2mm$	222	mmm	[mmm]
Тригональная / Trigonal	3	$3C$	$3/m$	$3m$	32	$3mC$	$3/mm$
Тетрагональная / Tetragonal	4	$4/m$	[$4/m$]	$4mm$	422	$4/mmm$	[$4/mmm$]
	-4			$-4m2$	[$-4m2$]		
Гексагональная / Hexagonal	6	$6/m$	[$6/m$]	$6mm$	622	$6/mmm$	[$6/mmm$]

Таблица 3. Виды симметрии кристаллов с единичными направлениями

Table 3. Symmetry types of crystals with single directions

Сингонии / Syngonies	1	2	3	4	5	6	7
Триклинная / Triclinic	1	C					
Моноклинная / Monoclinic	2	$2/m$	m				
Ромбическая / Rhombic			$2mm$	222	mmm		
Тригональная / Trigonal	3	$3C$	$3m$	32	$3mC$		
Тетрагональная / Tetragonal	4	$4/m$	$4mm$	422	$4/mmm$	-4	$-4m2$
Гексагональная Hexagonal	6	$6/m$	$6mm$	622	$6/mmm$	-6	$-6m2$

Примечания. Классы симметрии: 1 — примитивный, 2 — центральный, 3 — планальный, 4 — аксиальный, 5 — планаксиальный, 6 — инверсионно-примитивный, 7 — инверсионно-планальный.

Notes. Symmetry classes: 1 — primitive, 2 — central, 3 — planal, 4 — axial, 5 — planaxial, 6 — inversion-primitive, 7 — inversion-planar.



(к 4/м и 6/м), но в учебнике (Попов, Шафрановский, 1964, с. 92) они попали в аксиальный (№ 4) и планаксиальный (№ 5) классы. Монография (Вайнштейн, 1979, с. 100–101) оставляет выбор за читателем.

Шаг 5. Исследование не будет закончено, если мы не обратим внимание на различие символов в. с. в столбцах № 2–5. Так, в планальном (№ 3) и аксиальном (№ 4) классах нечетная ось 3 размножает Р и L_2 в три таких же, что обозначено как 3м и 32. В случае четных осей Р и L_2 распадаются на две группы, что отмечено в символах, например, 4mm и 422. В столбцах 2 и 5 различие еще радикальнее — сочетания нечетных осей (1 и 3) с С дают ложные инверсионные оси (в том смысле, что могут быть выражены через комбинации обычных элементов симметрии, далее в скобках): -1 (С), -3 (3С), $-3m$ ($-3m2$, $3mC$). По аналогии: -2 (м), $-1m2$ ($Cm2$, $2/m$), $-2m2$ ($mm2$, $2mm$). Возникает идея перенести все в. с. с ложными инверсионными осями в столбцы 6 и 7 (табл. 4). Для большей наглядности добавлены строки с некристаллографическими осями 5, 7, 8 и предельные группы симметрии Кюри.

Табл. 4 обладает замечательным свойством — состоит из 14 «чистых линий»² в. с., устроенных одинаково, за исключением порядка главной оси. Столбцы 1–5 точно соответствуют симметрии гладких геометрических интерпретаций по Кюри. Иное дело — в. с. с истинной -4 и ложными инверсионными осями. В. с. столбца 6 вкладываются как подгруппы в в. с. столбца 2 (вц), а в. с. столбца 7 — в в. с. столбца 5 (пц). Но во всех случаях есть недостача элементов симметрии по сравнению с таковыми цилиндров. Так, в линии -1 , -3 , -5 ...

² В силу традиции (онтогенез — онтогения, по Д. П. Григорьеву) термин взят нами из биологии, где он означает генетическую и морфологическую идентичность.

нет плоскости П, в линии -2 , -6 ... нет С, в линии -4 , -8 ... нет ни П, ни С, которые есть у вращающегося цилиндра. Аналогично в инверсионно-планальном классе относительно покоящегося цилиндра.

