



*Vestnik of Geosciences*  
**Вестник геонаук**

Январь  
January  
2026,  
№ 1 (373)

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. Пушчаровский*, 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. Voytekhovskiy*, 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



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

[geo.komisc.ru/vestnik](http://geo.komisc.ru/vestnik)

## Содержание

## Content

Комплексный анализ строения нижнеюрского пласта J1-I в пределах Хапчгайского мегавала Вилуйской синеклизы <i>Е. А. Делиу, Е. В. Таскаева</i> ..... 3	Complex analysis of the structure of the Lower Jurassic J1-I bed within the Khapchagai megaswell of the Vilyuy syncline <i>E. A. Deliu, E. V. Taskaeva</i> ..... 3
Химико-физическая диагностика образцов тектита <i>А. Ю. Лысюк, В. П. Лютюев, О. С. Головатая</i> ..... 14	Chemical and physical diagnostics of tektites <i>A. Y. Lysiuk, V. P. Lyutoev, O. S. Golovataya</i> ..... 14
Минералогия медных шлаков Кировградского завода (Свердловская область) <i>Ю. В. Ерохин, В. С. Пономарев, А. В. Захаров, Л. В. Леонова</i> ..... 22	The mineralogy of copper slags the Kirovgrad plant (Sverdlovsk region) <i>Yu. V. Erokhin, V. S. Ponomarev, A. V. Zakharov, L. V. Leonova</i> ..... 22
Повышение качества трёхмерной геологической модели за счет сейсмического прогноза на основе нейросетевого моделирования <i>К. А. Сенькина, Д. В. Истомина</i> ..... 32	Refinement of a 3D geological model through neural-simulation-based seismic prediction <i>K. A. Senkina, D. V. Istomina</i> ..... 32
Из архива профессора Д. П. Григорьева: письма академиков Н. В. Белова и А. В. Шубникова <i>Ю. Л. Войтеховский</i> ..... 42	From Professor D. P. Grigoriev's archive: letters from Academicians N. V. Belov and A. V. Shubnikov <i>Yu. L. Voytekhovsky</i> ..... 42

## Хроника, события, факты

## Chronicle, events, facts

Новые издания ..... 52	New publications ..... 52
Планы научных мероприятий в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на 2026 год ..... 52	Scientific event plans at the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS in 2026 ..... 52

Правила  
оформления  
статей



Vestnik  
article  
Formatting

[geo.komisc.ru/vestnik/authors](http://geo.komisc.ru/vestnik/authors)



## Комплексный анализ строения нижнеюрского пласта J1-I в пределах Хапчагайского мегавала Вилуйской синеклизы

Е. А. Делиу<sup>1, 2</sup>, Е. В. Таскаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Тюмень, Россия

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия  
e\_deliu@vniigaz.gazprom.ru, e\_taskaeva@vniigaz.gazprom.ru

На изученной территории объектом исследований являются нижнеюрские терригенные отложения продуктивного пласта J1-I геттанг-плинсбахского возраста, которые характеризуются небольшими глубинами залегания и являются перспективными для углеводородных изысканий.

На основе седиментологического анализа керна новой скважины установлено, что отложения пласта J1-I сформировались в условиях проксимальной части фронта дельты и сублиторальных обстановок. Поверхность несогласия выделена на основании седиментологического, литологического и икнофациального анализа кернового материала и прослежена по всей площади исследования с увязкой геолого-геофизической информации по скважинам на основе секвенс-стратиграфического метода. По результатам седиментологического анализа с использованием данных каротажных диаграмм и трехмерной сейсморазведки МОГТ 3D построена литолого-фациальная модель пласта J1-I, в которой отражены процессы распределения осадочного материала на исследуемой площади.

**Ключевые слова:** циклиты, фации, дельта, трансгрессия, нижнеюрские отложения, кызылсырская свита, Вилуйская синеклиза

## Complex analysis of the structure of the Lower Jurassic J1-I bed within the Khapchagai megaswell of the Vilyuy syncline

E. A. Deliu<sup>1, 2</sup>, E. V. Taskaeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LLC, Tyumen, Russia

<sup>2</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

The object of research is the Lower Jurassic terrigenous deposits that compose the productive J1-I formation of the Gettang-Plinsbach age. In the studied area, these deposits are characterized by shallow occurrence depths and are promising for hydrocarbon exploration.

Based on the sedimentological analysis of the new well core, it was determined that the J1-I formation deposits were formed in the proximal part of the delta front and in sublittoral environments. The surface of the unconformity was identified on the basis of sedimentological, lithological and ichnofacies analysis of core material and it was traced across the entire study area using the sequence stratigraphic method to correlate geological and geophysical information from wells. Based on the results of sedimentological analysis, using logging data and seismic CDPM 3D, a lithofacies model of the J1-I formation was constructed, which reflects the distribution of sedimentary material in the study area.

**Keywords:** cycrites, facies, delta, transgression, Lower Jurassic deposits, Kyzyl-Syr formation, Vilyuy syncline, Eastern Siberia

### Введение

Перспективность Вилуйской нефтегазоносной области подтверждается открытием газоконденсатных месторождений в залежах различного возраста, отмечены и многочисленные нефтегазопроявления в пределах Вилуйской синеклизы. Промышленные притоки газа и газоконденсата, полученные в скважинах из отложений верхней перми, нижнего триаса и нижней юры, доказывают потенциальную нефтегазоносность исследуемой площади. Несмотря на небольшие глубины, газоконденсатные и газовые залежи, приуроченные к юрским отложениям Вилуйской синеклизы, остаются слабоизученными.

Продуктивный пласт J1-I, относящийся к кровле кызылсырской свиты (геттанг-плинсбахского возраста) (Фролов и др., 2019) представлен терригенными отложениями и является объектом данного исследования. Наличие продуктивных отложений в кызылсырской свите подтверждают актуальность исследования. Важным фактором является то, что исследуемые отложения фиксируют событие регионального масштаба — глобальную юрскую трансгрессию, зафиксированную различными авторами в этом регионе (Девятков и др., 2011).

Целью выполненного исследования является выделение области распределения коллекторов, перспек-

**Для цитирования:** Делиу Е. А., Таскаева Е. В. Комплексный анализ строения нижнеюрского пласта J1-I в пределах Хапчагайского мегавала Вилуйской синеклизы // Вестник геонаук. 2026. 1(373). С. 3–13. DOI: 10.19110/geov.2026.1.1

**For citation:** Deliu E. A., Taskaeva E. V. Complex analysis of the structure of the Lower Jurassic J1-I bed within the Khapchagai megaswell of the Vilyuy syncline. Vestnik of Geosciences, 2026, 1(373), pp. 3–13, doi: 10.19110/geov.2026.1.1

тивных для поиска залежей углеводородов. По результатам седиментологического анализа данных по вновь пробуренной скважине на площади исследования с использованием каротажных диаграмм, результатов интерпретации геофизических исследований скважин и привлечением динамического анализа трехмерных сейсморазведочных данных построена литолого-фациальная модель пласта J1-I. Применение комплексного анализа строения пласта помогло установить процессы распределения осадочного материала на исследуемой площади.

### Материалы и методы исследования

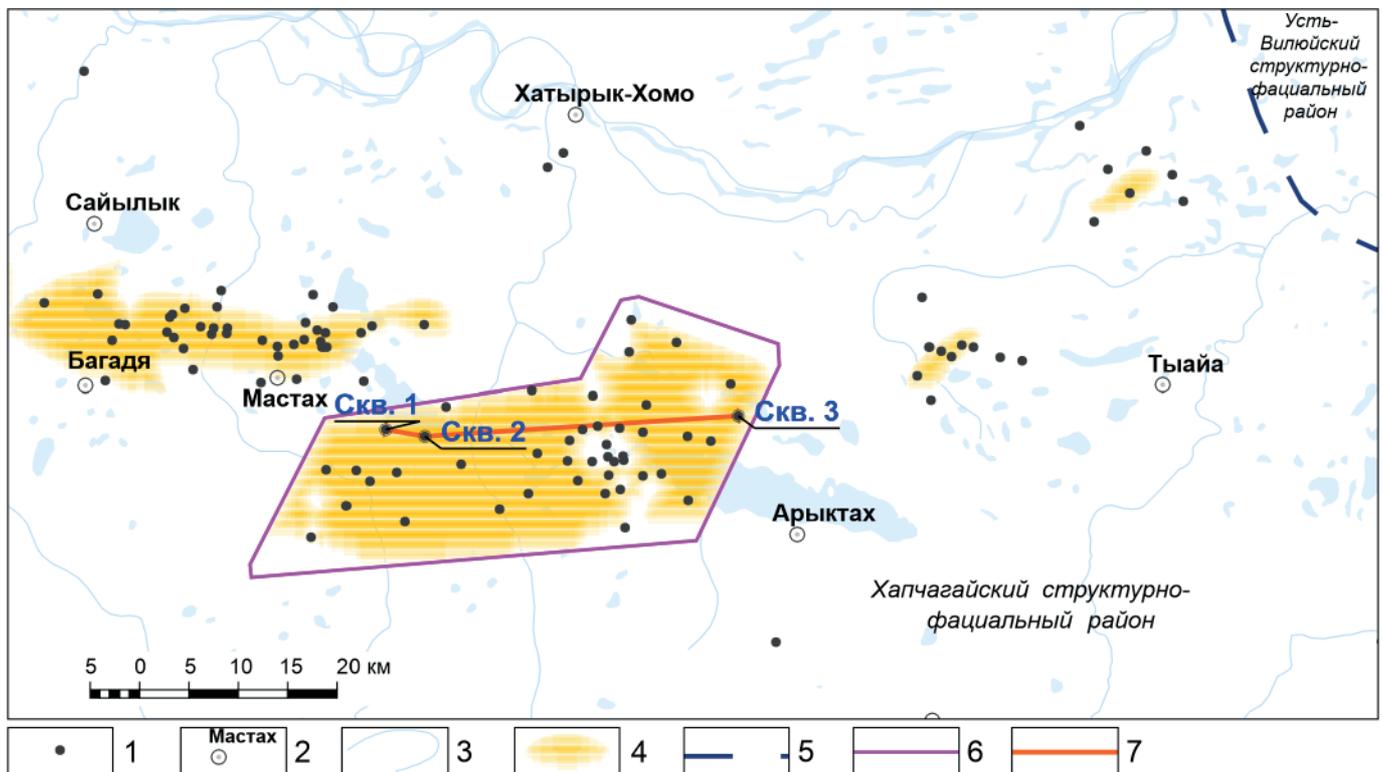
С целью детализации геологического строения исследуемой площади проанализированы опубликованные данные по региональным исследованиям геологического строения Вилуйской синеклизы, каротажные материалы по 44 скважинам, седиментологическое описание керна по скважине 3, материалы сейсморазведочных работ МОГТ 3D (рис. 1).

В основу данного исследования положены полученные авторами результаты изучения кернового материала объемом 58.5 м, в том числе 13.4 м — вынос из сунтарской свиты, являющейся покрывкой изучаемых отложений, и 45.1 м — вынос из отложений пласта J1-I (100 % выноса керна пласта J1-I), 18 шлифов. При детальном описании кернового материала привлечены методики ихнологического (Knaust, 2017; Gingras et al., 2024) и фациального (Алексеев, 2002;

Барабоскин, 2007; Чернова, 2008) анализов. Литолого-минералогические исследования включали изучение пород в шлифах, определение гранулометрического и минерального состава, определение карбонатных и глинистых минералов цемента в коллекторах с использованием карбонатометрии и рентгеноструктурного анализа.

Реконструкция условий формирования и определение обстановок осадконакопления проводилась в соответствии с методиками, предложенными Рейнеком и др., 1981; Редингом и др., 1990; James et al., 2010; Rossi et al., 2017; Steel et al., 2024.

В настоящее время метод секвентной стратиграфии (В. П. Алексеев, Ю. Н. Карогодин, А. А. Нежданов, Van Wagoner, Posamentier и другие) широко применяется при восстановлении истории формирования осадочных отложений. Этот метод используется при увязке разнофациальных отложений, что позволяет расчленять разрез на секвенции различного уровня, устанавливать вертикальное и латеральное распределение осадков, образующих секвенции, и картировать поверхности несогласий, связанные с перерывами в осадконакоплении. Границы секвенций отражают изменения седиментационного и тектонического режимов бассейна и представлены эрозионными поверхностями, а стратиграфическая поверхность, отражающая изменение в типе напластования, выделяется как коррелируемое согласие (СС). Стратиграфическая поверхность, связанная с дном морского бассейна седиментации, в конце этапа трансгрес-



**Рис. 1.** Схема геолого-геофизической изученности площади исследования. Условные обозначения: 1 — скважины; 2 — села; 3 — элементы гидрографии; 4 — месторождения; 5 — границы структурно-фациальных районов; 6 — границы сейсморазведочных работ (метод общей глубинной точки 3D); 7 — линия схемы корреляции, представленной на рис. 6 (Делиу Е. А., 2025)

**Fig. 1.** Diagram of geological and geophysical coverage of the study area. Legend: 1 — wells; 2 — villages; 3 — waters; 4 — deposits; 5 — structural-facies area boundaries; 6 — seismic exploration boundaries (3D common depth point method); 7 — line of interwell correlation shown in Fig. 6 (Deliu E. A., 2025)



сии определяется как поверхность максимального затопления (MFS).

В фазу замедления темпов роста относительного уровня моря формируются отложения системного тракта высокого стояния (HST). В прибрежных участках бассейна седиментации происходит продвижение береговой линии в сторону моря. По мере затопления шельфа береговая линия отступает (TST) и осадки трансгрессивного системного тракта последовательно перекрывают размытые породы различных трактов. (Жемчугова и др., 2021).

В работе реализована стандартная методика построения литолого-фациальных моделей (Чернова, 2008). На основании седиментологического анализа отложений, вскрытых скважиной, установлена фациальная обстановка нижнеюрских пластов. По каротажным материалам выполнена детальная корреляция пласта, проанализированы электрометрические модели фаций, привлечены материалы динамического анализа по сейсморазведочным данным МОГТ 3D. В результате на основе комплексирования всей геолого-геофизической информации построена литолого-фациальная схема пласта J1-I.

### Краткая характеристика вещественного состава отложений

В скважине 3 продуктивный пласт J1-I (глубины залегания 2086.0–2128.5 м) представлен аргиллитами с неравномерным содержанием алевритовой примеси, песчаниками от тонко- до мелко- и среднезернистых, мелко- и крупнозернистыми алевролитами. Песчаники и алевролиты сцементированы глинистым и глинисто-карбонатным цементом и соответствуют полевощпато-кварцевым грауваккам. Среди глинистых минералов преобладают каолинит, хлорит, иллит; смешанослойных образований иллит-сметитового ряда существенно меньше. Карбонатные минералы цемента представлены кальцитом и доломитом с редкими проявлениями сидерита. Литологический и минералогический состав отложений, определённый авторами, не противоречит опубликованным описаниям по скважинам, вскрывшим юрские отложения в этом регионе (Гриненко, 2013).

### Результаты и их обсуждение

#### Фациальная характеристика отложений

В строении нижней части (суммарно ~20 м) продуктивного пласта J1-I кызылсырской свиты участвуют светло-серые хорошо сортированные песчаники от мелко- и среднезернистых до тонкозернистых разностей, формирующие ряд слоёв с проциклическим строением (циклит с постепенной глинизацией вверх по разрезу). Для них характерно массивное строение, косая слоистость с различными углами наклона слойков. Наиболее грубые песчаные слои, залегающие в основании пласта J1-I, содержат линзовидно-вытянутые обрывки и крупные фрагменты углефицированной растительной органики.

Развитие песчаных отложений с достаточно грубым составом, проциклическим строением и текстурами, характерными для однонаправленных течений различной мощности и силы, в том числе с косовол-

нистой слоистостью, а также полным отсутствием ихнофоссилий, связано с высокой скоростью седиментации, препятствующей заселению субстрата организмами. Перечисленные особенности позволяют предполагать, что изученные песчаные отложения формировались в условиях проксимальной части фронта дельты и являются результатом разгрузки песчаного материала субаквальными продолжениями распределительных русел с заметным влиянием на них волновых сил по мере ослабления потоков (рис. 2).

Слои тёмно-серых (участками со слабым коричневым либо зеленым оттенками) глинистых пород, толщина которых уменьшается от 7.6 м до ~1 м вверх по разрезу, и светло-серых хорошо отсортированных тонко- и мелкозернистых песчаников, реже алевролитов (слои мощностью от ~1.5 м до 4.3 м вверх по разрезу), чередуются между собой в кровле пласта J1-I (суммарно ~17.5 м).

Песчаники в этой части пласта характеризуются разнообразными слоистыми текстурами — волнистой с тонкой косой однонаправленной восходящей рябью, реже — массивной со следами пластичных деформаций осадка. Слои песчаников разделены глинистыми породами (интервалы мощностью 0.1–0.2 м) с тонкой ритмичной горизонтальной и косой разнонаправленной слоистостью, скоплениями мелких обрывков, тонких слойков и линз углефицированной растительной органики. Следует отметить, что наиболее крупные песчаные пачки (мощностью 4.3 и 2 м) не отличаются каким-либо закономерно изменяющимся строением слоевых ассоциаций, однако на отдельных уровнях можно наблюдать, как мелко- и тонкозернистые песчаники переходят в крупно- и мелкозернистые алевролиты, тем самым формируя слои с проциклическим строением (1.5 и 0.5 м), в которых присутствуют углефицированные остатки корневых систем растений *in situ*. Как правило, такие интервалы завершают глинистые породы с массивным обликом и тонкие слои углей (не более 0.1 м).

Песчаные и глинистые отложения вмещают ихноценоз *Cylindrichnus*, *Planolites* (определения Е. В. Таскаевой), содержат редкие следы жизнедеятельности пелеципод.

Глинистые породы представлены частыми тонкими (0.001–0.003 м, максимум 0.005–0.1 м) разьединёнными линзами и слойками, выполненными тонко- и мелкопесчаным, реже алевритовым материалом, который также подчёркивает тонкую разнонаправленную и горизонтальную ритмичную слоистость, текстуры пластичных деформаций осадка.

Глинистые отложения вмещают единичные следы жизнедеятельности пелеципод.

При анализе слоевых ассоциаций и реконструкции условий осадконакопления верхней половины пласта J1-I было обращено внимание на обнаруженный в породах специфический ихноценоз *Planolites*, *Cylindrichnus*, который является индикатором солоновато-водных сред или напряжённых условий с пониженной солёностью. Следы жизнедеятельности пелеципод также могут указывать на формирование отложений в опреснённых обстановках, например подержанных приливно-отливным влиянием. Кроме того, наличие в этой части разреза маломощных слоёв углей, песчаных и алевритовых отложений с проциклическим

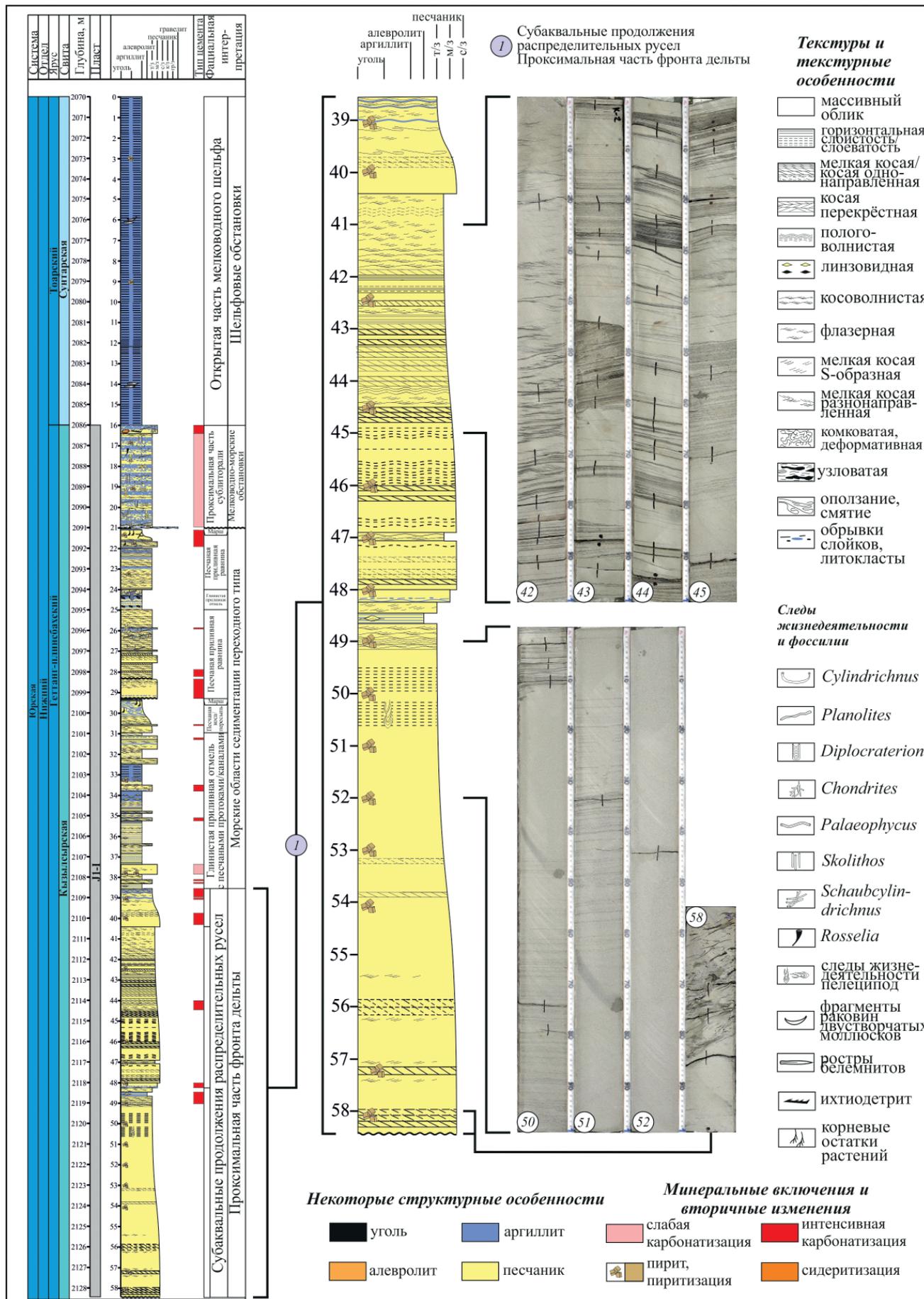


Рис. 2. Седиментологический разрез нижнеюрских отложений, составляющих нижнюю половину продуктивного пласта J1-I (проксимальная часть фронта дельты)