Особенно досадна «потеря» в предельных группах симметрии П. Кюри истинных инверсионных осей (в конусах, цилиндрах и сферах их в явном виде нет), ведь открытие оси -4 О. Браве стало выдающимся событием в кристаллографии, завершившим список элементов симметрии (Войтеховский, 2025; Voytekhevsky, 2025). Напрашивается вывод. Если пренебречь указанными нюансами и настаивать на гладких геометрических интерпретациях, то решение вопроса у П. Кюри идеально. Если же акцентировать внимание на инверсионных осях и «чистых линиях», то можно выделить новые виды симметрии, в геометрической интерпретации которых не обойтись без «шероховатых» (ребристых, гранных) призм. Заметим также, что без в. с. с нечетными главными осями столбец 2 (центральные в. с.) превратился в «ортопланальную» чистую линию. Конечно, центры инверсии не пропали. В каждом случае взаимодействие центра инверсии, четной оси и ортогональной плоскости управляют (два элемента порождают третий) тремя известными теоремами (Шафрановский, 1964, с. 78–79).

О терминах

Информативная и удобная номенклатура очень важна в науке, работающей с большим многообразием объектов. Эта методологическая проблема опирается на философскую традицию (Геллнер, 1962; Фуко, 1977; Степанов, 1981; Лосев, 1990; и др.). Кристаллография не обошла ее стороной (Болдырев, Доливо-Добровольский, 1934), и она не исчерпана (Войтеховский,

Таблица 4. Виды симметрии кристаллов с акцентом на инверсионных осях

Table 4. Types of crystal symmetry with emphasis on inversion axes

Сингонии / Syngonies	1	2	3	4	5	6	7
Триклинная / Triclinic	1					-1	
Моноклиная / Monoclinic	(2)	$\{2/m\}$	$[1m]$	(12)		$[-2]$	$\{-1m2\}$
Ромбическая / Rhombic			(2mm)	222	2/mmm		($-2m2$)
Тригональная / Trigonal	3		3m	32		-3	$-3m2$
Тетрагональная / Tetragonal	4	4/m	4mm	422	4/mmm	-4	$-4m2$
	5		5m	52		-5	$-5m2$
Гексагональная / Hexagonal	6	6/m	6mm	622	6/mmm	-6	$-6m2$
	7		7m	72		-7	$-7m2$
	8	8/m	8mm	822	8/mmm	-8	$-8m2$
Предельная группа Limiting group	∞ вк	∞/m вц	$\infty m, \infty mm$ пк	$\infty 2, \infty 22$ сц	∞/mmm пц		

Примечания. Номера столбцов — как в табл. 3. В стб. 3 (планальные в. с.) и 4 (аксиальные в. с.) выделены чистые линии с нечетными (слева) и четными (справа) главными осями. В стб. 6 и 7 выделены чистые линии с инверсионными нечетными (слева), порядка $4n-2$ (в центре) и порядка $4n$ (справа) осями, $n = 1, 2, 3$... В моноклиной и ромбической сингониях в одинаковых скобках даны эквивалентные обозначения. В этих четырех случаях допустимо двоякое положение в. с. в таблице. Геометрические интерпретации предельных групп симметрии: в — вращающийся, п — покоящийся, с — скрученный, к — конус, ц — цилиндр.

Notes. Column numbers are as in Table 3. In columns 3 (planar s. t.) and 4 (axial s. t.), pure lines with odd (on the left) and even (on the right) principal axes are highlighted. In columns 6 and 7, pure lines with inversion odd (on the left), order $4n-2$ (in the center) and order $4n$ (on the right) axes are highlighted, $n = 1, 2, 3$... In the monoclinic and rhombic syngonies, equivalent notations are given in the same brackets. In these four cases, a dual position of the s. t. in the table is allowed. Geometric interpretations of the limiting symmetry groups: в — rotating, п — resting, с — twisted, к — cone, ц — cylinder.

2024). Привычные нам логичные и удобные названия сингоний возникали и закреплялись постепенно: «агирная — триклинная, моноклирная — моноклирная, ди-гирная — ромбическая, тригирная — тригональная, тетрагирная — тетрагональная, гексагирная — гексагональная, полигирная — кубическая» (Попов, Шафрановский, 1941, с. 60) (рис. 2–4). Любопытно, что в 1941 г. авторы учебника называли современные термины устаревшими, но вернулись к ним в следующем издании (Попов, Шафрановский, 1964, с. 92).