Fig. 2. Sedimentological section of the Lower Jurassic deposition, composing the lower half of productive J1-I bed (proximal part of delta front)

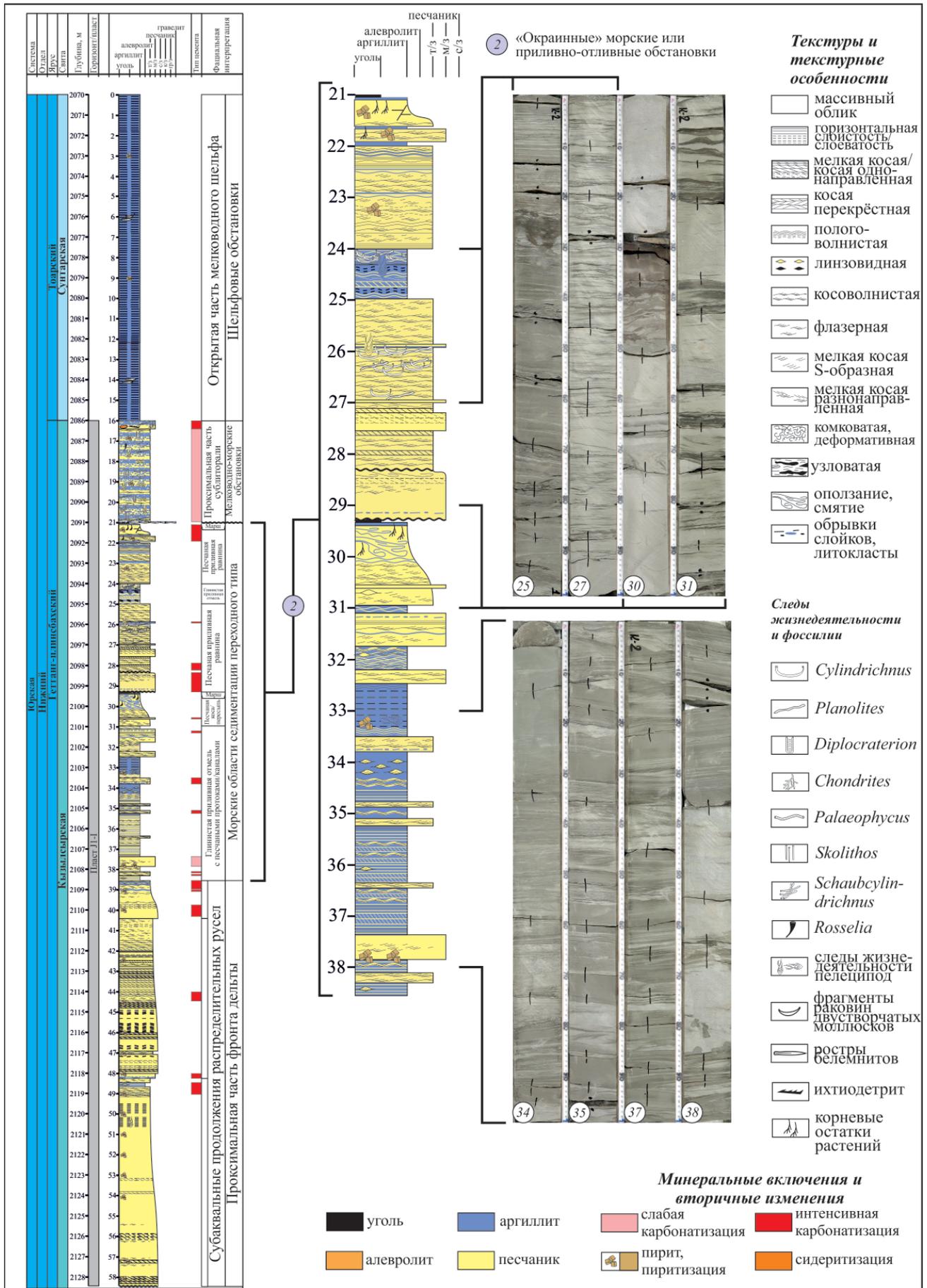


Рис. 3. Седиментологический разрез нижнеюрских отложений, слагающих верхнюю половину продуктивного пласта J1-I (морские области седиментации переходного типа)

Fig. 3. Sedimentological section of the Lower Jurassic deposition, composing the upper half of productive J1-I bed (transitional type of marine depositional environments)

строением и углефицированными остатками корневых систем растений *in situ*, свидетельствует о кратковременных периодах субаэральной экспозиции отложений. Перечисленные диагностические признаки дают основание предполагать накопление изученного интервала в приливно-отливных или морских областях седиментации переходного типа (рис. 3).

При этом глинистые образования с характерной слоистостью, вмещающие запечатанные линзы с текстурами ряби, следует соотносить с глинистыми приливными отмелями, а содержащиеся в них слои песчаников — с наносами проникавших на отмель песчаных протоков/каналов. Наиболее крупные по мощности песчаные пачки с описанными выше слоистыми текстурами без какого-либо закономерно изменяющегося строения слоевых ассоциаций сопоставляются с песчаными приливными равнинами. Небольшие по толщине слои песчаных и алевроитовых отложений с проциклическим строением, с углефицированными остатками корневых систем растений *in situ* характеризуются как песчаные косы (пересыпи). Такие интервалы завершают глинистые породы и тонкие слои углей (марши, приморские болота), что говорит о периодическом понижении уровня моря на рассматриваемом участке территории.

В кровле пласта J1-I (интервал глубин 2086–2091 м) с размывом (слой 0.05 м) с крупными гальками и разнообразными по составу обломками залегают светло-серые хорошо сортированные тонко- и мелкозернистые песчаники с биотурбированной и переработанной волнениями текстурами. Участками породы обогащены ихтиодетритом, вмещают ихноценоз *Planolites*, *Skolithos*, *Cylindrichnus*, *Palaeophycus*, *Diplocraterion*, единичные *Shaubcylindrichnus*, *Rosselia*, *Chondrites* (определения Е. В. Таскаевой), а также следы жизнедеятельности пелеципод.

Резкая смена условий осадконакопления связана с наступлением моря. Ихноценоз *Planolites*, *Skolithos*, *Cylindrichnus*, *Palaeophycus*, *Diplocraterion* характерен для прибрежно-морских условий песчаных незамутненных, в том числе солоновато-водных сред с влиянием приливно-отливных и волновых процессов. Появление в разрезе таких ихнофоссилий, как *Shaubcylindrichnus*, *Rosselia*, которые являются типичными представителями ихнофауны *Cruziana*, может указывать на высокие скорости осадконакопления с последующими эрозионными процессами, что обычно наблюдается во время морских трансгрессий (Knaust, 2017). Кроме того, ихнофоссилии *Chondrites* являются индикатором условий с пониженным содержанием кислорода в придонном слое воды. Перечисленные особенности свидетельствуют о формировании отложений в условиях проксимальной части сублиторали, что подтверждается существенно песчаным составом отложений, наличием текстур активной волновой переработки (рис. 4).

Выше по разрезу (интервал глубин 2086–2070 м) песчаники проксимальной части сублиторали перекрываются глинистыми отложениями тоарского возраста (низы сунтарской свиты) — аргиллитами с фрагментами ростров белемовидного шельфа (Алексеев, 2014).

Следует подчеркнуть, что изученный разрез отличается практически повсеместным проявлением суль-

фидной минерализации в виде комковатых стяжений пирита септариевого облика, что, вероятно, является следствием регрессивных литогенетических процессов.

Таким образом, характерные диагностические признаки, указывающие на формирование исследуемых отложений в условиях проксимальной части фронта дельты и сублиторальных обстановок, обнаружены в пласте J1-I, что соответствует палеогеографическим реконструкциям других авторов (Фролов и др., 2019). Выделены фации субаквальных продолжений распределительных русел, песчаные приливные равнины, глинистые приливные отмели, песчаные протоки / каналы, песчаные косы / пересыпи, марши и приморские болота. Предполагается, что в период формирования отложений пласта J1-I на исследуемой площади сформировалась дельта смешанного типа, на которую оказывали воздействие приливно-отливные процессы и волнения, а постепенное отмирание дельтовых рукавов подтверждает существование областей переходного типа седиментации.

### Модель отложений пласта J1-I

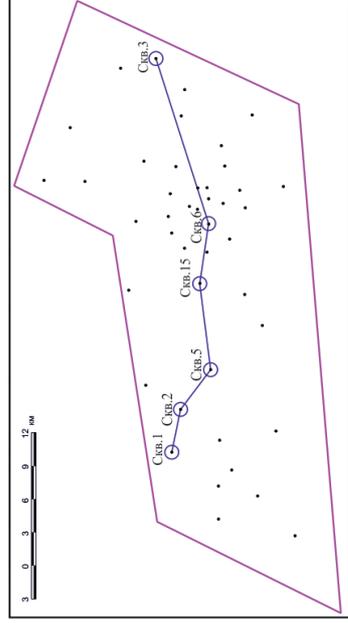
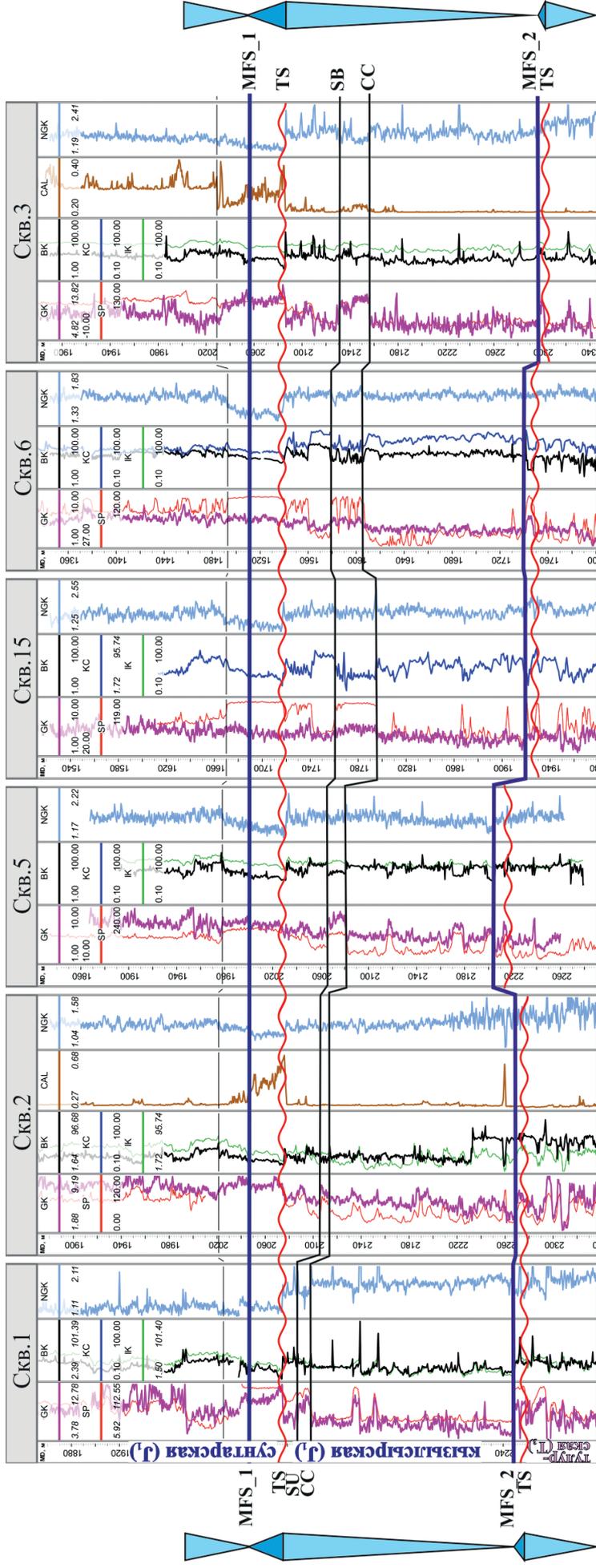
С целью исследования геологического строения построена секвенс-стратиграфическая модель нижнеюрских отложений в пределах Хапчагайского мегавала. Комплекс методов геофизических исследований скважин (ГИС): каротаж потенциалов самопроизвольной поляризации (SP), гамма-каротаж (GK), градиент-зонд (KC), боковой каротаж (BK), индукционный каротаж (IK), кавернометрия (CAL), нейтронный гамма-каротаж (NGK) — использован для стратиграфического расчленения разреза. На основании схем корреляции скважин прослежены реперные горизонты, которые выделены по характерным аномалиям каротажных диаграмм ГИС.

Отложения пласта J1-I разделены на системный тракт высокого стояния (HST), трансгрессивный системный тракт (TST), поверхность несогласия (TS), сформированную на стадии регрессии в период осушения бассейна, присутствие которой подтверждено седиментологическими данными, характерными следами жизнедеятельности роющих организмов типа ихнофауны *Skolithos*, *Diplocraterion* (интервал глубин 2086–2091 м), а также зафиксированы поверхности максимального затопления (MFS).

Согласно седиментологическим данным скважины 3, формирование пласта J1-I происходило в условиях субаквальной и субаэральной части дельты, а также проксимальной части сублиторали. Выделена граница размыва отложений последнего цикла, наличие которой установлено также и в скважине-стратотипе Джикимдинская-1 (Гриненко и др., 2013). Привлечение каротажного материала по скважинам без отбора керна позволяет проследить границу размыва по всей площади исследования. Эрозионная граница выделяется на каротажных диаграммах по изменению формы гамма-каротажа и методу потенциалов самопроизвольной поляризации; дополнительным признаком является резкая или быстрая смена зернистости пород по составу (рис. 5).

Корреляция в разрезах скважин хроностратиграфических границ пластов осуществляется независимо от их литологического состава. С целью уточнения гео-





- MFS — поверхность максимального затопления
- SU — поверхность субаральной эрозии
- SB — граница секвенции
- CC — коррелируемое согласие
- TS — трансгрессивная поверхность
- TST — трансгрессивный системный тракт
- HST — системный тракт высокого стояния уровня моря

Рис. 5. Интерпретация секвенс-стратиграфических границ по данным ГИС (Делиу, 2025)  
 Fig. 5. Sequence stratigraphy boundaries interpretation according to well logs (Deliu, 2025)



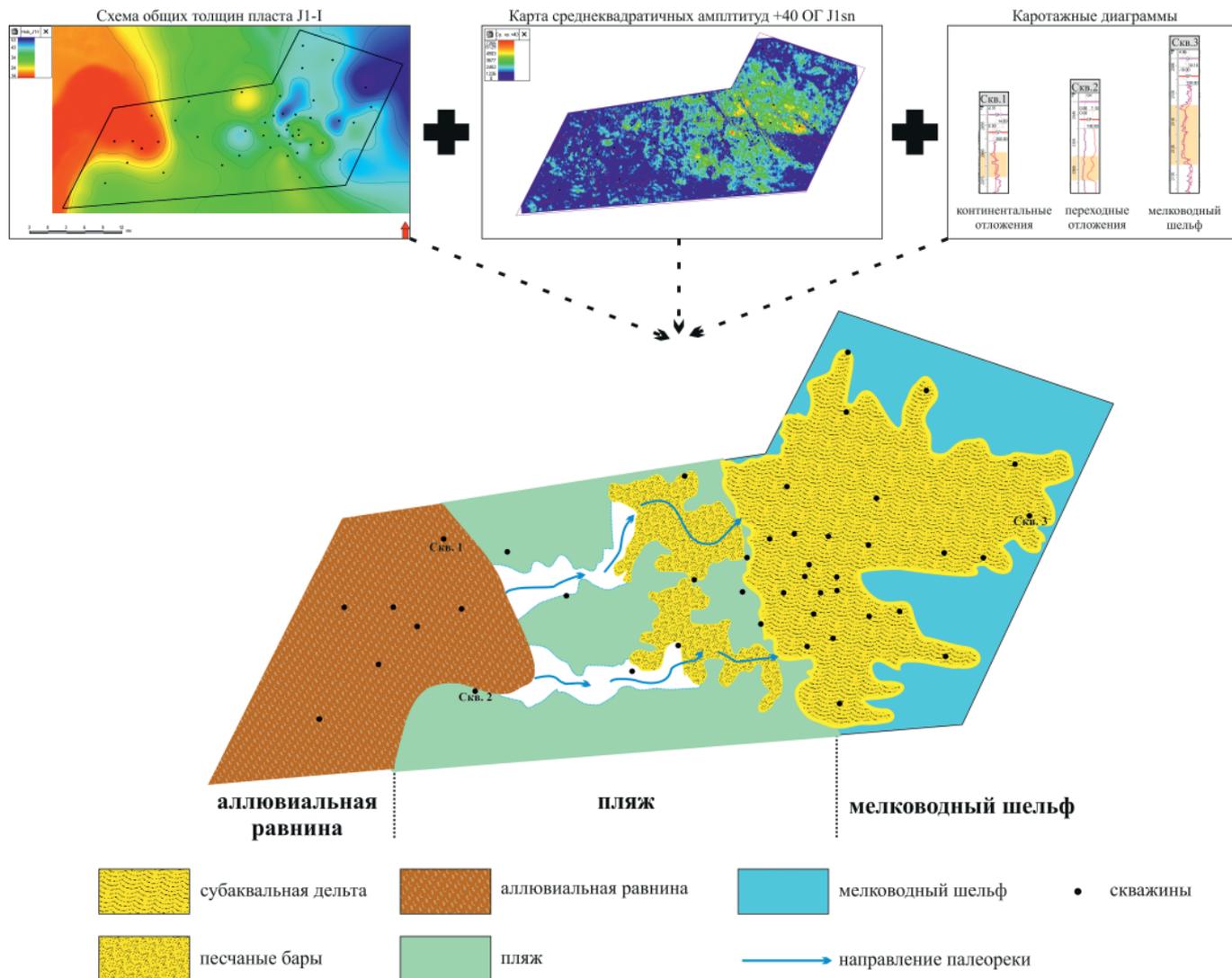


Рис. 7. Литолого-фациальная схема пласта J1-I нижнеюрских отложений

Fig. 7. Lithofacies scheme of the Lower Jurassic J1-I bed

### Выводы

В результате проведенных исследовательских работ подтверждено, что формирование нижнеюрских терригенных отложений геттанг-плинсбахского возраста, слагающих пласт J1-I (верхняя часть кызылсырской свиты), происходило в условиях субаквальной и субаэральной частей дельты, а также проксимальной части сублиторали. Предполагается, что в дотоарское время на исследуемой площади существовала дельта смешанного типа, на которую оказывали влияние приливно-отливные процессы и волнения, а постепенное отмирание дельтовых рукавов приводило к формированию морских областей седиментации переходного типа.

Формирование глинистых отложений тоарского возраста, относящихся к низам сунтарской свиты, происходило на фоне крупной юрской трансгрессии регионального масштаба в условиях открытой части мелководного шельфа и зафиксировано выделенной поверхностью несогласия.

В результате комплексного анализа имеющейся геолого-геофизической информации построена литолого-фациальная модель пласта J1-I, в которой отражены процессы распределения осадочного матери-

ала по латерали, что позволяет учитывать полученные результаты в программе геолого-разведочных работ на площади исследования.

Авторы искренне признательны к. г.-м. н. О. Ю. Мельничуку за ряд конструктивных замечаний, способствующих улучшению формулировок и систематизации материала.

### Литература / References

Алексеев В. П. Атлас субаквальных фаций нижнемеловых отложений Западной Сибири (ХМАО-Югра). Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 284 с.  
 Alekseev V. P. Atlas of the Lower Cretaceous subaqueous facies in West Siberia (KhMAO-Yugra), Yekaterinburg: USMU; 2014. 284 p. Russian.  
 Алексеев В. П. Литолого-фациальный анализ: Учебно-методическое пособие к практическим занятиям и самостоятельной работе по дисциплине «Литология». Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2002. 147 с.  
 Alekseev V. P. Lithofacies analysis: Teaching-methodical instruction of sediments and self-learning in lithology. Yekaterinburg: USMU; 2002. 147 p. Russian.  
 Барбошкин Е. Ю. Практическая седиментология (терригенные коллектора). Томск: Центр профессиональ-



- ной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 2007. 154 с.
- Baraboshkin E. Yu. Practical sedimentology (terrigenous reservoirs). Tomsk: TPU center for professional retraining of oil and gas industry specialists; 2007. 154 p. Russian.
- Гриненко В. С., Князев В. Г., Девятков В. П., Никитенко Б. Л., Шурыгин Б. Н. Некоторые типовые разрезы терригенной седиментации лаптевского подкомплекса (Т3r-J3v) Восточно-Сибирского осадочного бассейна и их корреляционное значение // Вестник Госкомгеологии — 2013. № 1 (12). С. 21–48.
- Grinenko V. S., Knyazev V. G., Devyatov V. P., Nikitenko B. L., Shurygin B. N. Some typical sections of terrigenous sedimentation of the Laptev subcomplex (T3r-J3v) of the East Siberian sedimentary basin and their correlation significance. Bulletin of the State Committee for Geology. 2013;1(12):21–48. Russian.
- Девятков В. П., Никитенко Б. Л., Шурыгин Б. Н. Палеогеография Сибири в юрском периоде на этапах основных перестроек // Новости палеонтологии и стратиграфии. 2011. № 16–17. С. 87–101.
- Devyatov V. P., Nikitenko B. L., Shurygin B. N. Jurassic paleogeography of Siberia during the major reorganizational stages. News on paleontology and stratigraphy. 2011;16–17:87–101. Russian.
- Делиу Е. А. Особенности геологического строения нижнеюрских отложений Виллюйской синеклизы // Региональная геология и металлогения. 2025. Т. 32. № 1 (101). С. 71–78.
- Deliu E. A. Geological structure of the Lower Jurassic deposits in the Vilyuy Syncline. Regional Geology and Metallogeny. 2025;32(1):71–78. Russian.
- Делиу Е. А. Секвенс-стратиграфия как инструмент исследования геологического строения нижнеюрских отложений в пределах Хапчагайского мегавала // TATARSTAN UPEXPRO 2025. СПб., 2025, С. 237–238.
- Deliu E. A. Sequence stratigraphy as a tool for studying the geological structure of Lower Jurassic sediments within the Khapchagai Megasequence. TATARSTAN UPEXPRO, 2025, 2025. St. Petersburg; 2025:237–238. Russian.
- Жемчугова В. А., Рыбальченко В. В., Шарданова Т. А. Секвенс-стратиграфическая модель нижнего мела Западной Сибири // Георесурсы. 2021. 23(2). С. 179–191.
- Zhemchugova V. A., Rybalchenko V. V., Shardanova T. A. Sequence-stratigraphic model of the West Siberia lower cretaceous. Georesources. 2021;23(2):179–191. Russian.
- Окнова Н. С. Неантиклинальные ловушки и их примеры в нефтегазоносных провинциях // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2012. Т. 7. № 1.
- Oknova N. S. Nonanticlinal traps — examples from Volga-Ural and Western Siberia oil-and-gas provinces. Oil and gas geology. Theory and practice. 2012;7(1). Russian.
- Позаментьер Г., Аллен Дж. П. Секвенсная стратиграфия терригенных отложений. Основные принципы и применение. М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 436 с.
- Posamentier H., Allen J. P. Sequential stratigraphy of terrigenous deposits. Basic principles and applications. Moscow-Izhevsk: Institute of Computer Research; 2014. 436 p. Russian.
- Рединг Х. Г., Коллинсон Дж. Д., Аллен Ф. А., Эллиот Т., Шрейбер Б. Ш., Джонсон Г. Д., Болдуин К. Т., Селлвуд Б. У., Дженкинс Х. К., Стоу Д. А. В., Эдуардз М., Митчелл А. Х. Г. Обстановки осадконакопления и фации. М.: Мир, 1990. Т. 1. 352 с.
- Reading H. G., Collinson J. D., Allen F. A., Elliot T., Schreiber B. S., Johnson G. D., Baldwin K. T., Sellwood B. W., Jenkins H. K., Stowe D. A. V., Edwards M., Mitchell A. X. G. Sedimentation environments and facies. Moscow: Mir; 1990; V. 1. 352 p. Russian.
- Рейнек Г.-Э., Сингх И. Б. Обстановки терригенного осадконакопления (с рассмотрением терригенных кластических осадков). М.: Недра, 1981. 439 с.
- Reineck H. E., Singh I. B. Terrigen sedimentation environments (with a consideration of terrigen clastic sediments). Moscow: Nedra; 1981. 439 p. Russian.
- Ситников В. С., Алексеев Н. Н., Павлова К. А., Погодаев А. В., Слепцова М. И. Новейший прогноз и актуализация освоения нефтегазовых объектов Виллюйской синеклизы // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2017. Т. 12. № 1.
- Sitnikov V. S., Alekseev N. N., Pavlova K. A., Pogodaev A. V., Sleptsova M. I. The latest forecast and actualization of the development of oil and gas objects in the Vilyuy Syncline. Oil and gas geology. Theory and practice. 2017;12(1). Russian.
- Фролов С. В., Карньюшина Е. Е. и др. Особенности строения, осадочные комплексы и углеводородные системы Лено-Виллюйского нефтегазоносного бассейна // Георесурсы. 2019. 21(2). С. 13–30. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2019.2.13-309>
- Frolov S. V., Karnyushina E. E. et al. Features of the structure, sedimentary complexes, and hydrocarbon systems of the Leno-Vilyuisky oil and gas basin. Georesursy. 2019;21(2):13–30. Russian.
- Чернова О. С. Литолого-фациальный и формационный анализ нефтегазоносных толщ: Учебное пособие по короткому курсу. Томск: Центр профессиональной переподготовки специалистов нефтегазового дела ТПУ, 2008. 250 с.
- Chernova O. S. Lithological-facial and formation analysis of oil-and-gas-producing formations: A short course manual. Tomsk: TPU center for professional retraining of oil and gas specialists; 2008. 250 p. Russian.
- Гинграс М. К., Макеарн Дж. А., Даштгард Ш. Е., Банн К. Л. The Teichichnus Ichnofacies: Its neoichnological basis and identification in the rock record. Sedimentology; 2024. 34 p.
- Gingras M. K., MacEachern J. A., Dashtgard S. E., Bann K. L. The Teichichnus Ichnofacies: Its neoichnological basis and identification in the rock record. Sedimentology; 2024. 34 p.
- James N. P., Dalrymple R. W. Facies Models 4. Publisher: Geological Association of Canada; 2010. 588 p.
- Knaust D. Atlas of Trace Fossils in Well Core. Cham: Springer International Publishing; 2017. 209 p.
- Rossi V. M., Perillo M. M., Steel R. J., Olariu C. Quantifying mixed-process variability in shallow-marine depositional systems: What are sedimentary structures really telling us? Journal of Sedimentary Research. 2017;87:1060–1074
- Steel R. J., Osman A., Rossi V. M., Alabdullatif J., Olariu C., Peng Y., Rey F. Subaqueous deltas in the stratigraphic record: Catching up with the marine geologists. Earth-Science Reviews. 2024;256:104–879.

Поступила в редакцию / Received 30.10.2025



## Химико-физическая диагностика образцов тектита

А. Ю. Лысюк<sup>1</sup>, В. П. Лютоев<sup>1</sup>, О. С. Головатая<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, *andra227@yandex.ru*

<sup>2</sup> СГУ им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия, *oxana\_1958@mail.ru*

Методами химического анализа, электронной микроскопии, инфракрасной, <sup>57</sup>Fe-мёссбауэровской спектроскопии и электронного парамагнитного резонанса охарактеризованы два образца природного стекла из коллекции академика Н. П. Юшкина, отнесенные предположительно к тектитам австралоазиатского поля рассеяния. По результатам исследований оба образца имеют типичные характеристики австралоазиатских тектитов индокитайского фланга разброса (индошинитов). Образцы хорошо различаются по химическому составу и спектроскопическим характеристикам, степени полимеризации алюмосиликатного каркаса и структурным позициям ионов железа. Различие соотнесено с разноудаленными полями в пределах одного региона.

**Ключевые слова:** *тектиты, поля разброса, алюмосиликатные природные стекла, инфракрасная спектроскопия, электронный парамагнитный резонанс, <sup>57</sup>Fe-мёссбауэровская спектроскопия*

## Chemical and physical diagnostics of tektites

A. Y. Lysiuk<sup>1</sup>, V. P. Lyutoev<sup>1</sup>, O. S. Golovataya<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

<sup>2</sup> Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar, Russia

Two samples of natural glass from the collection of Academician N. P. Yushkin, presumably attributed to tektites of the Australasian scattering field, were characterized by chemical analysis, electron microscopy, infrared, <sup>57</sup>Fe Mossbauer spectroscopy, and electron paramagnetic resonance. According to the research results, both samples have typical characteristics of the Australasian tektites of the Indochinese flank (Indochinites). The samples differ well in chemical composition and spectroscopic characteristics, the degree of polymerization of the aluminosilicate framework, and the structural positions of iron ions. The difference is related to the disparate fields within the same region.

**Keywords:** *tektites, scattered fields, natural aluminosilicate glasses, infrared spectroscopy, electron paramagnetic resonance, <sup>57</sup>Fe Mossbauer spectroscopy*

### Введение

Под термином «тектиты» понимаются природные стекла от бледно-зеленого до черного цвета, встречающиеся в областях поверхности Земли, называемых тектитовыми полями разброса. Сейчас известно четыре таких поля, перечислим их в порядке уменьшения возраста: североамериканское (*бедиациты* и *джорджициты*) — 34.9 млн лет; центральноевропейское (*молдавциты*) — 14.5 млн лет; Кот-д'Ивуар (*иварциты*) — 1.07 млн лет; австралоазиатское (*австралиты*, *яваниты*, *тасманиты*, *индошиниты*) — 0.8 млн лет. Предполагается, что каждое поле соответствует определенному импактному событию (McCall, 2006).

В научной литературе вопросы происхождения тектитов, их физико-химического строения и свойства обсуждаются уже почти 200 лет. Выдвигались гипотезы техногенного, вулканогенного происхождения вещества тектитов, космогенного в виде осколков комет и метеоритов, выбросов с лунной поверхности (Воробьев, 1966). Во многом благодаря анализам результатов программы «Апполон» (Taylor, 1982) утвердилась теория происхождения тектитов из брызг импактного расплава хорошо отсортированных осадочных по-

род илистого размера, выброшенных в атмосферу или за ее пределы на начальной стадии формирования ударного кратера. При этом тектиты из различных полей разброса устойчиво различаются химическим составом (табл. 1).

При изучении структуры вещества тектитов и их диагностики применяются специальные спектроскопические методы изучения высококремнистых стекол, такие как инфракрасная и рамановская спектроскопия (White, Minser, 1984; Faulques et al., 2001; Gucsik et al., 2004; и мн. др.), мёссбауэровская спектроскопия (Dunlap, Sibley, 2004; Dunlap, McGraw, 2007; Русаков и др., 2007; Volovetsky et al., 2008 и мн. др.). Численные результаты этих методов, как признают упомянутые работы, сильно зависят от выбранной модели деконволюции спектров, однако обнадеживающим фактором является получение однозначной дифференциации тектитов различных полей и их областей (Dunlap & Sibley, 2004; Русаков и др., 2007).

Всплеск интереса к изучению тектитов спровоцировали сначала прецизионная датировка в  $788.1 \pm 2.8$  тыс. лет <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-методом самого обширного и богатого австралоазиатского поля, простирающегося от



Таблица 1. Основные химические элементы тектитов (мас. %)

Table 1. Tektite major element compositions (wt. %)

Оксид Oxide	Беdiasиты Bediasites	Молдавиты Moldavites	Индошиниты Indochinites	Яваниты Javanites	Австралиты Australites
SiO <sub>2</sub>	73.5	80.7	72.7	73.2	73.8
TiO <sub>2</sub>	0.87	0.32	0.78	0.64	0.67
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.9	9.6	13.6	11.2	11.4
FeO	5.0	1.93	4.6	5.7	4.31
MgO	1.38	1.59	2.14	3.75	1.92
CaO	0.06	2.13	1.98	2.1	3.99
Na <sub>2</sub> O	1.30	0.37	1.05	0.98	1.23
K <sub>2</sub> O	1.73	3.6	2.62	2.09	2.28
Σ	99.6	100.2	99.5	99.7	99.6
K <sub>2</sub> O/MgO	1.25	2.3	1.22	0.56	1.19
CaO/MgO	0.04	1.34	0.93	0.56	2.08

Примечание: Данные химического состава взяты из книги (Taylor, 1982, стр. 135) и дополнены строкой CaO/MgO. Приведен состав отдельных тектитов, характерный для данных подгрупп.

Note: Chemical composition data are taken from (Taylor, 1982, p. 135) and supplemented with the line CaO/MgO. The compositions of single tektites that are typical for these subgroups are given.

Индокитая до о. Тасмания, а также определение минимальной температуры нагрева капель выбросов в 2350–3950 °C (Jourdan et al., 2019). Затем последовало открытие на плато Боловен новой астроблемы и ее обоснование в качестве источника тектитов всего австралоазиатского поля (Sieh et al., 2020, 2023). Возраст кратера близок к возрасту австралоазиатских тектитов, вариации их морфологии по областям поля хорошо согласуются с модельными параметрами импактного события и модельными экспериментами морфологии тектитов (Elkins-Tanton et al., 2003). Материнской породой тектитов, согласно (Sieh et al., 2020, 2023), являются смеси базальтов и песчаников плато Боловен, по поводу чего в статьях (Mizera, 2022; Mizera, Strunga, 2024) высказываются аргументированное несогласие и сомнение в роли данного кратера как источника австралоазиатских тектитов. В любом случае можно прогнозировать дополнительные исследования строения и химических особенностей тектитов данного поля рассеяния.

В нашем распоряжении оказались два достаточно крупных тектита из коллекции академика Н. П. Юшкина, предположительно отнесенные к австралоазиатскому полю. Целью работы являлось изучение их химического состава и структуры и определение возможной принадлежности образцов к разновидностям тектитов данного поля рассеяния.

### Объекты и методы исследований

Фото исследованных образцов тектита показано на рис. 1. Образец ТК1 имел гантелевидную форму, а образец ТК2 — каплевидную. Их цвет был от темно-коричневого до черного, размеры по длине 4–5 см, наибольший диаметр 1.5–2 см. Из образцов были изготовлены поперечные тонкие шлифы для электронно-микроскопических исследований и порошковые навески для химического анализа и других методов изучения вещества.

Основная часть аналитических работ выполнена на оборудовании ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Химический состав определен в силикатном

анализе. Однородность распределения химических элементов в тектитах исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN с EDS-детектором Oxford.

Фазовый состав тектитов был изучен методами рентгеновской дифракции на порошковом дифрактометре XRD-6000, Shimadzu и инфракрасной (ИК) спектроскопии на Фурье-спектрометре ИК-диапазона «Люмекс ИнфраЛюм ФТ-02». Для получения спектров ИК-поглощения применялись прессованные таблетки 1 г KBr и 1.5 мг образца.

Структурное состояние ионов железа в образцах определено методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и мёссбауэровской спектроскопии <sup>57</sup>Fe. Спектры ЭПР регистрировались на радиоспектрометре X-диапазона RadioPAN SE/X-2547 при комнатной температуре в порошковых препаратах навеской

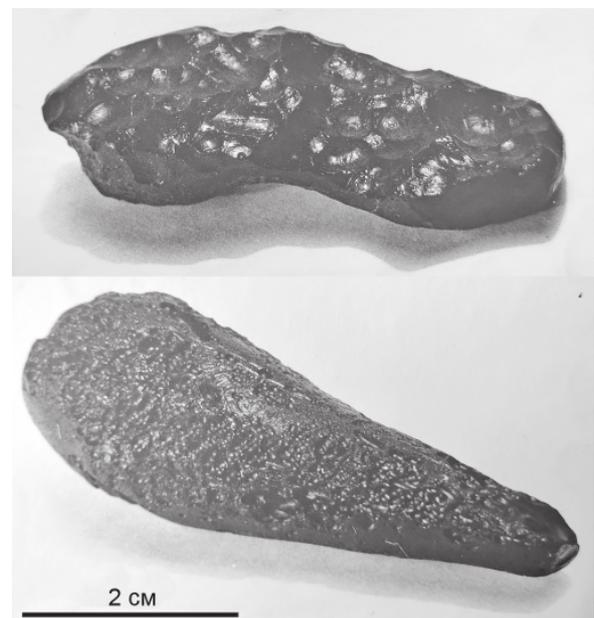


Рис. 1. Образцы тектитов: ТК1 (верхний) и ТК2 (нижний)

Fig. 1. Tektite samples. TK1 (top) and TK2 (bottom)

около 100 мВ. Микроволновая мощность на образцах составляла около 7 мВт, амплитуда высокочастотной модуляции 0.1 мТ. Мёссбаэуровские спектры  $^{57}\text{Fe}$  образцов тектита были получены на оборудовании Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (г. Миасс) при комнатной температуре. Изомерный сдвиг определялся относительно  $\alpha\text{-Fe}$ .

## Результаты и обсуждение

**Химический состав.** Электронно-микроскопические снимки шлифов тектитов в режиме обратнорассеянных электронов (BSE), чувствительном к вариациям состава, демонстрируют высокую степень однородности вещества (рис. 2). На снимках выделяются только темные мелкие пятна пустот — вскрытых газовых пузырьков. Составы определены в участках, свободных от них, и представлены в табл. 2. Полученный состав в разных точках одной пробы варьирует в пределах погрешности определений, то есть стекло проб однородно, зональность в распределении элементов не обнаружена. Основными компонентами стекла являются:  $\text{SiO}_2$  (72–73 вес. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12–14 вес. %) и  $\text{FeO}$  (около 5 вес. %). На остальные оксиды (в порядке уменьшения  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{TiO}_2$ ) приходится не более 10 вес. %. Образец ТК1 отличается повышенным содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , скомпенсированным в образце ТК2 немного большими содержаниями  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ . Хорошо заметно различие образцов по соотношениям  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$  и  $\text{CaO}/\text{MgO}$ .

Состав образцов, по данным микрозондовых определений, очень хорошо согласуется с данными силикатного валового анализа (табл. 2). Средний микрозондовый состав в пределах погрешности определенный совпадает с силикатным анализом. Дополнительно валовым анализом определены малые количества  $\text{MnO}$ ,  $\text{BaO}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Потери веса при прокаливании образцов не обнаружено. В тектитах характерные содержания воды составляют порядка 0.01 вес. % (Taylor, 1982), что находится за пределами обнаружения в силикатном анализе. Крайне низкое содержание воды в природном стекле является отличительной особенностью тек-

титов, в вулканических стеклах количество воды на два порядка выше (O'Keefe, 1976).

Сравнивая литературные данные по составу тектитов (табл. 1) с составом образца ТК1 (табл. 2), можно заключить, что образец ТК1 идентичен по всем параметрам индошинитам. Образец ТК2 также близок к индошинитам, но в нем понижено содержание  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , а также величины  $\text{K}_2\text{O}/\text{MgO}$  и  $\text{CaO}/\text{MgO}$ . В другой близкой разновидности тектитов — яваитах — данные величины существенно ниже, чем в образце ТК2. Оба образца наверняка не относятся к дистальным типам тектитов — австралитам — из-за вдвое меньшего  $\text{CaO}/\text{MgO}$  и характерной каплевидной формы, свойственной проксимальным и медиальным тектитам. Вероятно, образцы ТК1 и ТК2 относятся к тектитам разных районов индокитайского фланга разброса (Вьетнам, Камбоджа, Лаос и Таиланд) австралоазиатского поля.

**Рентгеновская дифракция.** Согласно полученным рентгеновским данным, вещество тектитов составляет рентгеноаморфная фаза. На дифрактометрических картинах хорошо выражен довольно интенсивный широкий галообразный рефлекс с максимумом в области 3.3–3.5 Å. Наличие такого галообразного рефлекса характерно для аморфной стеклообразной фазы, а приуроченность этого гало к вышеуказанной области свидетельствует о том, что структура стекла представляет собой неупорядоченную сетку кремнекислородных тетраэдров. Второй очень слабый галообразный рефлекс наблюдается в области 8 Å. Его наличие, возможно, связано с тем, что кремнекислородные тетраэдры, расположенные в целом неупорядоченно, создают отдельные области однородности данного размера.