А вот авторитетное мнение: «Эти названия имеют педагогическое значение, так как указывают на наиболее характерную особенность кристаллов каждой сингонии в отношении симметрии, а следовательно и в отношении других свойств, связанных с симметрией. Названия сингоний — тригирной, тетрагирной и гексагирной — взяты из терминологии, принятой в свое время Федоровским институтом. Триклинная и моноклирная сингонии неправильно названы Федоровским институтом «агирной» и «моноклирной» сингониями. Нами эти сингонии по указанным выше причинам названы соответственно «моноклирной» и «моноклирной» (Аншелес, 1952, с. 97) (рис. 5, 6). Им же предложены иные названия сингоний: моноклирная (триклинная), моноклирная (моноклирная), тридигирная (ромбическая), тригирная (тригональная, ромбоэдрическая), тетрагирная (тетрагональная), гексагирная (гексагональная) и тетрагирная (кубическая) (там же, с. 97–98). Термины не прижились, но в них была логика — явное указание числа разных осей.

И. И. Шафрановский рекомендовал студентам запоминать устаревшие названия в. с.: 1) моноклирный, 2) пинакоидальный... 32) гексоктаэдрический — ведь в них звучат имена общих (самых полногранных) простых форм каждого в. с. Но вот иное мнение: «Этих названий в разное время разными авторами дано так много, что их можно не запоминать, ограничившись для каждого класса [вида] формулой симметрии» (Флинт, 1937, с. 33). Вот и пойми их, классиков...



Рис. 2. Празднование выхода в свет учебника «Кристаллография» Попова, Шафрановского. 1941 г. (до войны). Слева направо: Г. М. Попов, О. М. Аншелес, И. И. Шафрановский

Fig. 2. Celebrating the publication of the textbook «Crystallography» by Popov and Shafranovsky. 1941 (before the war). From left to right: G. M. Popov, O. M. Ansheles, I. I. Shafranovsky.

Между понятиями вида и класса есть путаница. «Многие авторы отождествляют вид с классом. Логичнее, нам кажется, придавать этим терминам различное значение, как это делает Е. С. Федоров. <...> Видом симметрии называется законченное сочетание элементов симметрии. Под „законченным“ подразумевается такое сочетание, в котором проделаны все операции сложения элементов симметрии, т. е. выведены все равнодействующие. Все кристаллы, имеющие симметрию одного и того же вида, составляют „класс“. Видов симметрии бесконечно большое число, однако число классов, как указано выше, ограничивается 32» (Флинт, 1937, с. 32). Остается неясным, совпадут ли понятия вида и класса, если ограничиться только кристаллическими в. с.? Или все равно первое относится к матема-



Рис. 3 (слева). В квартире Г. М. Попова в новом высотном здании МГУ. Слева направо: Г. П. Попова (Литвинская), Г. М. Попов, Андрияша Попов, В. И. Михеев, Миша Попов, И. И. Шафрановский, Н. Н. Стулов. Зима 1953/1954 г.

Fig. 3 (left). At G. M. Popov's apartment in the new high-rise building of Moscow State University. From left to right: G. P. Popova (Litvinskaya), G. M. Popov, Andryusha Popov, V. I. Mikheev, Misha Popov, I. I. Shafranovsky, N. N. Stulov. Winter of 1953 / 1954



Рис. 4 (справа). Слева направо: И. И. Шафрановский, Г. М. Попов и В. А. Мокиевский. Март 1956 г.

Fig. 4 (right). From left to right: I. I. Shafranovsky, G. M. Popov and V. A. Mokievsky. March 1956



Рис. 5. О. М. Аншелес (слева — 1902 г., справа — 1954 г.)

Fig. 5. O. M. Ansheles (left — 1902, right — 1954)

тическим образам, а второе — к физическим телам? На сегодня устоялось другое соотношение понятий. Виды (точечные группы) и классы симметрии — все это математические образы: первых 32, вторых 7 (примитивный... инверсионно-планальный, табл. 3). Было бы еще лучше объединять в классы изоструктурные (одинаково устроенные) в. с., отличающиеся лишь порядком главной (совпадающей с единичным направлением) оси (табл. 4).