**ИК-спектроскопия,** в отличие от рентгеновской дифракции, позволяет оценить ближний порядок в решетке стекла. В ИК-спектрах образцов тектитов зарегистрированы интенсивные полосы поглощения с максимумами в области 1070 и плечом 1200  $\text{cm}^{-1}$ , 470  $\text{cm}^{-1}$ , а также слабое поглощение или его следы в области 800  $\text{cm}^{-1}$  (рис. 3). Все полосы относятся к колебаниям тетраэдрических единиц полимеризованной алюмо-

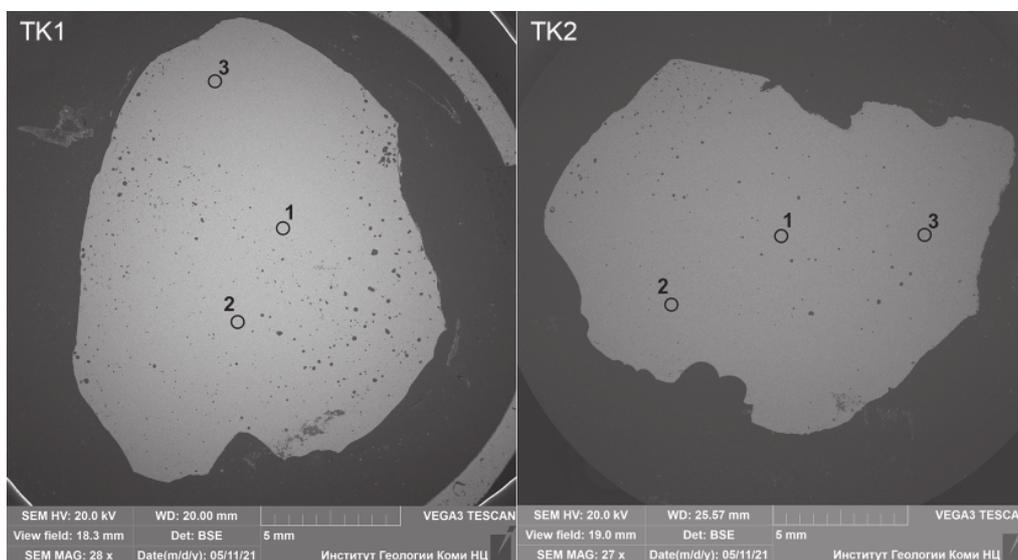


Рис. 2. BSE-изображения шлифов тектитов. Отмечены точки микрозондовых анализов

Fig. 2. BSE images of tektite thin sections. Microprobe analysis points are marked



Таблица 2. Основные химические элементы изученных тектитов (вес. %)

Table 2. Major element compositions of the studied tektites (wt. %)

Оксид Oxide	Силикатный анализ Silicate analysis		Микрозондовый состав / Microprobe composition						±Δ
			TK1			TK2			
	TK1	TK2	1	2	3	1	2	3	
SiO <sub>2</sub>	71.28	71.80	72.04	72.25	71.59	72.66	73.14	72.96	0.54
TiO <sub>2</sub>	0.84	0.76	0.77	0.90	0.95	0.85	0.71	0.84	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.19	12.66	14.21	14.17	14.12	12.55	12.57	12.57	0.24
FeO	4.94	5.14	4.87	4.91	4.79	5.03	4.82	4.76	0.22
MnO	0.10	0.11	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не опр.
MgO	1.99	2.69	2.03	1.95	1.89	2.53	2.52	2.51	0.12
CaO	1.89	2.05	1.71	1.66	1.78	1.87	1.87	1.96	0.12
Na <sub>2</sub> O	1.23	1.32	1.14	1.16	1.14	1.08	1.19	1.30	0.12
K <sub>2</sub> O	2.44	2.36	2.54	2.45	2.47	2.46	2.39	2.50	0.10
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.08	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не обн.	не опр.
BaO	0.22	0.09	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-
ППП	не обн.	не обн.	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.	не опр.	-/-
Σ	99.16	99.06	99.31	99.45	98.73	99.03	99.21	99.40	-/-
K <sub>2</sub> O/MgO	1.23	0.88	1.25	1.26	1.31	0.97	0.95	1.00	0.05
CaO/MgO	0.95	0.76	0.84	0.85	0.94	0.74	0.74	0.78	0.05

Примечание: Точки микрозондовых анализов 1, 2, 3 показаны на рис. 2. Доверительный интервал ±Δ — 95 %. Не опр. — не определялось, не обн. — не обнаружено.

Note: Microprobe analyses points 1, 2, 3 are shown in Fig. 2. Confidence interval. ±Δ — 95 %. не опр. — not determined, не обн. — not detected.

силикатной сетки стекла, они регистрируются в ИК-спектрах стекла различного происхождения, в том числе тектитов (White, Minser, 1984; Faulques et al., 2001; Gucsik et al., 2004).

Аналогичные, но более узкие полосы регистрируются в спектре чистого кварцевого стекла. Низкочастотная полоса 470 см<sup>-1</sup> относится к деформационным колебаниям с изгибом связей —Si—O—Si— при движении атомов кислорода нормально связи Si—Si. Ее смещение в сторону низких частот и уширение при уменьшении содержания Si в стекле связано с вкладом связей —Al—O—Si—. Малоинтенсивная полоса в области

800 см<sup>-1</sup> принадлежит деформациям угла связей —Si—O—Si— с движением атомов кремния. С понижением содержания Si в стекле она уширяется и смещается в сторону низких частот. Для сравнения на рис. 3 приведен ИК-спектр техногенного стекла ТНГ-3, образованного при нефтяном пожаре на месторождении тенгиз в Казахстане, с составом (вес. %): SiO<sub>2</sub> — 61.7, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 9.7, FeO — 1.4, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 2.7, CaO — 16.4, MgO — 2.9, Na<sub>2</sub>O — 2.7, K<sub>2</sub>O — 1.6 (Потапов и др., 2011). В отличие от хорошо выраженных полос 796 см<sup>-1</sup> у образцов тектита, низкокремнеземистое и высококальциевое стекло ТНГ-3 имеет плохо выраженный максимум 780 см<sup>-1</sup>.

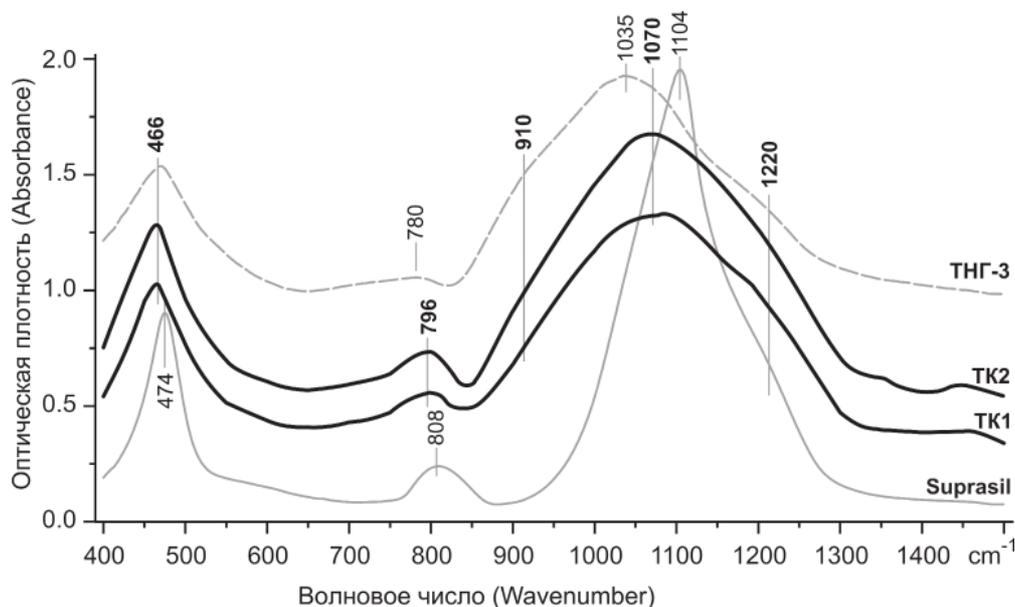


Рис. 3. ИК-спектры поглощения тектитов. Для сравнения приведены спектры кварцевого стекла Suprasil и стекла техногенной плавки ТНГ-3. Контуры разнесены вдоль оси оптической плотности

Fig. 3. IR absorption spectra of tektites. Spectra of Suprasil quartz glass and ТНГ-3 technogenic melting glass are shown for comparison. The contours are spaced apart along the absorbance axis

Основная полоса ИК-спектра кварцевого стекла состоит из компонента с максимумом около 1220 и пика 1104  $\text{см}^{-1}$ , которые относятся к продольным (LO) и поперечным (TO) оптическим фононам (LO-TO-расщепление) асимметричных валентных колебаний кислородных мостиковых связей  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ . В спектрах тектитов главный максимум этой полосы смещен к 1070  $\text{см}^{-1}$ , в стекле ТНГ-3 — до 1035  $\text{см}^{-1}$ , сдвиг полосы 1220  $\text{см}^{-1}$  не заметен. В статье Faulques et al. (2001) появление в ИК-спектрах стекла LO-компонента связывается с разупорядочением сетки. Главное нарушение сплошности сетки  $(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4$  — её деполимеризация — связано с появлением немостиковых атомов кислорода (White, Minser, 1984; Mysen, Richet, 2019). При этом положение максимума рассматриваемой ИК-полосы с увеличением числа немостиковых атомов кислорода в позиции тетраэдрического катиона (NBO/T) смещается к низким частотам: NBO/T = 0 (все атомы кислорода мостиковые) — 1110  $\text{см}^{-1}$ ; NBO/T = 1 — 1070–1110  $\text{см}^{-1}$ ; NBO/T = 2 — 940–970  $\text{см}^{-1}$ ; NBO/T = 3 — 880–910  $\text{см}^{-1}$ ; NBO/T = 4 — 840–860  $\text{см}^{-1}$  (White, Minser, 1984; Mysen, Richet, 2019). Величину NBO/T можно оценить по данным состава стекла, приняв, что все ионы щелочного, щелочно-земельного и двухвалентного железа и марганца действуют как модификаторы структуры, а весь алюминий и трехвалентное железо входят в стеклообразующий каркас (White, Minser, 1984):

$$\frac{NBO}{T} = \frac{2\{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{FeO}\}}{\text{SiO}_2 + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3} - \frac{2\{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3\}}{\text{SiO}_2 + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

Оксиды представлены молярными долями состава стекла. Знак «-» в числителе перед стеклообразующими компонентами выводит соответствующую часть щелочных ионов в роль компенсаторов заряда тетраэдрических трехвалентных катионов. Малое содержание оксида марганца в составе тектитов (табл. 2) не сказывается на результате. Оксиды титана и фосфора не включены в расчет, так как они могут менять свою роль в сетке стекла и склонны к кластеризации (Mysen, Richet, 2019). Согласно уравнению (1), NBO/T чистого кварцевого стекла Suprasil равно 0, сетка стекла полностью полимеризована. Соответственно, на ИК-спектре (рис. 3) низкочастотное крыло полосы 1104  $\text{см}^{-1}$  не имеет уширения или дополнительных полос. У образца тенгизита ТНГ-3 с названным выше составом NBO/T = 0.54 структура частично деполимеризована. Максимум ИК-полосы сдвинут к 1035  $\text{см}^{-1}$ , заметно плечо 910  $\text{см}^{-1}$ , что можно трактовать как проявление колебаний немостиковых связей кислорода тетраэдрических катионов. У тектита ТК1 и ТК2 значения NBO/T составляют 0.08 и 0.14 соответственно по данным валового химического анализа, 0.07 и 0.14 — по данным микронзондовых определений.

Таким образом, стекло тектитов, особенно у образца ТК1, представляет собой высокополимеризованный алюмокремнекислородный каркас с соответствующими модами колебаний в основном мостиковых связей  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$  и  $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-$ . В ИК-спектре образца ТК2 заметно смазанное плечо в области 910  $\text{см}^{-1}$ , что говорит о небольшой доле колебаний немостиковых связей. Для верификации мод колебаний тетраэдри-

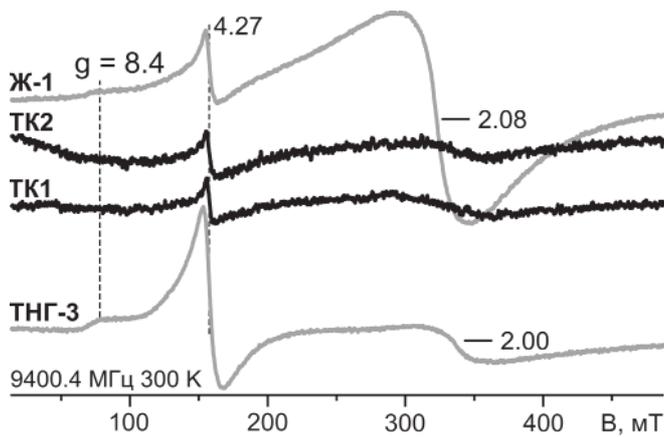
ческого каркаса стекла тектитов планируется исследование методом рамановской спектроскопии с лазерным возбуждением в ультрафиолетовом и видимом диапазонах.

**Спектры ЭПР.** Спектр ЭПР алюмосиликатного стекла с растворенными ионами трехвалентного железа представлен на рис. 4 образцом тенгизита ТНГ-3, а спектр стекла с наличием кластеров железа — образцом иргизита Ж-1. Образцы тектитов ТК1 и ТК2 (табл. 2) содержат около 5 % оксидов двух- и трехвалентного железа в сумме (Лютюев и др., 2018). Главной особенностью спектра ТНГ-3 является асимметричная интенсивная линия с g-фактором 4.27 шириной по точкам экстремумов  $\Delta B_{pp} = 14$  мТ, сопровождающаяся слабыми особенностями, с  $g \sim 8.4$  и 2.0. Это типичный спектр ЭПР X-диапазона силикатного стекла с небольшой примесью ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Спектр ЭПР иргизита Ж-1 дополнен широкой ( $\Delta B_{pp} = 50$  мТ) интенсивной полосой с  $g = 2.08$ .

Резонансы при  $g = 4.27$  и  $g = 8.4$  обусловлены парамагнитными переходами изолированных ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позициях с сильным ромбическим искажением ( $E/D \sim 1/3$ ) и аксиальным искажением ( $E/D \sim 0$ ) кислородного окружения. Интерпретация полосы при  $g \sim 2.0$  не столь однозначна (Vercaemer et al., 2015). Полоса, как и особенность  $g = 8.4$ , может быть отнесена к парамагнитному сигналу  $\text{Fe}^{3+}$  в аксиально искаженных позициях или к сигналу обменно-связанных пар или малых кластеров  $\text{Fe}^{3+}$ , а также к примесям железооксидных фаз. При резко отличной форме полосы  $g \sim 2.0$  образцов ТНГ-3 и Ж-1 мёсбауэровские исследования не выявили в них каких-либо примесей железооксидов (Лютюев и др., 2018). Соответственно, полоса в спектре ЭПР ТНГ-3 в основном относится к изолированным ионам  $\text{Fe}^{3+}$  ( $E/D \sim 0$ ), а в спектре Ж-1 — к их кластерным формам.

Спектры ЭПР двух образцов тектита почти идентичны и содержат асимметричную узкую линию с g-фактором 4.27 шириной  $\Delta B_{pp}$  6 мТ (ТК1) или 8 мТ (ТК2) и очень слабые следы широкой полосы ( $\Delta B_{pp} = 60-70$  мТ) с g-фактором 2.06 (ТК1) или 2.01 (ТК2). Если в качестве меры концентрации изолированных ионов  $\text{Fe}^{3+}$  принять интегральную интенсивность сигнала 4.27 (произведение квадрата ширины на интенсивность), то в тектитах содержание таких ионов составляет 4–7 % от их содержания в ТНГ-3 и 15 % в иргизите. Интегральный сигнал кластерных форм железа в тектитах на порядок ниже, чем в иргизите. То есть при примерно равных суммарных содержаниях железа во всех образцах в спектрах ЭПР тектитов проявляется их очень малая часть. Следует заключить, что в тектитах железо в основном содержится в двухвалентном состоянии, как это и отмечено в табл. 2. Линии двухвалентного железа при комнатной температуре вследствие очень короткого времени спин-релаксации в спектрах ЭПР не проявляются.

**Мёсбауэровская спектроскопия  $^{57}\text{Fe}$**  позволяет определить валентное состояние железа и оценить распределение ионов железа в структурных позициях минерального вещества. Полученные спектры изучаемых тектитов показаны на рис. 5. К сожалению, вследствие низкой активности источника гамма-квантов отношение «сигнал/шум» слишком низкое для получения хорошей статистики расчетной модели декомпозиции спектров. По форме спектры не отличаются от приводимых в литературе по тектитам. Это асим-



**Рис. 4.** Спектры ЭПР тектитов. Для сравнения показаны спектры техногенного стекла плавления ТНГ-3 и образца иргизита Ж-1. Спектры записаны при идентичных усилениях и нормированы на равные навески проб

**Fig. 4.** EPR spectra of tektites. The spectra of the technogenic melting glass ТНГ-3 and the irghizite sample Ж-1 are shown for comparison. The spectra were recorded at identical amplifications and normalized to equal sample weights

метричный, неоднородно уширенный дублет с расщеплением около 2 мм/с с центром около 1 мм/с, характерным для ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в октаэдрическом кислородном окружении. Повышенная интенсивность низкоскоростного компонента говорит о вкладе в спектральный контур дублета с малым расщеплением от ионов  $\text{Fe}^{3+}$ .

В отличие от кристаллических веществ с дискретными структурными позициями с различными параметрами окружения ионов железа, в стеклообразном веществе ожидается их широкое перекрывающееся распределение. В спектрах ЭПР стекла это проявляется в доминировании сигнала  $g = 4.3$  ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в позициях с  $E/D \sim 1/3$ , даже при их низкой плотности вероятности, поскольку при  $E/D = 1/3$  линия становится изотропной. В мёссбауэровских спектрах подобной селекции сигналов не происходит; спектральные контуры сглажены и уширены, выделение отдельных компонент с дискретными сверхтонкими мёссбауэровскими параметрами становится условным. Предложены различные методы восстановления распределенных сверхтонких параметров при анализе мёссбауэровских спектров стекла, в частности тектитов.

Согласно методу восстановления распределенных квадрупольных расщеплений мёссбауэровских  $^{57}\text{Fe}$ -спектров стекол, в тектитах выделяются три моды:  $\text{Fe}^{2+}$  в пентаоктаэдрических позициях со средними значениями изомерного сдвига  $\langle IS \rangle \sim 1$  мм/с и квадрупольного расщепления  $\langle QS \rangle \sim 1.8\text{--}2.1$  мм/с;  $\text{Fe}^{2+}$  в тетраэдрических позициях с  $\langle IS \rangle \sim 0.5\text{--}0.7$  мм/с,  $\langle QS \rangle \sim 0.8\text{--}1.5$  мм/с;  $\text{Fe}^{3+}$  в тетраэдрических позициях с  $\langle IS \rangle \sim 0.2\text{--}0.3$  мм/с,  $\langle QS \rangle \sim 0$  мм/с (Dunlap et al., 1998; Dunlap, Sibley, 2004). Метод выдает сильно заниженное значение доли  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  в предположении равенства вероятностей мёссбауэровских переходов различных неэквивалентных позиций ионов. В стеклах оценка данной вероятности затруднена, но из данных по силикатам известно, что она в среднем на 15 % выше у ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . При малых величинах  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  корректировка будет несущественной. Так, в целом у австралоазиатских тек-

титов  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  не превышает 2 %, в частности у индошинитов составляет около 1 % (Dunlap, Sibley, 2004). В отличие от тектитов, в спектрах проксимального импактного стекла (например, иргизитах) моды тетраэдрических  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  не разделяются (Dunlap, McGraw, 2007). Близкие к нулевым значения  $QS$  у тетраэдрических позиций  $\text{Fe}^{3+}$  предполагают высокую степень симметрии тетраэдров  $[\text{FeO}_4]$ , что маловероятно для структур силикатного стекла (Mysen, Richet, 2019).

Альтернативный вариант интерпретации мёссбауэровских спектров тектитов и импактных стекол выполнен в рамках восстановления двух независимых функций распределения  $QS$ -ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  (Русаков и др., 2007; Volovetsky et al., 2008). В этом варианте не появляется компонент  $\text{Fe}^{2+}$  с  $\langle IS \rangle \sim 0.5\text{--}0.7$  мм/с, промежуточным между характерными значениями для ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в кислородном окружении, а дублеты  $\text{Fe}^{3+}$  имеют очень высокие значения  $\langle QS \rangle$ . По сути, моды распределенных параметров  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  тетраэдрических позиций (по Dunlap, Sibley, 2004) заменены одним компонентом  $\text{Fe}^{3+}$ . В индошинитах параметры  $\text{Fe}^{3+}$  соответствуют октаэдрическому окружению. Величина  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  в тектитах, в том числе индошинитах, находится в диапазоне 5–10 %, а их максимальные значения получены для иргизитов — 30–50 %. Видимо, это несколько завышенные значения.

Данные по изучению тектитов методом мёссбауэровской  $^{57}\text{Fe}$ -спектроскопии значительно варьируют, содержат очевидные несоответствия. Но также установлено, что применение единого подхода приводит к статистически одинаковым результатам для тектитов одного региона и их значимым различиям для тектитов из различных регионов (Dunlap et al., 1998; Dunlap, Sibley, 2004; Русаков и др., 2007).

Приведенные на рис. 5 мёссбауэровские спектры тектитов ТК1 и ТК2 вследствие высокого уровня шума проанализированы в модели дискретных дублетов: трех для  $\text{Fe}^{2+}$  и одного для  $\text{Fe}^{3+}$ . Результаты даны в табл. 3, для сравнения приведены ранее изученные нами спектры иргизита Ж-1 и тенгизита ТНГ-3 из статьи (Лютюев и др., 2018). Судя по величинам  $IS$  и  $QS$ , дублет  $\text{Fe}^{3+}$  соответствует искаженным тетраэдрическим позициям. Величина  $\text{Fe}^{3+}/\Sigma\text{Fe}$  существенно выше результатов (Dunlap, Sibley, 2004) и попадает на нижнюю границу величины для индошинитов, приведенную в статьях (Русаков и др., 2007; Volovetsky et al., 2008). С учетом присутствия в образцах примерно 5 %  $\text{Fe}^{3+}$  значения  $NBO/T$  понижаются до 0.07 у ТК1 и до 0.13 у ТК2.

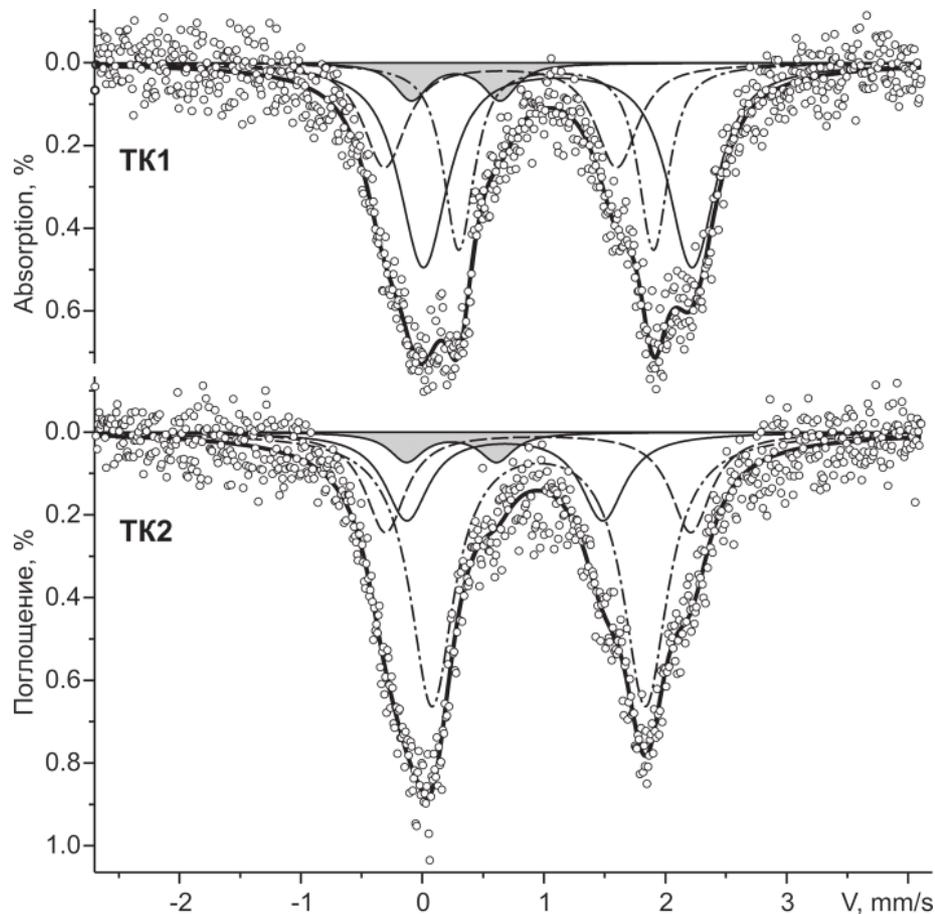
Два дублета,  $\text{Fe}^{2+}(1)$  и  $\text{Fe}^{2+}(2)$ , образца ТК1 по величине  $IS$  относятся к октаэдрическим позициям сетки стекла, у образца ТК2 величина изомерного сдвига понижена, что указывает на вклад позиций пятивершинных кислородных полиэдров. На две эти позиции железа в тектитах приходится по 70–80 %. Около 20 % общей площади спектрального контура принадлежит дублету с промежуточным значением изомерного сдвига 0.6–0.7 мм/с, аналогичному тетраэдрическим позициям (Dunlap, Sibley, 2004). Следует заметить, что такие величины  $IS$ , промежуточные между характерными для ионов  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ , в минералах часто трактуются как делокализация электрона между  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$  в соседних позициях, а результирующая величина  $IS$  отражает условное эффективное валентное состояние  $\text{Fe}^{2.5+}$  (Dyar et al., 2006). На возможное присутствие та-

**Таблица 3.** Параметры мёссбауэровских спектров стекол  
**Table 3.** Mossbauer parameters of glasses

Образец / Sample	Параметр / Parameter	Компоненты спектра / Spectrum components			
		Fe <sup>2+</sup> (1)	Fe <sup>2+</sup> (2)	Fe <sup>2+</sup> (3)	Fe <sup>3+</sup>
TK1	IS, мм/с	1.12	1.10	0.64	0.27
	QS, мм/с	2.21	1.60	1.91	0.73
	Г, мм/с	0.47	0.30	0.42	0.33
	A, %	46	27	21	<b>6</b>
TK2	IS, мм/с	0.95	0.96	0.68	0.24
	QS, мм/с	2.51	1.76	1.61	0.74
	Г, мм/с	0.40	0.44	0.43	0.34
	A, %	20	57	18	<b>5</b>
Образец* / Sample*	Параметр / Parameter	Fe <sup>2+</sup> (1)	Fe <sup>2+</sup> (2)	Fe <sup>3+</sup> (1)	Fe <sup>3+</sup> (2)
ТНГ-3	IS, мм/с	1.07	1.00	0.31	0.21
	QS, мм/с	2.08	1.66	1.10	0.30
	Г, мм/с	0.64	0.59	0.85	0.23
	A, %	25	18	<b>54</b>	<b>3</b>
Ж-1	IS, мм/с	1.12	1.04	0.40	не обн.
	QS, мм/с	2.22	1.63	1.30	-//-
	Г, мм/с	0.64	0.62	0.94	-//-
	A, %	1.12	1.04	<b>34</b>	-//-

*Примечание.* \* — данные из статьи (Лютюев и др., 2018); IS — изомерный сдвиг, QS — квадрупольное расщепление, Г — ширина линий, A — относительная площадь спектрального компонента.

*Note.* \* — data from the article (Lyutoev et al., 2018); IS — isomer shift, QS — quadrupole splitting, Г — line width, A — relative area of the spectral component, не обн. — not detected.



**Рис. 5.** Мёссбауэровские спектры <sup>57</sup>Fe тектитов. Маркеры — экспериментальные значения; жирная сплошная линия — суммарный расчетный спектр; затененный контур — дублет Fe<sup>3+</sup>; тонкие сплошная и пунктирные линии — дублеты Fe<sup>2+</sup>  
**Fig.5.** <sup>57</sup>Fe Mossbauer spectra of tektites. Markers are experimental values; bold solid line is the calculated spectrum; shaded contour is the Fe<sup>3+</sup> doublet; thin solid and dotted are Fe<sup>2+</sup> doublets



ких пар ионов в изучаемых тектитах указывает наличие малоинтенсивной широкой полосы с g-фактором около 2.0 в спектрах ЭПР, отнесенной к кластерным формам ионов железа (рис. 4). Для прояснения этих вопросов необходимо получение качественных мёссбауровских и ЭПР-спектров не только при комнатной температуре, но и при низких, хотя бы азотных температурах.

### Заключение

По результатам проведенных исследований оба образца продемонстрировали типичные характеристики австралоазиатских тектитов индокитайского фланга разброса, то есть индошинитов. Образцы хорошо различаются по химическому составу и спектроскопическим характеристикам. Каплеобразный образец ТК2 отличается пониженным содержанием оксидов алюминия, повышенной долей оксида магния, меньшей степенью полимеризации алюмосиликатного каркаса, в котором, как следует из данных мёссбауровской спектроскопии, повышена доля 5-вершинных позиций катионов. Возможно, образец ТК2 относится к более близким к источнику полям разброса, нежели гантелеподобный образец ТК1.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600009-2).

### Литература / References

- Воробьев Г. Г. Что вы знаете о тектитах? М.: Наука, 1966. 109 с.
- Vorob'yev G. G. What do you know about tektites? Moscow: Nauka; 1966. 109 p. Russian.
- Лютюев В. П., Потапов С. С., Лысюк А. Ю., Головатая О. С. Особенности природных и техногенных силикатных стёкол по данным ИКС-, ЭПР- и мёссбауровской спектроскопии // Минералогия техногенеза — 2018. Миасс: ИМин УрО РАН, 2018. С. 26–51.
- Lyutoev V. P., Potapov S. S., Lysiuk A. Yu., Golovataya O. S. Comparative research of natural and technogenetic silicate glasses by FTIR, ESR and Mössbauer spectroscopy. The Mineralogy of technogenesis — 2018. Miass: Institute of Mineralogy. UB RAS; 2018. p. 26–51. Russian.
- Русаков В. С., Воловецкий М. В., Луканин О. А. М. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2007. № 3. С. 57–62. DOI: 10.3103/S0027134907030149
- Rusakov V. S., Volovetskii M. V., Lukanin O. A. Mössbauer Studies of Natural Glasses of Impact and Volcanic Origin. Moscow University Physics Bulletin. 2007;62(3):187–192. Russian.
- Dunlap R. A., Eelman D. A., MacKay G. R. A. Mössbauer effect investigation of correlated hyperfine parameters in natural glasses (tektites). Journal of Non-Crystalline Solids. 1998; 223:141–146. DOI: 10.1016/S0022-3093(97)00364-5
- Dunlap R. A., McGraw J. D. A. Mössbauer effect study of Fe environments in impact glasses. Journal of Non-Crystalline Solids. 2007;353:2201–2205. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2007.03.006
- Dunlap R. A., Sibley A. D. E. A Mössbauer effect study of Fe-site occupancy in Australasian tektites. Journal of Non-Crystalline Solids. 2004;337:36–41. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.03.113
- Dyar M. D., Agresti D. G., Schaefer M. W., Grant C. A., Sklute E. C. Mössbauer Spectroscopy of Earth and Planetary Materials. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2006;34:83–125. DOI: 10.1146/annurev.earth.34.031405.125049
- Elkins-Tanton L. T., Aussillous P., Bico J., Quéré D., Bush J. W. M. A laboratory model of splash-form tektites. Meteoritics & Planetary Science. 2003;38(9):1331–1340. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2003.tb00317.x
- Faulques E., Fritsch E., Ostroumov M. Spectroscopy of natural silica rich glasses. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2001;96:120–128. DOI: 10.2465/jmps.96.120
- Gucsik A., Koeberl C., Brandstätter F., Libowitzky E., Zhang M. Infrared, Raman, and cathodoluminescence studies of impact glasses. Meteoritics & Planetary Science. 2004;39(8):1273–1285. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2004.tb00946.x
- Jourdan F., Nomade S., Wingate M. T. D., Alan D. E. E. Ultraprecise age and formation temperature of the Australasian tektites constrained by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analyses // Meteoritics and Planetary Science. 2019;54(10):2573–2591. DOI: 10.1111/maps.13305
- McCall G. J. H. The history of tektites. The History of Meteoritics and Key Meteorite Collections. Geological Society London, Special Publication. 2006;256:471–493.
- Mizera J. Quest for the Australasian impact crater: Failings of the candidate location at the Bolaven Plateau, Southern Laos. Meteoritics & Planetary Science. 2022;57(11):1973–1986. DOI: 10.1111/maps.13912
- Mizera J., Strunga V. Proximal ejecta of the putative parent impact crater for Australasian tektites at the Bolaven Plateau. PNAS. 2024;121(21):2400122121. DOI: 10.1073/pnas.2400122121
- Mysen B., Richet P. Silicate glasses and melts. Elsevier Science; 2019. 720 p. DOI: 10.1016/C2018-0-00864-6
- O'Keefe J. A. Tektites and their Origin. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company; 1976. 254 p.
- Sieh K., Herrin J., Jicha B., Schonwalder Angel D., Moore J. D. P., Banerjee P., Sihavong V., Wiwegwin W., Singer B., Chualaowanich T., Charusiri P. Australasian impact crater buried under the Bolaven volcanic field, Southern Laos. PNAS. 2020;117(3):1346–1353. DOI: 10.1073/pnas.1904368116
- Sieh K., Schonwalder Angel D., Herrin J., Jicha B., Singer B., Sihavong V., Wiwegwin W., Wong N., Quah J. Yo. Proximal ejecta of the Bolaven extraterrestrial impact, southern Laos. PNAS. 2023;120(50):e2310351120. DOI: 10.1073/pnas.2310351120
- Taylor S. R. Planetary Science: A Lunar Perspective. Houston: Lunar and Planetary Institute; 1982. 481 p. [https://www.lpi.usra.edu/publications/books/planetary\\_science/](https://www.lpi.usra.edu/publications/books/planetary_science/)
- Vercamer V., Lelong G., Hijiya H., Kondo Yu., Galois L., Calas G. Diluted  $\text{Fe}^{3+}$  in silicate glasses: Structural effects of Fe-redox state and matrix composition. An optical absorption and X-band/Q-band EPR study. Journal of Non-Crystalline Solids. 2015;428:138–145. DOI:10.1016/j.jnoncrysol.2015.08.010.
- Volovetsky M. V., Rusakov V. S., Chistyakova N. I., Lukanin O. A. Mössbauer study of tektites. Hyperfine Interaction. 2008;186:83–88. DOI 10.1007/s10751-008-9859-6
- White W. B., Minser D. G. Raman spectra and structure of natural glasses. Journal of Non-Crystalline Solids. 1984;67:45–59. DOI: 10.1016/0022-3093(84)90140-6

Поступила в редакцию / Received 4.12.2025



## Минералогия медных шлаков Кировградского завода (Свердловская область)

Ю. В. Ерохин, В. С. Пономарев, А. В. Захаров, Л. В. Леонова

Институт геологии и геохимии Уральского отделения РАН, Екатеринбург, Россия  
*erokhin-yu@yandex.ru*

Объектом настоящего изучения стали медные шлаки Кировградского (первоначально Калатинского) завода, действующего с 1914 г., вокруг которого постепенно вырос современный Кировград (Свердловская область, Средний Урал). Вещественный состав исследованных образцов получен методами сканирующей электронной микроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Установлено, что они представлены двумя типами, отличающимися друг от друга минералого-геохимическими характеристиками. Первый тип шлаков сложен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, хромита и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также меди и серебра. Халькогениды представлены троилитом, кубанитом, хейкокитом, рудашевскитом, галенитом, брейтгауптитом, вестервельдитом и сульфидами Cu-Fe. Второй тип представлен фаялит-геденбергитовым агрегатом со значительным присутствием магнетита, стекла и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также барковита, меди и серебра. Халькогениды представлены борнитом, халькозином, сфалеритом, галенитом, пентландитом, хизлевудитом, брейтгауптитом, никелином и шандитом. Минералогия шлаков хорошо согласуется с их микроэлементным составом. Возможно, что шлаки первого типа получились в результате переплавки медноколчеданных руд Левихинской группы месторождений, а второго типа – полиметаллических руд Сафьяновского месторождения. Шлаки Кировградского завода можно переработать с выделением сульфидного и магнетитового концентратов и попутного серебра.

**Ключевые слова:** *фаялит, пироксены, сульфиды, минералогия, геохимия, медные шлаки, Кировградский медеплавильный завод*

## The mineralogy of copper slags the Kirovgrad plant (Sverdlovsk region)

Yu. V. Erokhin, V. S. Ponomarev, A. V. Zakharov, L. V. Leonova

Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russia

The object of this study is the copper slag from the Kirovgrad (originally Kalatinsky) plant, operating since 1914, around which the modern city of Kirovgrad (Sverdlovsk region, Middle Urals) has gradually grown. The material composition of the studied samples is obtained by scanning electron microscopy and inductively coupled plasma mass spectrometry. It has been established that they are represented by two types with distinct mineralogical and geochemical characteristics. The first type is composed of a fayalite-augite aggregate containing magnetite, chromite, and arsenide-stibnide-sulfide mineralization, as well as copper and silver. Chalcogenides are represented by troilite, cubanite, haycockite, rudashevskite, galena, breithauptite, westerveldite, and Cu-Fe sulfides. The second type is a fayalite-hedenbergite aggregate with significant amounts of magnetite, glass, and arsenide-stibnide-sulfide mineralization, as well as barkovite, copper, and silver. Chalcogenides are represented by bornite, chalcocite, sphalerite, galena, pentlandite, heazlewoodite, breithauptite, nickeline, and shandite. The slag mineralogy is consistent with their trace element composition. It is concluded that the first type of slag resulted from the smelting of copper pyrite ores from the Levikhinsky group of deposits, while the second type resulted from the smelting of poly-metallic ores from the Safyanovsky deposit. Slags from the Kirovgrad plant can be processed to extract sulphide and magnetite concentrates, and associated silver.

**Keywords:** *fayalite, pyroxenes, sulphides, mineralogy, geochemistry, cooper slags, Kirovgrad copper plant*

### Введение

Изучение медных шлаков представляет собой актуальную научно-практическую задачу, обладающую значимостью в двух ключевых аспектах: экологическом и ресурсно-промышленном. Это обусловлено тем, что значительная часть шлаков характеризуется повышенным содержанием ценных компонентов и мо-

жет рассматриваться в качестве техногенного минерального сырья. В процессе пирометаллургической переплавки медно-сульфидных руд с получением черновой меди неизбежно образуется существенный объём металлургического шлака. По литературным данным (Sanchez, Sudbury, 2013), на современных медеплавильных производствах мира удельный выход

**Для цитирования:** Ерохин Ю. В., Пономарев В. С., Захаров А. В., Леонова Л. В. Минералогия медных шлаков Кировградского завода (Свердловская область) // Вестник геонаук. 2026. 1(373). С. 22–31. DOI: 10.19110/geov.2026.1.3

**For citation:** Erokhin Yu. V., Ponomarev V. S., Zakharov A. V., Leonova L. V. The mineralogy of copper slags the Kirovgrad plant (Sverdlovsk region). Vestnik of Geosciences, 2026, 1(373), pp. 22–31, doi: 10.19110/geov.2026.1.3



шлака варьирует в диапазоне от 2 до 5 тонн на одну тонну получаемой черновой меди в зависимости от применяемой технологической схемы. Из-за этого по всему миру накоплены гигантские объемы медных шлаков, в том числе и в Уральском регионе, который несколько столетий являлся одним из главных металлургических центров сначала Российской империи, затем Советского Союза, а теперь и современной России. Современные научные исследования в области минералогии и вещественного состава медных шлаков сосредоточены преимущественно на анализе отходов действующих медеплавильных предприятий. Причиной этому является то, что с последними связаны большие экологические проблемы и на них накоплены колоссальные объемы шлака. Причем эти отходы кроме меди содержат и другие ценные компоненты, а также металлы, в том числе и благородные (Chun et al., 2015; Nasab et al., 2022; Ерохин и др., 2025 и мн. др.). Полученные в ходе детальных минералого-геохимических исследований результаты создают научную основу для разработки технологий вторичной переработки медных шлаков. Внедрение таких данных в производстве позволяет вовлекать в хозяйственный оборот медные шлаки, снижать антропогенную нагрузку на экосистемы и оптимизировать использование минерально-сырьевой базы.

Калатинский (ныне Кировградский) медеплавильный завод был основан в 1914 г. и назван по расположенному рядом поселку Калата. Он успел поработать с 1914 по 1917 г. и был закрыт в связи с революционными событиями и последующей национализацией предприятия. С 1922 г. завод возобновил свою деятельность. В 1935 г. город Калата (в 1932 г. быстро растущий поселок стал городом) был переименован в г. Кировград. В годы Великой Отечественной войны завод продолжал работать и выпускал продукцию военного назначения. В послевоенные годы модернизировался и постепенно расширял свою работу (стал дополнительно выплавлять бронзу, цинк и свинец). В 1957 г. завод был преобразован в комбинат за счет объединения горного, металлургического и химического производств. В девяностые годы предприятие стало стагнировать и сокращать выпуск продукции. Развал комбината был предотвращен за счет вхождения в структуру Уральской горно-металлургической компании (Металлургические..., 2001). На данный момент Кировградский комбинат активно работает и имеет постоянно растущие отвалы металлургических шлаков и пиритных огарков. Область техногенного влияния предприятия распространяется на сам Кировград и его восточные и южные окраины.

Цель настоящего исследования — изучение минералогии медных шлаков Кировградского завода для их использования в дальнейшем металлургическом перепеделе.

### Пробоотбор и методы исследования

Металлургический завод находится на юго-восточной окраине г. Кировграда. Шлаки складываются непосредственно около восточной части завода на заболоченной территории. Шлакоотвал имеет 630 × 690 м в ширину (на спутниковых снимках характеризуется округлой формой) и около 60–70 м в высоту. Кроме то-

го, шлаки встречаются на всей территории заводоуправления и ими укреплены стенки крупного хвостохранилища, расположенного на южной окраине города. На самой территории города шлак является вполне обычным техногенным мусором, что, возможно, стало следствием отсыпки дорожного полотна.

Мы отобрали пробы шлака и штейна в северной части шлакоотвала (отбор проб производился у основания отвала), а также в северной части шлаохранилища недалеко от автодороги Кировград — Верхний Тагил. Шлаки однородные, черного или темно-серого цвета, обычно с красноватой патинной на поверхности. Их размер варьирует от первых см до 1 м. Пористость достаточно низкая, не более 5–10 об. %. Некоторые шлаки покрыты зелеными пленками вторичной медной минерализации. Всего нами отобрано около 100 образцов, из которых было выбрано 5 наиболее типовых для детального изучения.

Химический состав минералов и фотографии в режиме BSE (обратнорассеянных электронов) сделаны с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA LMS, S6123 с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 450 X-Max 80 фирмы Oxford Instruments и программным обеспечением AZtecOne с ускоряющим напряжением 20 кВ и временем экспозиции 5 мс на пиксель. Анализ проводился с полированных шлифов с углеродным напылением (аналитик Л. В. Леонова). Микроэлементный состав шлака был определен методом ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7700X и методом атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе AAnalyst 400 (ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН, г. Миасс, аналитик К. А. Филиппова). Кристаллохимический пересчет минералов производился катионным методом (на количество катионов в минерале), а содержание окисного железа рассчитывалось согласно стехиометрии минерала.

### Результаты исследования

В результате проведенных исследований оказалось, что отобранные нами медные шлаки визуально однородные и их можно разделить на два типа по крупности зерен — тонко- и мелкозернистые, крупно- и гигантозернистые. Изучение микроэлементного (геохимического) состава этих двух типов показало их существенные различия (табл. 1). Первый тип шлаков (тонко- и мелкозернистого строения) характеризуется условно «базитовым» геохимическим трендом — более высокими концентрациями титана, ванадия, хрома, бария, стронция, молибдена и РЗЭ. Второй тип (крупно- и гигантозернистые шлаки) отличается условно «гипербазитовым» трендом — повышенными количествами хрома, кобальта, никеля и низкими содержаниями РЗЭ. Для этого же типа характерны anomalously высокие содержания цинка, свинца и олова.

Минералогия первого типа медных шлаков представлена следующими минералами.