Обратимся к современным названиям классов. Не случайно они вызывают недоумение у отдельных (они-

то нам и дороги) критически думающих студентов. Первый вопрос — о «примитивной» оси L_1 , которая якобы оставляет фигуру на месте. Вовсе нет! Как все оси, она поворачивает фигуру, но та впервые совпадает с собой лишь после поворота на 360° . Тем самым L_1 характеризует не столько себя, сколько фигуру. Поворот вокруг L_1 (действие) и оставление фигуры на месте (бездействие) следует различать. Кроме того, L_1 есть у любой фигуры, причем в бесконечном числе. Наконец, она единственная из осей не обязана пересекать фигуру в центре тяжести. Где здесь примитив?

В примитивном в. с. триклинной сингонии из простых форм есть только моноэдр. Может быть, это примитив? Но у таких кристаллов сколько граней, столько и различных (не переводимых друг в друга элементом симметрии L_1) моноэдров. А среди 146 структурных (физических) разновидностей простых форм моноэдры самые многочисленные (Бокий, 1940; Шафрановский, 1948). Кажущийся примитив обернулся максимальным разнообразием.

Наши предшественники неудачно назвали примитивным класс, в котором в. с. содержат лишь главные оси, с которых начинается вывод комбинаций. По процедуре его следовало назвать исходным (начальным), по сути — аксиальным (табл. 4, столбец № 1). По той же логике другие классы следует назвать: № 2 — аксицентральный (аксиортопланальный), № 3 — аксипланальный, № 4 — диаксиальный, № 5 — аксидипланальный. Два инверсионных (в современном понимании) класса распадаются каждый на три «чистых линии», подходящих на роль классов. Линия $-1, -3, -5...$ — инверсионный аксицентральный; $-2, -6...$ — инверсионный аксиортопланальный; $-4, -8...$ — инверсионный аксиальный; $-1m2, -3m2, -5m2...$ — инверсионный аксипланальный; $-2m2, -6m2...$ — инверсионный аксидипланальный; $-4m2, -8m2...$ — инверсионный диаксипланальный.

Выводы

Путешествие по таблице 32 в. с., даже без кубической сингонии, показало множество логических тропинок и развилок, по которым прошли наши предше-



Рис. 6. Спор о законе Бэра (течение рек и различие в берегах). Чертят О. М. Аншелес и В. И. Михеев, смотрит И. И. Шафрановский. Зеленогорск, 1953 г.

Fig. 6. A dispute about the Baer's law (the flow of rivers and the difference in their banks). O. M. Ansheles and V. I. Mikheev are drawing, I. I. Shafranovsky is watching. Zelenogorsk, 1953

ственники, чтобы удобно выразить этот фундаментальный результат. Наличие ее нескольких форм и исторические дискуссии о номенклатуре показывают, что, кроме самих 32 в. с., все остальное — объединение в классы, именование — это вопросы целесообразности. По результатам исследования нам кажется удобным выделять 14 чистых линий (пусть при тех же 7 классах). Заметим, что их можно найти в книге (Зоркий, 1986, с. 28–37) под названием семейств точечных групп низшей и средней категории. Однако, погружая подгруппы в группы, этот автор свел их к 5 группам Кюри, тогда как наша задача была в обратном. А главный педагогический момент видится в увлекательном путешествии, показавшем внутреннее богатство классической таблицы 32 в. с. Ведь наша цель — не в том, чтобы предложить еще одну форму таблицы или номенклатуру, а чтобы показать саму такую возможность и тем самым — живое содержание якобы «сухой науки» кристаллографии.

Мы уже отмечали немалый заряд натурфилософии в курсах кристаллографии и минералогии (Войтеховский, 2022, 2024). Его следует не прятать, а показывать студентам. Рассуждение о моноэдрах явно отсылает к философии: «Не бывает никаких двух неразличимых друг от друга отдельных вещей. <...> Полагать две вещи неразличимыми — означает полагать одну и ту же вещь под двумя именами» (Лейбниц, 1982, с. 450). «Относительно высказанного Лейбницем закона следует, однако, заметить, что различие, о котором он говорит, следует понимать не только как внешнюю и равнодушную разность, но и как различие в себе и что, следовательно, вещам самим по себе свойственно быть различными» (Гегель, 1974, с. 275). Мысль Лейбница отсылает нас к физически различным моноэдрам в смысле Г. Б. Бокия (1940) и И. И. Шафрановского (1948), мысль Гегеля — еще глубже, к геометрически различным моноэдрам. В целом же примитивный вид симметрии триклинной сингонии вовсе не примитивен, коль скоро дает замечательную иллюстрацию к столь важным философским принципам.