**Фаялит** ( $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ ) является главным минералом в шлаке первого типа (около 50–55 об. %) и образует скелетные длиннопризматические кристаллы размером до 0.2–0.3 мм в длину в виде структуры «спинифекс» (рис. 1). По данным химического состава минерал относится к фаялиту и имеет зональность: в центре он более магниезильный, а по краям — железистый

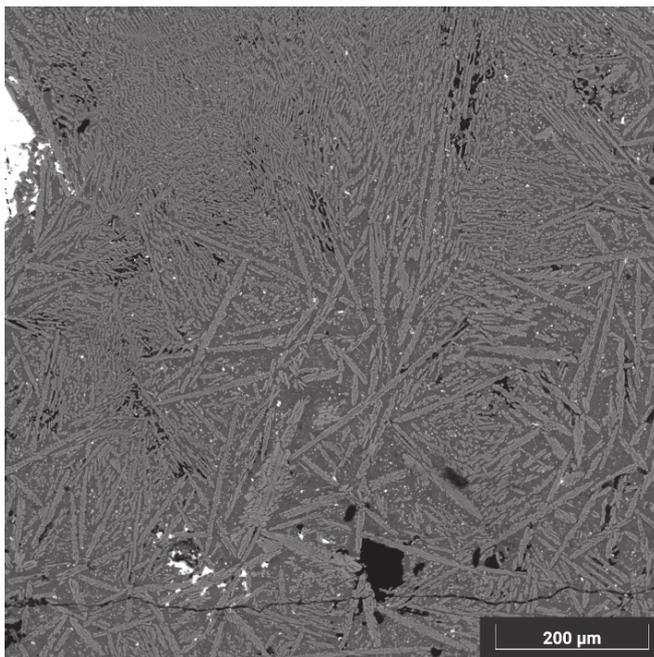
**Таблица 1.** Микроэлементный состав шлаков Кировградского завода (в г/т)

**Table 1.** Microelement composition of slags from the Kirovgrad plant (in ppm)

Элементы Elements	KB3-1	KB3-4	Элементы Elements	KB3-1	KB3-4	Элементы Elements	KB3-1	KB3-4
Li	20.60	7.44	Zr	76.60	80.40	Eu	3.14	1.38
Be	3.15	3.48	Nb	4.02	2.01	Gd	2.55	1.07
Cs	2.10	0.64	Ag	13.20	21.80	Tb	0.39	0.16
Sc	7.08	2.66	Mo	339.0	80.00	Dy	2.30	1.16
Ti	1677.0	822.0	Cd	2.77	<0.22	Ho	0.50	0.21
V	78.60	29.80	In	8.18	78.3	Er	1.49	0.63
Cr	515.0	387.0	Sn	138.0	6193.0	Tm	0.21	0.09
Co	125.0	570.0	Sb	164.0	1795.0	Yb	1.38	0.59
Ni	32.90	1583.0	Te	0.55	0.57	Lu	0.22	0.09
Zn	30600	66077	Ta	0.40	0.24	Hf	2.25	2.23
Ga	71.10	13.80	Ba	8711.0	3728.0	Tl	2.06	2.57
As	637.0	1066.0	La	16.00	4.93	W	34.80	20.40
Se	3.49	<2.35	Ce	33.00	13.00	Pb	1300.0	22696
Rb	21.90	9.16	Pr	3.26	1.37	Bi	1.11	1.11
Sr	623.0	179.0	Nd	13.90	5.92	Th	3.55	1.50
Y	13.70	5.27	Sm	2.71	1.23	U	6.43	1.63

Примечание: обр. KB3-1 — тонкозернистый шлак, обр. KB3-4 — крупнозернистый шлак.

Note: sample KB3-1 — fine-grained slag, sample KB3-4 — coarse-grained slag.



**Рис. 1.** Внешний вид кировградского шлака первого типа с призматическими кристаллами фаялита. Здесь и далее — BSE-фото, TESCAN MIRA LMS, S6123

**Fig. 1.** Appearance of Kirovgrad slag of the first type with prismatic crystals of fayalite. From here on — BSE photo, TESCAN MIRA LMS, S6123

(см. табл. 2, ан. 1–2). По данным кристаллохимического пересчета, оливин является феррогортонолитом, только центральные зоны содержат до 12 % минала форстерита, а краевые — не более 6.5 %. Кроме магнезия фаялит содержит и другие примеси — ZnO (до 3.9 мас. %), CaO (до 1.4 мас. %), MnO (до 1.3 мас. %) и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0.5 мас. %). Причем глинозем проявлен только в краевых зонах индивидов оливина.

**Авгит** ((Ca,Mg,Fe,Al)<sub>2</sub>[(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>]) относится к второстепенным минералам в шлаке первого типа, его объёмная доля составляет около 20 %. Минерал локализуется в межзерновом пространстве кристаллов фаялита (см. рис. 2). Пироксен образует короткопризматические индивиды, их максимальный размер не превышает 50 мкм по удлинению. Пироксен слагает сплошной агрегат, который содержит включения магнетита и сульфидов. Результаты анализа химического состава пироксена показывают, что его точки на классификационных диаграммах попадают в поле авгита, при этом они расположены вблизи границы области геденбергита. Август содержит примеси глинозема (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> до 7.0 мас. %), ZnO (до 2.6 мас. %), TiO<sub>2</sub> (до 0.8 мас. %), MgO (до 0.7 мас. %) и MnO (до 0.6 мас. %). Изредка отмечается присутствие BaO (до 0.5 мас. %).

**Магнетит** (Fe<sup>2+</sup>Fe<sup>3+</sup><sub>2</sub>O<sub>4</sub>) в шлаке встречается редко (не более 5 об. %) и образует изометричные и округлые зерна (рис. 2) размером до 10 мкм, которые распылены по всей матрице пироксена, а также в скоплениях сульфидов. Некоторые зерна имеют зональность (хорошо видна в BSE-режиме): в центре развит хромит, а по краям — магнетит. По составу минерал относится к магнетиту и характеризуется повышенным содержанием Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 5.1 мас. %) и ZnO (до 3.7 мас. %), что отвечает 11 % минала герцинита и 10 % минала франклинита соответственно. Из других примесей отмечаются TiO<sub>2</sub> (до 3.0 мас. %), SiO<sub>2</sub> (до 0.9 мас. %), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0.7 мас. %) и V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (до 0.4 мас. %). Кристаллохимическая формула магнетита по данным пересчета — (Fe<sup>2+</sup><sub>0.90</sub>Zn<sub>0.10</sub>)<sub>1.00</sub>(Fe<sup>3+</sup><sub>1.62</sub>Al<sub>0.22</sub>Ti<sub>0.09</sub>Si<sub>0.04</sub>Cr<sub>0.02</sub>V<sub>0.01</sub>)<sub>2.00</sub>O<sub>4</sub>.

**Хромит** (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) в шлаке встречается крайне редко и исключительно в центральной части некоторых зональных зерен шпинелида (рис. 2). Химический состав хромита (в мас. %, средн. из 9-и ан.): SiO<sub>2</sub> — 1.01, TiO<sub>2</sub> — 1.72, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 12.62, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 25.36, V<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.72, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 24.47, FeO — 25.89, ZnO — 7.66, MgO — 0.55 пересчитывается на формулу (Fe<sup>2+</sup><sub>0.77</sub>Zn<sub>0.20</sub>Mg<sub>0.03</sub>)<sub>1.00</sub>



$(Cr_{0.71}Fe^{3+}_{0.65}Al_{0.53}Ti_{0.05}Si_{0.04}V_{0.02})_{2.00}O_4$ . Учитывая высокое содержание цинка в минерале, предполагаем, что хромшпинелид является не реликтовым, а образованным непосредственно в данном минеральном агрегате.

**Троилит** (FeS) является одним из главных сульфидных минералов в шлаке первого типа. Он слагает отдельные округлые включения размером до 200 мкм в медно-железистых сульфидах (рис. 3). По составу пол-

ностью соответствует троилиту и содержит небольшие примеси Cu (до 1.9 мас. %) и Co (до 0.7 мас. %).

**Рудашевскит** ((Fe,Zn)S) встречается совместно с троилитом. Он образует зерна неправильных очертаний размером до 100 мкм, исключительно на контакте с троилитом. По химическому составу (в мас. %, средн. из 9 ан.): S — 34.86, Fe — 34.51, Zn — 28.15, Cu — 2.12, Mn — 0.36 — минерал хорошо пересчитывается

**Таблица 2.** Химический состав фаялита и авгита в шлаках первого типа (в мас. %)

**Table 2.** Chemical composition of fayalite and augite in slags of the first type (in wt. %)

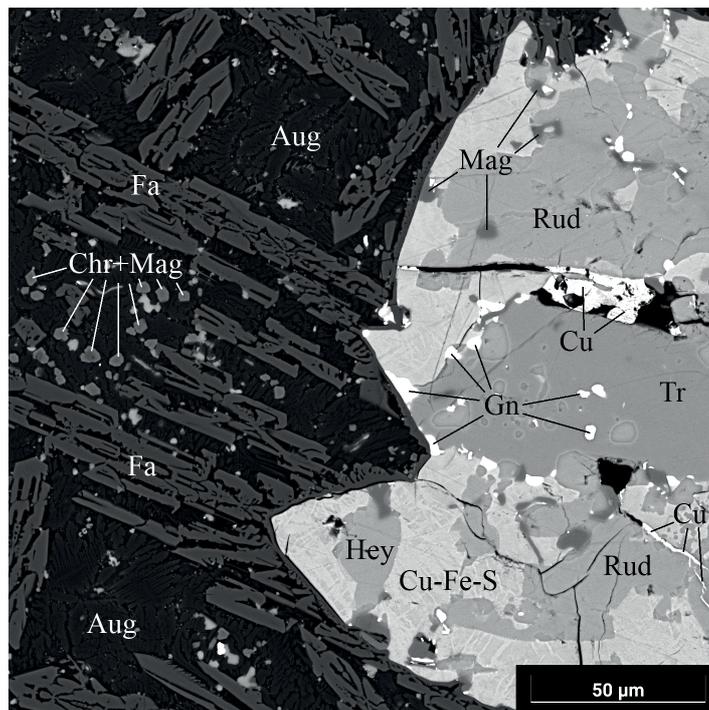
№ ан. Analysis No.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	Sum
1c	30.57	–	–	59.48	1.31	2.87	4.91	0.86	100
1k	29.45	–	0.52	61.33	1.20	3.76	2.54	1.20	100
2c	30.66	–	–	59.19	1.19	3.09	5.08	0.79	100
2k	29.19	–	0.40	61.98	1.23	3.94	1.89	1.37	100
3	43.27	0.60	6.97	28.72	0.51	2.46	0.67	16.80	100
4	43.57	0.81	6.98	27.37	0.55	2.62	0.65	17.45	100
5	44.04	0.65	6.14	28.39	0.52	2.39	0.73	17.14	100

Кристаллохимические формулы / Crystal-chemical formulas

1c	$(Fe_{1.62}Mg_{0.24}Zn_{0.07}Mn_{0.04}Ca_{0.03})_{2.00}[Si_{1.00}O_4]$
1k	$(Fe_{1.71}Mg_{0.13}Zn_{0.09}Ca_{0.04}Mn_{0.03})_{2.00}[(Si_{0.98}Al_{0.02})_{1.00}O_4]$
2c	$(Fe_{1.62}Mg_{0.25}Zn_{0.07}Mn_{0.03}Ca_{0.03})_{2.00}[Si_{1.00}O_4]$
2k	$(Fe_{1.73}Zn_{0.10}Mg_{0.09}Ca_{0.05}Mn_{0.03})_{2.00}[(Si_{0.98}Al_{0.02})_{1.00}O_4]$
3	$(Ca_{0.74}Fe_{0.26})_{1.00}(Fe_{0.73}Al_{0.12}Zn_{0.07}Mg_{0.04}Mn_{0.02}Ti_{0.02})_{1.00}[(Si_{1.78}Al_{0.22})_{2.00}O_6]$
4	$(Ca_{0.77}Fe_{0.23})_{1.00}(Fe_{0.70}Al_{0.13}Zn_{0.08}Mg_{0.04}Ti_{0.03}Mn_{0.02})_{1.00}[(Si_{1.79}Al_{0.21})_{2.00}O_6]$
5	$(Ca_{0.76}Fe_{0.24})_{1.00}(Fe_{0.74}Al_{0.11}Zn_{0.07}Mg_{0.04}Mn_{0.02}Ti_{0.02})_{1.00}[(Si_{1.81}Al_{0.19})_{2.00}O_6]$

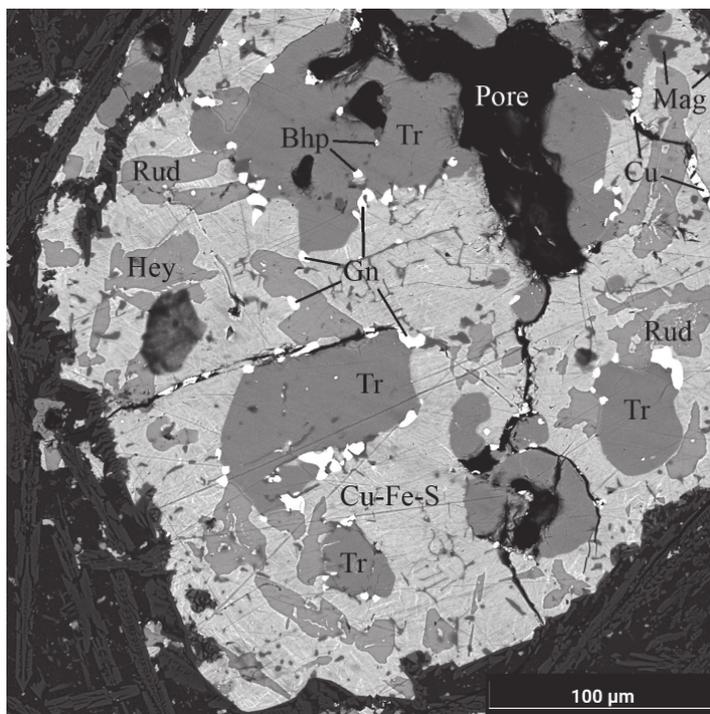
*Примечание:* здесь и далее — ан. — анализ, с — центр зерна, к — край зерна; ан. 1–2 — фаялит, ан. 3–5 — авгит.

*Note:* from here on — an. — analysis, c — grain center, k — grain edge; an. 1–2 — fayalite, an. 3–5 — augite.



**Рис. 2.** Контакт силикатной матрицы с сульфидами в шлаке. Условные обозначения: фаялит — Fa, авгит — Aug, хромит — Chr, магнетит — Mag, троилит — Tr, сульфиды Cu-Fe — Cu-Fe-S, галенит — Gn, рудашевскит — Rud, хейкокит — Hey, медь — Cu

**Fig. 2.** Contact of the silicate matrix with sulfides in the slag. Legend: fayalite — Fa, augite — Aug, chromite — Chr, magnetite — Mag, troilite — Tr, Cu-Fe sulfides — Cu-Fe-S, galena — Gn, rudashevskite — Rud, haycockite — Hey, copper — Cu



**Рис. 3.** Сульфидное скопление в шлаке. Условные обозначения: брейтгауптит — Bhp, магнетит — Mag, троилит — Tr, сульфиды Cu-Fe — Cu-Fe-S, галенит — Gn, рудашевскит — Rud, хейкокит — Hey, медь — Cu, пустоты — Pore

**Fig. 3.** Sulfide accumulation in slag. Legend: breithauptite — Bhp, magnetite — Mag, troilite — Tr, Cu-Fe sulfides — Cu-Fe-S, galena — Gn, rudashevskite — Rud, haycockite — Hey, copper — Cu, voids — Pore

на формулу рудашевскита ( $\text{Fe}_{0.57}\text{Zn}_{0.39}\text{Cu}_{0.03}\text{Mn}_{0.01}$ ) $_{1.00}\text{S}_{1.00}$ , который является железистым аналогом сфалерита и встречается в хондритах (Britvin et al., 2008).

**Галенит** (PbS) достаточно обильно распылен по матрице сульфидных скоплений, реже встречается среди агрегата силикатов. В сульфидной матрице он слагает округлые и вытянутые включения размером до 20–25 мкм, обычно концентрируясь на границе троилита и медно-железистых сульфидов (рис. 2, 3). По составу соответствует галениту и характеризуется небольшой примесью Fe (до 2.6 мас. %).

**Сульфиды Cu-Fe** являются главными минералами серы в шлаке первого типа и наблюдаются по всей матрице породы. Они образуют округлые выделения размером до 1–2 мм и характеризуются неоднородностью, а также наличием структур распада. Кроме того, в их матрице зафиксированы включения других рудных минералов (см. рис. 2, 3). Химический состав более светлых (в BSE-изображении) зон переменный (в мас. %, средн. из 26 ан.): S — 25.4–27.5, Fe — 15.4–18.4, Cu — 51.3–56.6. Химический состав темных зон существенно железистый (в мас. %, средн. из 18 ан.): S — 27.8–29.6, Fe — 21.6–23.0, Cu — 47.1–49.7. В природных условиях сульфидные соединения указанного состава пока не обнаружены. Однако в лабораторных экспериментах удалось синтезировать аналогичные «расплавные твердые растворы» системы  $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_{2+y}\text{S}_{2-z}$  в интервале температур от 325 до 1012 °C (Kosyakov, Sinyakova, 2014). При этом в шлаке отмечаются выделения и других сульфидов Cu-Fe — **кубанита** ( $\text{CuFe}_2\text{S}_3$ ) и **хейкокита** ( $\text{Cu}_4\text{Fe}_5\text{S}_8$ ). Кубанит образует небольшие ксеноморфные зерна размером до 50 мкм среди агрегата пироксена. По составу (в мас. %, средн. из 12 ан.): S — 34.56, Fe — 41.63, Zn — 1.17, Cu — 22.64 — минерал удовлетворительно пересчитывается на формулу ку-

банита —  $(\text{Cu}_{0.97}\text{Zn}_{0.05})_{1.02}\text{Fe}_{2.04}\text{S}_{2.94}$ . Хейкокит обнаружен в сульфидных шариках, где тоже слагает ксеноморфные выделения размером до 70 мкм рядом с троилитом и рудашевскитом. По составу (в мас. %, средн. из 10 ан.): S — 32.12, Fe — 35.63, Cu — 32.25 — минерал нормально пересчитывается на формулу хейкокита —  $\text{Cu}_{4.02}\text{Fe}_{5.05}\text{S}_{7.93}$ .

**Брейтгауптит** (NiSb) встречается исключительно в сульфидных скоплениях, образуя небольшие изометричные включения размером до 15–20 мкм в троилите и хейкоките. По химическому составу (в мас. %, средн. по 11 ан.): Sb — 58.13, As — 8.04, Fe — 5.34, Co — 2.47, i — 26.02 — минерал пересчитывается на формулу стибнида никеля —  $(\text{Ni}_{0.76}\text{Fe}_{0.17}\text{Co}_{0.07})_{1.00}(\text{Sb}_{0.82}\text{As}_{0.18})_{1.00}$ . В редких случаях отмечаются зерна брейтгауптита с примесью Sn (до 11.9 мас. %).

**Вестервельдит** (FeAs) встречается в сульфидных шариках, но значительно реже брейтгауптита. Он образует зерна размером до 10 мкм в виде включений в матрице меди. По химическому составу (в мас. %, средн. по 9 ан.): As — 53.43, Sb — 3.68, Fe — 21.26, Co — 8.35, Ni — 9.16, Cu — 4.12 — минерал хорошо пересчитывается на формулу арсенида железа —  $(\text{Fe}_{0.51}\text{Ni}_{0.21}\text{Co}_{0.19}\text{Cu}_{0.09})_{1.00}(\text{As}_{0.96}\text{Sb}_{0.04})_{1.00}$ .

**Медь** (Cu) образует скопления и проволоочки размером до 100 мкм в центральной части сульфидных шариков (рис. 2, 3). К сожалению, металл при изготовлении полированных шлифов часто выкрашивается и на его месте остаются дырки. Медь обычно содержит примеси Fe (в пределах 2.1–4.1 мас. %) и S (от 0.4 до 1.7 мас. %). При этом изредка встречаются зерна меди, обогащенные Au (до 12 мас. %).

**Серебро** (Ag) образует округлые включения размером 5–10 мкм в сульфидных шариках. Металл приурочен к границе троилита и медно-железистых сульфидов.



фидов, где наблюдаются скопления галенита. Серебро чистое и содержит небольшие примеси Fe (до 2.6 мас. %), Cu (до 1.7 мас. %), а также S (до 0.8 мас. %).

Второй тип медных шлаков представлен следующими минералами:

**Фаялит** ( $\text{Fe}_2[\text{SiO}_4]$ ) является главным минералом и в шлаке второго типа (около 40–45 об. %). Он образует длиннопризматические футляровидные кристаллы размером до 2–3 см в длину (рис. 4). По составу минерал относится к фаялиту (см. табл. 3, ан. 1–2) и содержит примеси ZnO (до 10.2 мас. %), MgO (до 2.1 мас. %), CaO (до 1.0 мас. %), MnO (до 0.8 мас. %), т. е. рассчитываются миналы виллемита (до 13 %), форстерита (до 5 %) и кальциооливина (до 2 %). Имеет слабую зональность, марганец отмечается только в краевых зонах индивидов оливина.

**Геденбергит** ( $\text{CaFe}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ ) является второстепенным минералом в шлаке (около 15 об. %) и встречается в интерстициях между призматическими индивидами фаялита (рис. 4, 5). Пироксен образует мелкие короткопризматические индивиды размером не более 30 мкм, которые находятся в матрице стекла. В BSE-режиме имеет самую темную окраску. По химическому составу пироксен вполне однородный (см. табл. 3, ан. 3–5) и на классификационной диаграмме попадает в поле геденбергита. В нем установлены примеси ZnO (до 6.6 мас. %),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 5.3 мас. %) и  $\text{TiO}_2$  (до 1.0 мас. %).

**Магнетит** ( $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ ) в шлаке встречается часто (не более 20 об. %) и образует идиоморфные изометричные или вытянутые индивиды (рис. 4, 5) размером до 100 мкм, которые распылены по всей матрице породы. Магнетит имеет однородный химический состав и отличается повышенным содержанием ZnO (до 6.9 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (до 5.0 мас. %), что в пересчете дает 19 % минала франклинита и 11 % минала герцинита.