Автор благодарит рецензентов за весьма профессиональные и доброжелательные рекомендации, способствовавшие лучшему изложению результатов.

Литература / References

- Аншелес О. М. Начала кристаллографии. Л.: ЛГУ, 1952. 276 с.
Ansheles O. M. Fundamentals of Crystallography. Leningrad: Leningrad State University, 1952, 276 p. (in Russian)
- Бокий Г. Б. Число физически различных простых форм кристаллов // Тр. Лаборатории кристаллографии. 1940. Вып. 2. С. 13–37.
Bokiy G. B. The number of physically different simple forms of crystals. Proc. Laboratory of Crystallography, 1940, 2, pp. 13–37. (in Russian)
- Болдырев А. К. Кристаллография. Л.: Кубуч, 1931. 331 с.
Boldyrev A. K. Crystallography. Leningrad: Kubuch, 1931, 331 p. (in Russian)
- Болдырев А. К., Доливо-Добровольский В. В. Классификация, номенклатура и символика 32 видов симметрии кристаллографии // Зап. ЛГИ. 1934. Т. VIII. С. 145–159.
Boldyrev A. K., Dolivo-Dobrovolsky V. V. Classification, nomenclature and symbolism of 32 symmetry species of crystallography. Proc. Leningrad Mining Inst., 1934, VIII, pp. 145–159. (in Russian)
- Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Т. 1. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии. М.: Наука, 1979. 384 с.
Weinstein B. K. Modern crystallography. Vol. 1. Symmetry of crystals. Methods of structural crystallography. Moscow: Nauka, 1979, 384 p. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. IV. Три вопроса из курса кристалломорфологии // Вестник геонаук. 2020. № 5(305). С. 28–30. DOI:10.19110/geov.2020.5.5
Voytekhsy Yu. L. From teaching experience. IV. Three questions from the course of crystal morphology. Vestnik of Geosciences, 2020, 5(305), pp. 28–30. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. 100 лет Федоровскому институту // Зап. ПМО. 2021. № 4. С. 135–141. DOI:10.31857/S0869605521040080
Voytekhsy Yu. L. 100 years of the Fedorov Institute. Proc. Rus. Mineral. Soc., 2021, 4, pp. 135–141. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. XI. История и философия в курсах кристаллографии и минералогии // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 44–52. DOI:10.19110/geov.2022.6.5
Voytekhsy Yu. L. From teaching experience. XI. History and philosophy at the crystallography and mineralogy courses. Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330), pp. 44–52. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. XIII. Имя кристаллического полиэдра. К 130-летию со дня рождения А. Ф. Лосева и 100-летию «Философии имени» // Вестник геонаук. 2024. 1(349). С. 43–49. DOI:10.19110/geov.2024.1.5
Voytekhsy Yu. L. From teaching experience. XIII. Name of crystal polyhedron. On the occasion of the 130th anniversary of A. F. Losev's birth and the 100th anniversary of the «Philosophy of the Name». Vestnik of Geosciences, 2024, 1(349), pp. 43–49. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. XVII. Бордюры и предельные группы Кюри // Вестник геонаук. 2025. № 4(364). С. 51–56. DOI:10.19110/geov.2025.4.5
Voytekhsy Yu. L. From teaching experience. XVII. Borders and Curie's limit groups. Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 51–56. (in Russian)
- Гегель Г. В. Ф. Энциклопедия философских наук. Т. 1. Наука логики. М.: Мысль, 1974. 452 с.
Hegel G. V. F. Encyclopedia of philosophical sciences. V. 1. Science of logic. Moscow: Mysl, 1974, 452 p. (in Russian)
- Геллер Э. Слова и вещи. М.: Иностранная литература, 1962. 344 с.
Gellner E. Words and things. Moscow: Foreign literature, 1962, 344 p. (in Russian)
- Зоркий П. М. Симметрия молекул и кристаллических структур. М.: МГУ, 1986. 232 с.
Zorkiy P. M. Symmetry of molecules and crystal structures. Moscow: Moscow State University, 1986, 232 p. (in Russian)
- Лейбниц Г. В. Переписка с Кларком // Сочинения в 4 т. М.: Мысль, 1982. Т. 1. С. 430–528.
Leibniz G. W. Correspondence with Clark. Works in 4 vol. Moscow: Mysl, 1982. V. 1, pp. 430–528. (in Russian)
- Лосев А. Ф. Философия имени. М.: МГУ, 1990. 276 с.
Losev A. F. Philosophy of the name. Moscow: Moscow State University, 1990, 276 p. (in Russian)



- Попов Г. М., Шафрановский И. И. Кристаллография. М.; Л.: Госгеолиздат, 1941. 242 с.
 Popov G. M., Shafranovsky I. I. Crystallography. Moscow, Leningrad: Gosgeolizdat, 1941, 242 p. (in Russian)
- Попов Г. М., Шафрановский И. И. Кристаллография. М.: Высшая школа, 1964. 370 с.
 Popov G. M., Shafranovsky I. I. Crystallography. Moscow: Vyshaya shkola, 1964, 370 p. (in Russian)
- Степанов Ю. С. Имена. Предикаты. Предложения. М.: Наука, 1981. 360 с.
 Stepanov Yu. S. Names. Predicates. Sentences. Moscow: Nauka, 1981, 360 p. (in Russian)
- Флинт Е. Е. Практическое руководство по геометрической кристаллографии. М.; Л.: Госгеолиздат, 1937. 156 с.
 Flint E. E. Practical guide to geometric crystallography. Moscow, Leningrad: Gosgeolizdat, 1937, 156 p. (in Russian)
- Фуко М. Слова и вещи. Археология гуманитарных наук. М.: Прогресс, 1977. 488 с.
 Foucault M. Words and things. Archaeology of the human sciences. Moscow: Progress, 1977, 488 p. (in Russian)
- Шафрановский И. И. К вопросу о простейшем выводе элементов симметрии // Уч. зап. ЛГУ. 1945. № 65. Сер. геол.-почв. наук. Вып. 13. С. 31–40.
 Shafranovsky I. I. On the question of the simplest derivation of symmetry elements. Proc. Leningrad State University, Ser. Geol.-Soil Sci., 1945, 13, pp. 31–40. (in Russian)
- Шафрановский И. И. Структурные разновидности простых форм кристаллов // Уч. зап. ЛГУ. Сер. геол.-почв. наук. 1948. Вып. 14. С. 3–17.
 Shafranovsky I. I. Structural varieties of simple crystal forms. Proc. Leningrad State University, Ser. Geol.-Soil Sci., 1948, 14, pp. 3–17. (in Russian)
- Шафрановский И. И., Франк-Камеицкий В. А. История вывода 32 видов симметрии кристаллов // А. В. Гадолин. Вывод всех кристаллографических систем и их подразделений из одного общего начала. Л.: Изд. АН СССР, 1954. С. 112–143.
 Shafranovsky I. I., Frank-Kamenetsky V. A. The history of the derivation of 32 species of crystal symmetry. A. V. Gadolin. The derivation of all crystallographic systems and their subdivisions from one common principle. Leningrad: USSR Acad. Sci., 1954, pp. 112–143. (in Russian)
- Voytekhovskiy Yu. L. Band and Curie limit symmetry groups // Acta Crystallographica. Section A. Foundations and Advances. 2025. A81. P. 350–352. <https://doi.org/10.1107/S2053273325003341>

Поступила в редакцию / Received 28.07.2025



Юшкинские чтения – 2026 – Yushkin Readings

Министерство науки и высшего образования РФ
Российское минералогическое общество
Федеральный исследовательский центр
«Коми научный центр Уральского отделения
Российской академии наук»
Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина

19–21 мая 2026 года в г. Сыктывкаре проводят
Российскую конференцию с международным участием
**Современные проблемы теоретической,
экспериментальной и прикладной минералогии»
(Юшкинские чтения – 2026)**
и приглашают принять участие.