Кристаллохимическая формула —  $(\text{Fe}^{2+}_{0.81}\text{Zn}_{0.19})_{1.00}(\text{Fe}^{3+}_{1.78}\text{Al}_{0.22})_{2.00}\text{O}_4$ .

**Стекло** в шлаке встречается часто, его количество достигает 10 об. %. Оно выполняет интерстиции между индивидами фаялита и содержит включения пироксена, сульфидов и магнетита (рис. 5). При этом размер чистых участков стекла, свободных от включений, достигает 50–70 мкм. Представительный состав стекла (в мас. %):  $\text{SiO}_2$  — 39.23;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 5.97; FeO — 15.56; PbO — 11.03; ZnO — 17.34; BaO — 2.26; CaO — 7.84;  $\text{K}_2\text{O}$  — 0.77.

**Сульфиды Cu-Fe** являются главными минералами серы в шлаке второго типа и встречаются по всей матрице породы. Они образуют полифазные сферулы (рис. 5) обычно размером до 100 мкм в диаметре, но иногда достигают 1–2 мм. Часто содержат включения галенита и сфалерита. Матрица сферул сложена следующей фазой (в мас. %, средн. из 25 ан.) — S — 23.6, Fe — 9.6, Cu — 66.8, которая вполне соответствует **борниту** ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  — S — 25.6, Fe — 11.1, Cu — 63.3). В борните наблюдаются структуры распада (пластинки до 5–10 мкм, более светлые в BSE-режиме) с более медистым составом (в мас. %, средн. из 27 ан.): S — 19.6, Fe — 1.7, Cu — 78.7, который отвечает **халькозину** ( $\text{Cu}_2\text{S}$  — S — 20.1, Cu — 79.9).

**Сфалерит** (ZnS) образует округлые включения (более темные в BSE-режиме на фоне других сульфидов) размером до 40–50 мкм в матрице сульфидных скоплений. По химическому составу сульфид цинка медистый и железистый (в мас. %, средн. из 12 ан.): S — 32.67, Fe — 1.20, Zn — 62.95, Cu — 3.18, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу —  $(\text{Zn}_{0.94}\text{Cu}_{0.05}\text{Fe}_{0.02})_{1.01}\text{S}_{0.99}$ .

**Галенит** (PbS) достаточно обильно распылен по матрице сульфидных сферул, где он слагает округлые включения и их скопления размером до 20–25 мкм (рис. 5). По составу соответствует галениту и характе-

**Таблица 3.** Химический состав фаялита и геденбергита в шлаках второго типа (в мас. %)

**Table 3.** Chemical composition of fayalite and hedenbergite in the second type slags (in wt. %)

№ ан. Analysis No.	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	Sum
1c	29.90	–	–	57.57	–	9.61	2.06	0.86	100
1k	29.57	–	–	57.14	0.68	10.19	1.47	0.95	100
2c	30.11	–	–	58.39	–	8.95	1.78	0.77	100
2k	29.67	–	–	57.86	0.77	9.65	1.36	0.69	100
3	42.83	0.79	4.67	27.03	–	6.13	–	18.55	100
4	42.48	0.96	4.35	26.61	–	6.62	–	18.98	100
5	43.60	0.73	5.32	25.39	–	6.14	–	18.82	100

Кристаллохимические формулы  
Crystal-chemical formulas

1c	$(\text{Fe}_{1.62}\text{Zn}_{0.24}\text{Mg}_{0.10}\text{Ca}_{0.03})_{1.99}[\text{Si}_{1.01}\text{O}_4]$
1k	$(\text{Fe}_{1.62}\text{Zn}_{0.26}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.03}\text{Mn}_{0.02})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$
2c	$(\text{Fe}_{1.65}\text{Zn}_{0.22}\text{Mg}_{0.09}\text{Ca}_{0.03})_{1.99}[\text{Si}_{1.01}\text{O}_4]$
2k	$(\text{Fe}_{1.64}\text{Zn}_{0.24}\text{Mg}_{0.07}\text{Ca}_{0.03}\text{Mn}_{0.02})_{2.00}[\text{Si}_{1.00}\text{O}_4]$
3	$(\text{Ca}_{0.83}\text{Fe}_{0.17})_{1.00}(\text{Fe}_{0.77}\text{Zn}_{0.19}\text{Ti}_{0.02})_{0.98}(\text{Si}_{1.79}\text{Al}_{0.23})_{2.02}\text{O}_6$
4	$(\text{Ca}_{0.85}\text{Fe}_{0.15})_{1.00}(\text{Fe}_{0.78}\text{Zn}_{0.20}\text{Ti}_{0.03})_{1.01}(\text{Si}_{1.77}\text{Al}_{0.22})_{1.99}\text{O}_6$
5	$(\text{Ca}_{0.84}\text{Fe}_{0.16})_{1.00}(\text{Fe}_{0.72}\text{Zn}_{0.19}\text{Al}_{0.07}\text{Ti}_{0.02})_{1.00}(\text{Si}_{1.81}\text{Al}_{0.19})_{2.00}\text{O}_6$

Примечание: ан. 1–2 — фаялит, ан. 3–5 — геденбергит.

Note: an. 1–2 — fayalite, an. 3–5 — hedenbergite.

ризуется небольшими примесями Cu (до 3.2 мас. %) и Fe (до 2.1 мас. %).

**Брейтгауптит** (NiSb) часто встречается в сульфидных скоплениях, образуя изометричные зерна размером до 10 мкм. По химическому составу (в мас. %, средн. по 19 ан.): Sb — 47.63, As — 5.28, Sn — 12.92, Fe — 1.20, Cu — 3.68, Ni — 29.29 — минерал пересчитывается на формулу стибнида никеля —  $(\text{Ni}_{0.87}\text{Cu}_{0.10}\text{Fe}_{0.04})_{1.01}(\text{Sb}_{0.68}\text{Sn}_{0.19}\text{As}_{0.12})_{0.99}$ .

**Никелин** (NiAs) крайне редко встречается в сульфидных скоплениях. Он образует зерна размером до 5 мкм, в сростании с брейтгауптитом. По составу (в мас. %, средн. по 5 ан.): As — 25.32, Sb — 29.82, Sn — 6.92, Fe — 1.19, Ni — 34.10, Cu — 2.65 — минерал хорошо пересчитывается на формулу никелина —  $(\text{Ni}_{0.90}\text{Cu}_{0.07}\text{Fe}_{0.09})_{1.00}(\text{As}_{0.53}\text{Sb}_{0.38}\text{Sn}_{0.09})_{1.00}$ .

В крупных сульфидных сферах постоянно встречаются небольшие скопления никелистых халькоге-

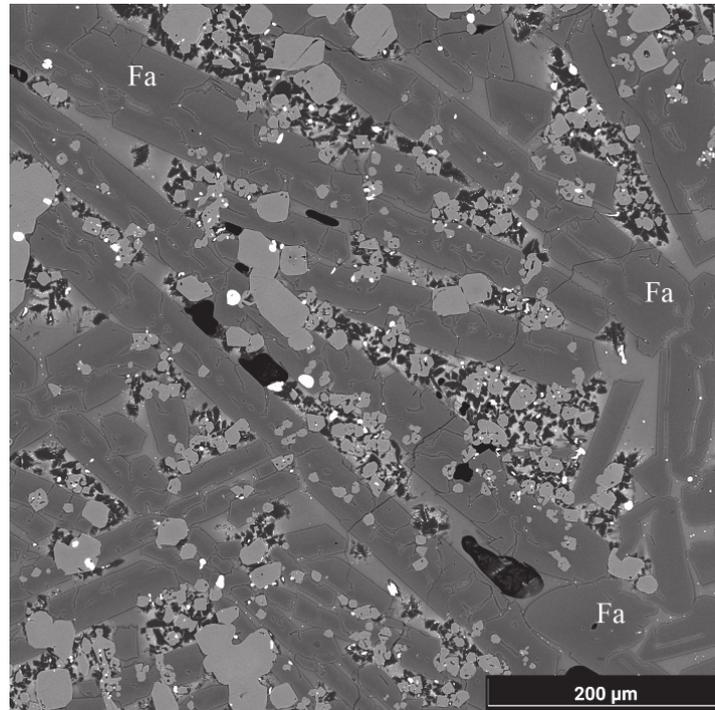


Рис. 4. Внешний вид Кировградского шлака второго типа с призматическими индивидами фаялита (Fa)

Fig. 4. Appearance of the Kirovgrad slag of the second type with prismatic individuals of fayalite (Fa)

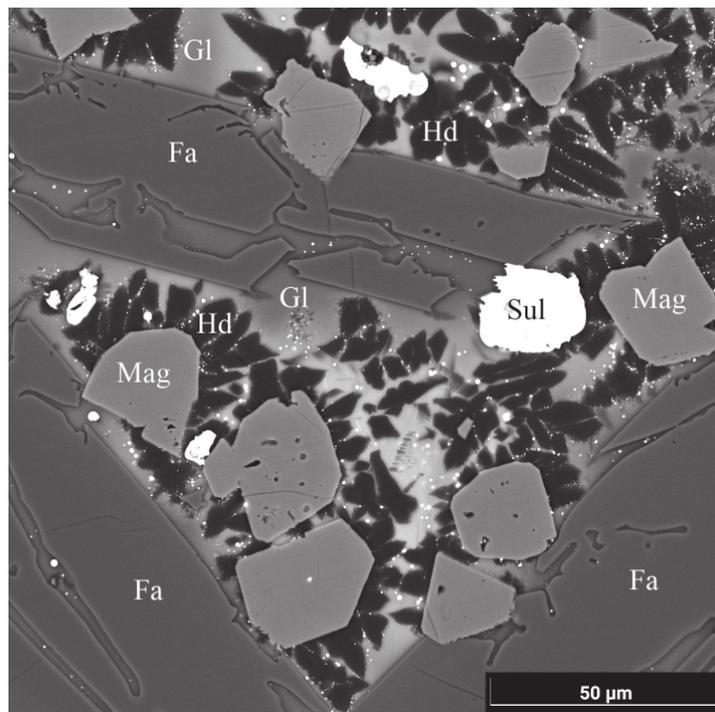


Рис. 5. Магнетит (Mag) и геденбергит (Hd) с сульфидами (Sul) среди стекла (Gl) в интерстициях между индивидами фаялита (Fa) в шлаке второго типа

Fig. 5. Magnetite (Mag) and hedenbergite (Hd) with sulfides (Sul) among glass (Gl) in interstices between fayalite (Fa) individuals in slag of the second type



нидов — пентландита, хизлевудита, шандита и барковита — размером не более 30–35 мкм.

**Пентландит**  $(\text{Fe}, \text{Ni})_9\text{S}_8$  является главным минералом скоплений никелистых халькогенидов. Он слагает как центральную часть, так и краевые зоны размером до 10–15 мкм. В центре он срастается с шандитом, образуя «клетчатый» пентландит. В краевых зонах он чистый и без каких-либо включений. Пентландит из центральной зоны более никелистый (в мас. %, средн. из 8 ан.): S — 32.84, Fe — 25.08, Ni — 42.08, что в пересчете дает следующую кристаллохимическую формулу —  $(\text{Ni}_{5.57}\text{Fe}_{3.49})_{9.05}\text{S}_{7.95}$ . В краевой зоне он более железистый (в мас. %, средн. из 10 ан.): S — 33.19, Fe — 32.59, Ni — 31.61, Co — 1.31, Cu — 1.30 — с формулой  $(\text{Fe}_{4.51}\text{Ni}_{4.16}\text{Co}_{0.17}\text{Cu}_{0.16})_{9.00}\text{S}_{8.00}$ . По Ni/Fe-отношению (Шишкин и др., 1974) сульфид в центральной зоне относится к группе никелистых пентландитов, а в краевой зоне — к собственно пентландитам.

**Хизлевудит**  $(\text{Ni}_3\text{S}_2)$  является редким минералом в скоплениях никелистых халькогенидов. Его находки приурочены к краевым зонам пентландита, где он образует округлые выделения размером до 10 мкм. По химическому составу (в мас. %, средн. по 6 ан.): S — 26.88, Fe — 1.71, Ni — 71.41 — относится к хизлевудиту —  $(\text{Ni}_{2.92}\text{Fe}_{0.07})_{2.99}\text{S}_{2.01}$ .

**Шандит**  $(\text{Ni}_3\text{Pb}_2\text{S}_2)$  является основным минералом в скоплениях никелистых халькогенидов. Он слагает каплевидные и ориентированные включения в матрице пентландита, а также каймы вокруг никелистых скоплений. Размер выделений не превышает 25 мкм. По химическому составу (в мас. %, средн. по 32 ан.): S — 10.14, Pb — 60.12, Cu — 1.78, Fe — 0.70, Ni — 27.26 — минерал хорошо пересчитывается на формулу шандита —  $(\text{Pb}_{1.83}\text{Cu}_{0.17})_{2.00}(\text{Ni}_{2.93}\text{Fe}_{0.08})_{3.01}\text{S}_{1.99}$ , который изредка встречается в ультраосновных породах

в ассоциации с пентландитом и хизлевудитом (Dymek, 1987).

**Барковит**  $(\text{Ni}_{1.5}\text{Sn})$  образует изометричные и округлые зерна размером до 10–15 мкм. Они встречаются как внутри никелистых скоплений, так и рядом в борнит-халькозиновой матрице (рис. 6). По химическому составу (в мас. %, средн. по 15 ан.): Sn — 40.65, Sb — 12.84, As — 2.04, Cu — 2.51, Fe — 0.80, Ni — 41.16 — минерал удивительно пересчитывается на следующую формулу —  $(\text{Ni}_{1.42}\text{Cu}_{0.08}\text{Fe}_{0.03})_{1.53}(\text{Sn}_{0.70}\text{Sb}_{0.21}\text{As}_{0.06})_{0.97}$ . В природе минерал установлен недавно в щелочных породах Кольского полуострова (Bosi et al., 2025). При этом как синтетическое вещество  $\text{Ni}_3\text{Sn}_2$  известен уже давно и активно используется в литиевых батареях (Glazer et al., 2017).

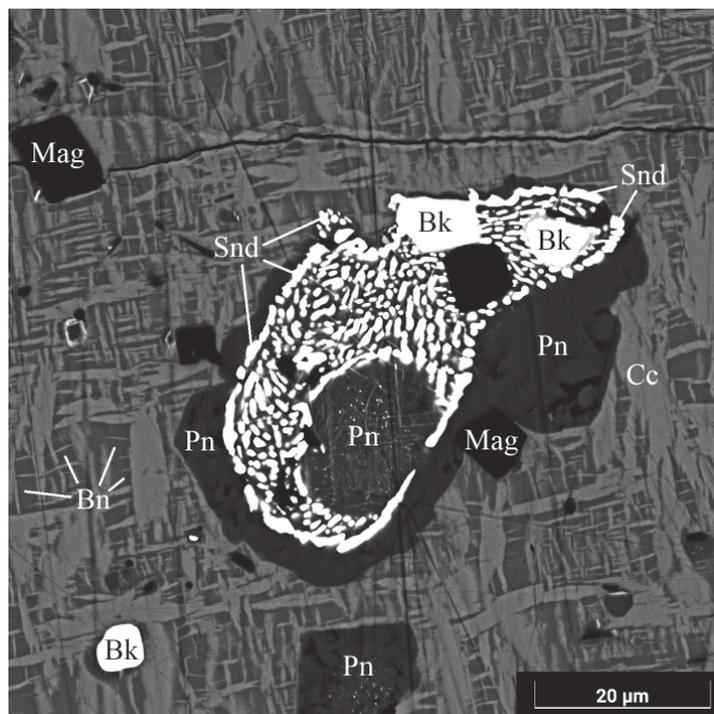
**Серебро** (Ag) образует проволоочки размером 20 мкм, приуроченные как к выделениям шандита, так и к скоплениям галенита. Серебро достаточно чистое и содержит примеси Cu (до 3.2 мас. %), Fe (до 2.3 мас. %), а также Ni (до 1.7 мас. %).

**Медь** (Cu) слагает скопления размером до 300 мкм в центральной части крупных сульфидных сферул. Металл содержит включения сульфидов, магнетита и барковита. Медь не содержит каких-либо примесей, очень редко Fe (до 2.5 мас. %).

### Обсуждение результатов

В результате проведенного исследования в шлакоотвалах Кировградского медеплавильного завода отчетливо выделяются два типа медных шлаков:

Первый тип шлаков имеет тонко- и мелкозернистое строение и сложен фаялит-авгитовым агрегатом с присутствием магнетита, хромита и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также меди



**Рис. 6.** Скопления никелистых халькогенидов в матрице крупных сульфидных выделений. Условные обозначения: пентландит — Pn, магнетит — Mag, шандит — Snd, халькозин — Cc, борнит — Bn, барковит — Bk

**Fig. 6.** Nickel-rich chalcogenide clusters in the matrix of large sulfide segregations. Legend: pentlandite — Pn, magnetite — Mag, shandite — Snd, chalcocite — Cc, bornite — Bn, barkovite — Bk



и серебра. Халькогениды представлены троилитом, кубанитом, хейкоцитом, рудашевскитом, галенитом, брейтгауптитом, вестервельдитом и неопределяемыми сульфидами Cu-Fe. Минералогия шлака хорошо согласуется с микроэлементным составом породы. Во всех породообразующих минералах, т. е. в фаялите и авгите, а также в магнетите и хромите отмечается повышенная примесь цинка. В магнетите и хромите в значимых количествах находятся примеси титана и ванадия, а хром является главной составляющей хромита. Барий в виде примесей отмечался в клинопироксене. Кроме того, в шлаке присутствуют собственные минералы цинка, мышьяка и свинца — рудашевскит, вестервельдит и галенит соответственно.

Второй тип шлаков имеет крупно- и гигантозернистое строение и представлен фаялит-геденбергитовым агрегатом со значительным присутствием магнетита, стекла и арсенидно-стибнидно-сульфидной минерализации, а также барковита, меди и серебра. Халькогениды представлены борнитом, халькозином, сфалеритом, галенитом, пентландитом, хизлевудитом, брейтгауптитом, никелином и шандитом. Полученная минералогия полностью подтверждает микроэлементный состав шлака. Так, во всех породообразующих минералах, т. е. в фаялите и авгите, а также в магнетите отмечается аномально высокая примесь цинка, а также установлен собственный минерал цинка — сфалерит. Присутствие свинца в шлаке подтверждается не только галенитом, но и шандитом. Высокое содержание олова доказывается собственным минералом — барковитом и примесями в никелине и брейтгауптите. Опять же, обогащенность шлака никелем объясняется присутствием целого ряда минералов — пентландитом, хизлевудитом, барковитом, никелином, брейтгауптитом и шандитом.

Находка двух разных типов шлака хорошо согласуется с тем, что в последние годы своей работы Кировградский комбинат сменил свою рудную базу. С самого основания и вплоть до начала 2000-х годов завод плавил медно-колчеданные руды местных, расположенных в окрестностях Кировграда месторождений Левихинского рудного поля (Амирасланов, 1934). И мы считаем, что первый тип шлака был получен в этот временной период. Косвенным доказательством этому служит работа В. В. Лапина о составе фаялита из шлаков Кировградского завода, опубликованная в 1941 г., где указывалось, что содержание ZnO в фаялите составляет 4.7 вес. % (Лапин, 1941). Этот показатель близок к полученному нами количеству ZnO (до 3.9 мас. %) в фаялите. В 2003 г. рудники Левихинского поля полностью истощились и завод стал использовать медно-колчеданную руду Сафьяновского полиметаллического месторождения. По всей видимости, второй тип шлаков характеризует современные плавки колчеданных руд, т. к. сафьяновские руды богаты сфалеритом, а также содержат оловянные минералы — касситерит, станноидит и др. (Сафина и др., 2024 и др.).

Оценить объемы отвалов медного шлака Кировградского завода достаточно сложно, какая-то их часть уже утеряна. Так, в 60-х годах было установлено, что все довоенные шлаки были использованы как закладочный материал в горные выработки Калатинского и Обновленного рудников, а также на дорожное строительство. Кроме того, известно, что два

отвала шлаков застроены складами и на них проложены ж/д пути. В 1956 г. запасы шлаков в отвалах предприятия оценивались в 9 млн тонн, в 1982 г. — в 15 млн тонн, а на начало 2000 г. уже в 20 760 тыс. тонн (Мормиль, 2002). Сколько сейчас накоплено предприятием, не озвучивается, но примерно можно говорить о 25 млн тонн шлака. При этом завод проводит их вторичную переработку, но большая их часть всё равно идет в шлакоотвал.

Медные шлаки Кировградского завода являются техногенным месторождением (Макаров, Талалай, 2012 и др.) и могут быть переработаны (сам завод частично этим и занимается). Во-первых, в них присутствует промышленное содержание серебра в пределах 13–22 г/т (в нашей стране сейчас рентабельно добывать данный металл при содержании от 10 до 100 г/т). При этом ранее отмечалось, что шлаки содержат 7.8 г/т серебра и попутно 0.4 г/т золота (Мормиль, 2002). К сожалению, содержание золота в шлаках нами не определялось. Во-вторых, для извлечения доступен медно-оловянно-цинковый сульфидный концентрат (при помощи флотации), который можно далее использовать для выплавки черновой меди, цинка или бронзы. В этом же концентрате будут находиться такие ценные металлы, как свинец и никель, которые тоже необходимы промышленности. В-третьих, в разных типах шлаков посредством магнитной сепарации возможно выделение хромит-магнетитовых либо магнетитовых концентратов, характеризующихся присутствием ценных примесных элементов — ванадия, хрома, титана и цинка. После извлечения магнитных фракций остаточная масса, представленная железистыми силикатами и стекловидной фазой, также обладает рудообразующим потенциалом — в частности, за счёт значимого содержания оксида цинка. При этом если учесть, что промышленные технологии селективного извлечения железа из силикатной матрицы пока экономически нерентабельны, то, возможно, в сочетании с добавочным выделением цинка они могут стать вполне окупаемыми.