Тематика конференции:

1. История, философия и методология минералогии.
2. Генетическая минералогия. Типоморфизм минералов и минеральных ассоциаций. Генетико-информационная минералогия.
3. Минералогическая кристаллография и кристаллогенезис. Неклассические механизмы кристаллообразования.
4. Экспериментальное моделирование процессов минералообразования. Кристаллосинтез.
5. Конституция и свойства минералов. Минераловедение. Физика минералов.
6. Микронанодисперсное состояние минерального вещества. Наноминералогия.
7. Биоминералогия и биоминеральные взаимодействия. Органические минералы и минералоиды.
8. Минералогия месторождений полезных ископаемых. Топоминералогия.
9. Минералогия астроблем и метеоритов.
10. Искусственный интеллект, большие данные и машинное обучение в минералогии.
11. Геоматериаловедение. Рациональное использование минерального сырья. Новые материалы на минеральной основе.
12. Проблемы сохранения геологической информации. Геологические музеи.

Бюро оргкомитета:

председатель – А. М. Асхабов, академик РАН;
сопредседатели – Ю. Б. Марин, чл.-корр. РАН, И. Н. Бурцев, к. г.-м. н.;
заместитель председателя – Т. Г. Шумилова, д. г.-м. н.;
ученый секретарь – Н. И. Максименко, к. г.-м. н.

Адрес:

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, д. 54,
Сыктывкар, Республика Коми, 167982

Контакты:

(8212) 24-53-53 – приемная директора
(8212) 44-71-51 – Козырева Ирина Владимировна
(ученый секретарь ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН)
(8212) 44-71-51 – Максименко Надежда Игоревна
(оргкомитет конференции)

Факс: (8212) 24-09-70, 24-53-46

Эл. почта: min2026@geo.komisc.ru

Сайт: <https://geo.komisc.ru>

Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation
Russian Mineralogical Society
Federal Research Center «Komi Scientific Center
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences»
N. P. Yushkin Institute of Geology

will hold a Russian conference
with international participation
**«Modern Problems of Theoretical,
Experimental and Applied Mineralogy»
(Yushkin Readings 2026)**
on May 19–21, 2026 in Syktyvkar, and invite to take part.

Conference Topics:

1. History, Philosophy and Methodology of Mineralogy.
2. Genetic Mineralogy. Typomorphism of minerals and mineral associations. Genetic-information mineralogy.
3. Mineralogical crystallography and crystallogenesis. Non-classical mechanisms of crystal formation.
4. Experimental modeling of mineral formation processes. Crystal synthesis.
5. Constitution and properties of minerals. Mineral science. Physics of minerals.
6. Micro-nanodispersed state of mineral matter. Nanomineralogy.
7. Biomineralogy and biomineral interactions. Organic minerals and mineraloids.
8. Mineralogy of mineral deposits. Topomineralogy.
9. Mineralogy of astroblemes and meteorites.
10. Artificial intelligence, big data and machine learning in mineralogy.
11. Geomaterials science. Rational use of mineral raw materials. New mineral-based materials.
12. Problems of preserving geological information. Geological Museums.

Organizing Committee Bureau:

Chairman – A. M. Askhabov, Academician of RAS;
Co-Chairs – Yu. B. Marin, Corresponding Member of RAS,
I. N. Burtsev, Cand. Sc.;
Deputy Chairman – T. G. Shumilova, D. Sc.;
Scientific Secretary – N. I. Maksimenko, Cand. Sc.

Address:

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS
54 Pervomayskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982

Contacts:

+7 (8212) 24-53-53 – Director's Office
+7 (8212) 44-71-51 – Irina Vladimirovna Kozyreva
(Scientific Secretary, Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS)
+7 (8212) 44-71-51 – Nadezhda Igorevna Maksimenko
(Conference Organizing Committee)
Fax: +7 (8212) 24-09-70, 24-53-46
E-mail: min2026@geo.komisc.ru
Website: <https://geo.komisc.ru>

Редакторы издательства:

О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка:

Р. А. Шуктомов

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 31.10.2025.
Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 5.5. Тираж 140. Заказ 1254. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес редакции: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото П. Безносова, А. Перетягина, Н. Уляшевой, А. Иевлева, Н. Сокериной.