Присутствие отвалов медных шлаков в городской черте Кировграда обуславливает дополнительную техногенную нагрузку на проживающее там население. Экологические службы в почвах городской застройки уже обнаружили избыток свинца, меди, цинка и кадмия, что превышает норму в три–пять раз (Обзор..., 2024). Этот избыток металлов в почвах формируется в том числе за счет рассеянного здесь медного шлака, что и приводит к той самой техногенной «пустыне», которую может наблюдать любой человек, посетивший Кировград и окрестности завода.

## Заключение

Таким образом, впервые проведено минералогическое исследование шлаков Кировградского медеплавильного завода. В результате установлено, что рассматриваемые техногенные образования представлены двумя типами, различающимися по своим минералого-геохимическим характеристикам. Первый тип шлаков характеризуется минеральным составом, включающим фаялит, авгит, магнетит, хромит, халькогениды, медь и серебро. При этом халькогенидная минерализация разнообразная и сложена троилитом, куба-



нитом, хейкокитом, рудашевскитом, галенитом, брейтгауптитом, вестервельдитом и неопределяемыми сульфидами Cu-Fe. Второй тип шлаков характеризуется другим минеральным составом: фаялитом, геденбергитом, магнетитом, стеклом, никелином, брейтгауптитом, сульфидами, барковитом, медью и серебром. Халькогениды из шлаков второго типа представлены борнитом, халькозином, сфалеритом, галенитом, пентландитом, хизлевудитом, брейтгауптитом, никелином и шандитом. Минералогия шлаков хорошо согласуется с их микроэлементным составом. Сделан вывод, что шлаки первого типа получились в результате переплавки медно-колчеданных руд Левихинской группы месторождений, а второго типа — полиметаллических руд Сафьяновского месторождения. Шлаки Кировградского завода можно переработать с выделением сульфидного и магнетитового концентратов и попутного серебра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и правительства Свердловской области № 24-27-20061, <https://rscf.ru/project/24-27-20061/>.

## Литература / References

- Металлургические заводы Урала XVII–XX вв.: Энциклопедия /* Гл. ред. В. В. Алексеев. Екатеринбург: Академкнига, 2001. 536 с.  
Metallurgical factories of the Urals. The 17<sup>th</sup>–20<sup>th</sup> centuries: Encyclopedia. Chief editor V. V. Alekseev. Yekaterinburg: Akademkniga; 2001. 536 p. Russian.
- Амирасланов А.* Левихинская группа колчеданных месторождений на Урале // Труды Геологического института. 1934. Т. 4. С. 105–139.  
Amiraslanov A. Levikhinskaya group of pyrite deposits in the Urals. Proceedings of the Geological Institute. 1934;4:105–139. Russian.
- Ерохин Ю. В., Пономарев В. С., Захаров А. В., Леонова Л. В.* Минералогия медных шлаков Выйского завода // Вестник геонаук. 2025. № 5 (365). С. 29–35. DOI: 10.19110/geov.2025.5.4  
Erokhin Yu. V., Ponomarev V. S., Zakharov A. V., Leonova L. V. Mineralogy of copper slags of the Vyisky plant. Vestnik of Geosciences. 2025;5(365):29–35. Russian.
- Латин В. В.* О составе фаялитового силиката в шлаке медного штейна // Труды Института геологических наук, 1941. Вып. 40. С. 5–13.  
Lapin V. V. On the composition of fayalite silicate in copper matte slag. Proceedings of the Institute of Geological Sciences. 1941;40:5–13. Russian.
- Макаров А. Б., Талалай А. Г.* Техногенно-минеральные месторождения и их экологическая роль // Литосфера. 2012. № 1. С. 172–176.  
Makarov A. B., Talalay A. G. Technogenic mineral deposits and their ecological role. Lithosphere. 2012;12(1):172–176. Russian.
- Мормиль С. И., Сальников В. Л., Амосов Л. А., Хасанова Г. Г., Семьячков А. И., Зобнин Б. Б., Бурмистренко А. В.* Техногенные месторождения Среднего Урала и оценка их воздействия на окружающую среду. Екатеринбург: ДПР по Уральскому региону, 2002. 206 с.  
Mormil S. I., Salnikov V. L., Amosov L. A., Khasanova G. G., Semyachkov A. I., Zobnin B. B., Burmistrenko A. V. Technogenic deposits of the Middle Urals and assessment of their impact on the environment. Yekaterinburg: Subsoil Use Department for the Ural region; 2002. 206 p. Russian.
- Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год /* Отв. ред. Г. М. Черногаев. М.: Росгидромет, 2024. 215 с.  
Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023. Ed. G. M. Chernogaev. Moscow: Roshydromet; 2024. 215 p. Russian.
- Сафина Н. П., Коровко А. В., Блинов И. А., Анкушева Н. Н., Рассомахин М. А., Филиппова К. А.* Минералогические особенности и физико-химические условия образования жильной минерализации южного фланга Сафьяновского медно-цинково-колчеданного месторождения (Средний Урал) // Минералогия. 2024. Т. 10. № 4. С. 75–97. DOI: 10.35597/2313-545X-2024-10-4-4  
Safina N. P., Korovko A. V., Blinov I. A., Ankusheva N. N., Rassomakhin M. A., Filippova K. A. Mineralogical features and physicochemical formation of conditions of vein mineralization of the southern flank of the Saf'yanovka massive sulfide deposit (Central Urals). Mineralogy. 2024;10(4):75–97. Russian.
- Шишкин Н. Н., Карпенков А. М., Кулагов Э. А., Митенков Г. А.* О классификации минералов группы пентландита // Доклады АН СССР. 1974. Т. 217. № 1. С. 194–197.  
Shishkin N. N., Karpenkov A. M., Kulagov E. A., Mitenkov G. A. On the classification of minerals of the pentlandite group. Reports of the USSR Academy of Sciences. 1974;217(1):194–197. Russian.
- Bosi F., Hatert F., Pasero M., Mills S. J.* IMA Commission on new minerals, nomenclature and classification (CNMNC) — Newsletter 85. European Journal of Mineralogy. 2025;37:337–342. DOI: 10.5194/ejm-37-337-2025
- Britvin S. N., Bogdanova A. N., Boldyreva M. M., Aksenova G. Y.* Rudashevskyite, the Fe-dominant analogue of sphalerite, a new mineral: description and crystal structure. American Mineralogist. 2008;93:902–909. DOI: 10.2138/am.2008.2582
- Chun T., Ning C., Long H., Li J., Yang Y.* Mineralogical characterization of copper slag from Tongling Nonferrous Metals Group China. JOM (Journal of the Minerals, Metals & Materials Society). 2016;68(9):2332–2340. DOI: 10.1007/s11837-015-1752-6
- Dymek R. F.* Shandite, Ni<sub>3</sub>Pb<sub>2</sub>S<sub>2</sub>, in a serpentized metadunite from the Isua supracrustal belt, West Greenland. Canadian Mineralogist. 1987;25:245–249.
- Glazer M. P. B., Wang J., Cho J., Almer J. D., Okasinski J. S., Braun P. V., Dunand D. C.* In operando X-ray diffraction strain measurement in Ni<sub>3</sub>Sn<sub>2</sub> — coated inverse opal nanoscaffold anodes for Li-ion batteries. Journal of Power Sources. 2017;367:80–89. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.040
- Kosyakov V. I., Sinyakova E. F.* Melt crystallization of CuFe<sub>2</sub>S<sub>3</sub> in the Cu-Fe-S system. Journal Thermal Analysis Calorimetry. 2014;115:511–516. DOI: 10.1007/s10973-013-3206-0
- Nasab M. S., Bafti S. B., Yarahmadi M. R., Maymand M. M., Khorasani K. J.* Mineralogical properties of the copper slags from the Sar Cheshmeh smelter plant, Iran. Minerals. 2022;12:1153. DOI: 10.3390/min12091153
- Sanchez M., Sudbury M.* Physicochemical characterization of copper slag and alternatives of friendly environmental management. Journal of Mining and Metallurgy. Section B: Metallurgy. 2013;49:161–168. DOI: 10.2298/JMMB120814011S

Поступила в редакцию / Received 1.10.2025

# Refinement of a 3D geological model through neural-simulation-based seismic prediction

K. A. Senkina<sup>1</sup>, D. V. Istomina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> STC NOVATEK, Tyumen, Russia, [Kseniya.Senkina@novatek.ru](mailto:Kseniya.Senkina@novatek.ru)

<sup>2</sup> RN-Geology Research Development, Tyumen, Russia, [dvistomina1@tncn.rosneft.ru](mailto:dvistomina1@tncn.rosneft.ru)

Prediction of sand reservoir properties plays a key role in the exploration and development of oil and gas fields. Traditional approaches often face limitations associated with nonlinear functions, heterogeneities, and variability of rocks. These challenges lead to a decrease in the accuracy of net reservoir prediction, which entails risks in reservoir engineering and field development. In this regard, the implementation of machine learning methods that can automatically identify complex patterns, take into account multi-factor relationships, and adjust to changing conditions becomes relevant, which opens up new opportunities to improve the predicting accuracy and reliability.

This paper discusses modern neural prediction methods, their advantages and disadvantages, as well as practical aspects of applying machine learning to predict sand reservoirs. Particular attention is paid to the selection of input data, creation of neural network architecture, setting up estimation parameters, and interpreting the results.

The study is aimed at demonstrating the high performance of neural network technologies in solving problems of predicting the sand reservoir properties. It is expected that the results of the study will contribute to the optimization of geological exploration and improve the economics of field development.

**Keywords:** *neural network forecasting, hierarchical neural network, self-organizing Kohonen maps*

## Повышение качества трёхмерной геологической модели за счет сейсмического прогноза на основе нейросетевого моделирования

К. А. Сенькина<sup>1</sup>, Д. В. Истомина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «НОВАТЭК НТЦ», Тюмень, Россия

<sup>2</sup> ООО «РН-Геология Исследования Разработка», Тюмень, Россия

Прогнозирование свойств песчаных коллекторов играет ключевую роль в разведке и разработке нефтегазовых месторождений. Традиционные подходы зачастую сталкиваются с ограничениями, связанными с нелинейностью зависимостей, неоднородностью и изменчивостью пород. Эти проблемы приводят к снижению точности прогнозирования коллекторов, что влечёт за собой риски при проектировании и разработке месторождения. В связи с этим актуальным становится внедрение методов машинного обучения, способных автоматически выявлять сложные закономерности, учитывать многофакторные взаимосвязи и адаптироваться к изменяющимся условиям, что открывает новые возможности для повышения точности и надежности прогнозов.

В данной статье рассматриваются современные методы нейронного прогнозирования, их преимущества и недостатки, а также практические аспекты применения машинного обучения для прогнозирования песчаных коллекторов. Особое внимание уделено вопросам выбора входных данных, создания архитектуры нейронной сети, настройки параметров расчёта и интерпретации результатов.

Исследование направлено на демонстрацию эффективности нейросетевых технологий в решении задач прогнозирования характеристик песчаных коллекторов. Ожидается, что результаты работы поспособствуют оптимизации геолого-разведочных работ и повышению экономической эффективности разработки месторождений.

**Ключевые слова:** *нейросетевой прогноз, иерархическая нейронная сеть, самоорганизующиеся карты Кохонена*

### Introduction

The long-term presence of the oil and gas industry in a number of key sectors of the thermal power complex has resulted in a shift away from simple-structured reservoirs to reservoirs with complex spatial morphology and hard-to-recover reserves. Today, the focus is on technologies that simplify the process of supporting the development of such assets, which are becoming more and more common

among the largest Russian companies. One of these in Rosneft is a site in the north of West Siberia, where the target object is PK1-7 reservoirs of the Pokur Series, which show extremely complex geological structure. The upper part of the reservoir is saturated with gas, and a highly-viscous oil zone under the gas cap is currently under development. The layers were formed in a wide range of transitional depositional environments: from continental

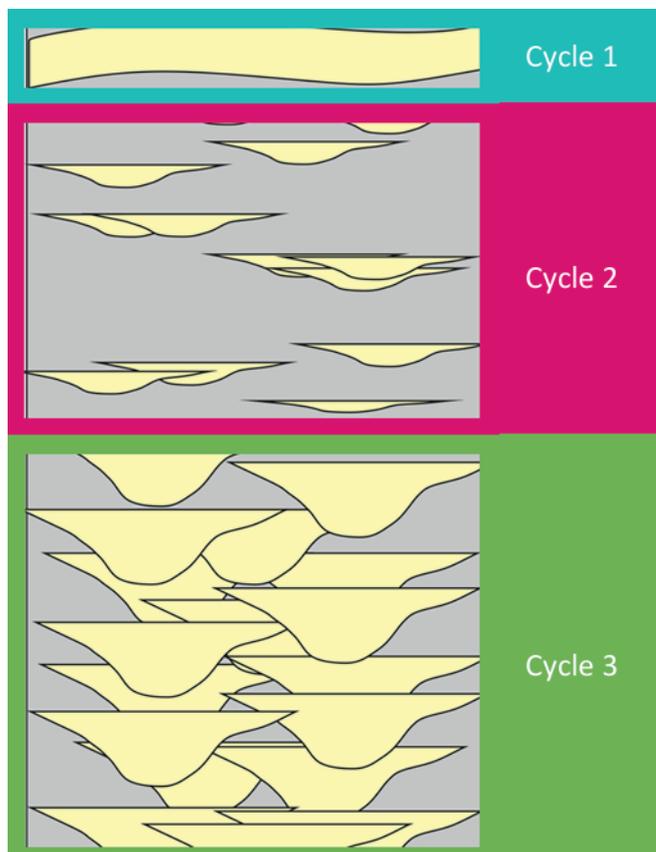
**For citation:** Senkina K. A., Istomina D. V. Refinement of a 3D geological model through neural-simulation-based seismic prediction. Vestnik of Geosciences, 2026, 1(373), pp. 32–41, doi: 10.19110/geov.2026.1.4

**Для цитирования:** Сенькина К. А., Истомина Д. В. Повышение качества трёхмерной геологической модели за счет сейсмического прогноза на основе нейросетевого моделирования // Вестник геонаук. 2026. 1(373). С. 32–41. DOI: 10.19110/geov.2026.1.4



to marine. The layers are represented by interbedded sandy and silty clayey units of varying thickness with high facies heterogeneity. According to the latest sedimentological analysis, three distinct cycles of reservoir formation have been identified (Fig. 1).

A special problem is the development of the second cycle, where a significant discrepancy between the geological model forecast and the actual data is recorded during drilling, which leads to an incorrect assessment of the well potential in this zone. The accuracy of the initial flow rate forecast drops by 30% in the cycle 2. At the same time, it is this cycle that accounts for the majority of the remaining planned well stock, which makes it relevant to improve approaches to building a geological model. A high percentage of model non-confirmation is associated with extreme lateral variability, which is rather difficult to track even with available 3D seismic data. Seismic data, in turn, is distorted by a massive gas reservoir, creating a “shadowing” effect due to a sharp decrease in the density and velocity of elastic waves in gas-saturated rocks. In order to minimize the impact of the above-mentioned compli-



**Fig. 1.** Location of sand bodies by cycles: Cycle 1 — layer PK1, was formed in a marine environment and is the most continuous unit in the field; cycle 2 — layers PK2-PK4, extremely heterogeneous and compartmentalized deposits; cycle 3 — layers PK5-PK8, continental deposits with a high concentration of channels and good reservoir properties

**Рис. 1.** Схема расположения песчаных тел по циклам: цикл 1 — пласт ПК1: формировался в морской обстановке осадконакопления, является самым выдержанным на месторождении; цикл 2 — пласты ПК2-ПК4, отложения с крайней неоднородностью и расчлененностью; цикл 3 — пласты ПК5-ПК8, отложения континентальные, но с высокой концентрацией русел и хорошими фильтрационно-емкостными свойствами

cating factors on seismic data, a new technique based on local detailing of the seismic prediction using a neural network analysis module in the domestic software was tested in this paper.

## Materials and methods

To improve the quality of geological model prediction, a method has been developed that allows a local detailing of the accuracy of seismic predicting based on neural networks.

Work methodology:

1. Select a prediction zone in the area of planned production drilling.
2. Select input data (wells for learning and testing, estimated curves, seismic base).
3. Perform neural network prediction runs.
4. Update the geological model.
5. Optimize production drilling.
6. Repeat the process for every new production well pad.

The advantage of this method is the speed of the geological model history matching (1–2 days).

### Selecting a Prediction Zone

For a detailed seismogeological analysis and improving quality of the forecast, a key area in the northern part of the field was chosen. The selection was based on three criteria:

- 1) The presence of a representative dataset of actual wells, providing a reliable statistical foundation for model building.
- 2) A recorded significant discrepancy between the predictions of the current geological model and the well logging data (high model misfit), indicating an area of substantial uncertainty.
- 3) The presence of Planned development drilling within the area in the near future, enabling prompt verification of the analysis results.

In accordance with these criteria, an area of 19 km<sup>2</sup> was selected, containing 7 pads with actual wells and 22 pads of the development wells planned for drilling. The forecasting was conducted within the oil-saturated interval of PK2-PK5.

### Selecting Input Data

The minimum set of input data required for the prediction includes well data (prediction curve) and a seismic volume. The prediction quality directly depends on the volume and representativeness of the initial sample: the better the prediction parameter is described, the higher the prediction quality.

The study involved data from 91 wells, with 70% used to train the model, which corresponds to generally accepted machine learning standards (70/30 ratio). The net-reservoir/non-reservoir curve was used as a prediction parameter, which is relevant for problems of assessing reservoir properties. The wells for training were selected to be spaced at a sufficient distance from each other to ensure a more comprehensive characterization of the study area. The lithology logs used as input data were not subjected to any prior reprocessing.

Note the geological features of the study area: a complex geological structure due to the transition from con-

tinental to coastal-marine depositional environments; the cross-section is characterized by a high degree of heterogeneity, frequent interbedding of sand reservoirs up to 1 m thick with clay interlayers. That is why the more detailed and accurate the initial prediction volume, the higher the modeling accuracy, especially in complex geological sections.

The following seismic volumes, which were preliminary resampled to a common 1 m discretization, were tested as the seismic basis in the depth domain:

- 1) Amplitude volume.
- 2) Elastic properties volumes: acoustic impedance and  $V_p/V_s$  ratio, i.e. the key parameters for lithological separation based on seismic data (Ampilov et al., 2009).
- 3) Volumetric lithology forecast based on results of deterministic simultaneous inversion.
- 4) Volume of net-reservoir/non-reservoir probabili-

ty based on high-resolution stochastic inversion (Yakovlev et al., 2011).

It should be noted that no additional preprocessing of the seismic volumes is necessary, since the application software inherently accounts for data dimensions.

### Neural Network Prediction

Neural networks are a type of machine learning where the program operates on the principle of the human brain, using various neural connections.

This work considered various options for neural network prediction:

- Multiple linear regression – a statistical method that analyzes the relationship between a dependent variable and several independent variables, allowing for the simultaneous consideration of the influence of multiple factors.

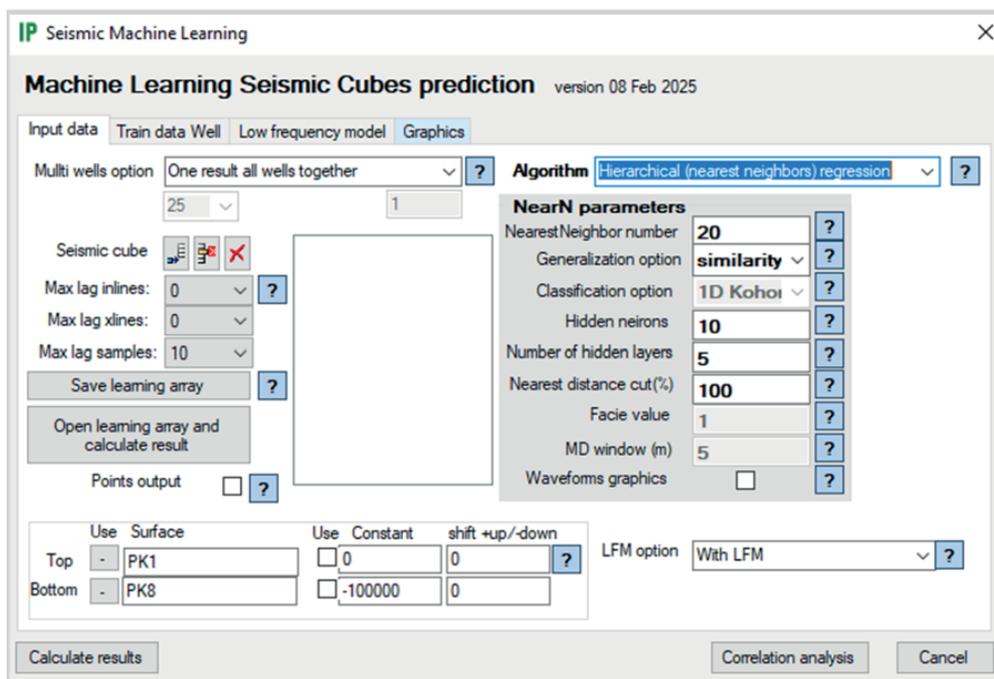


Fig. 2. Parameter selection window in the Hierarchical Neural Network run

Рис. 2. Окно подбора параметров расчёта иерархической нейронной сети

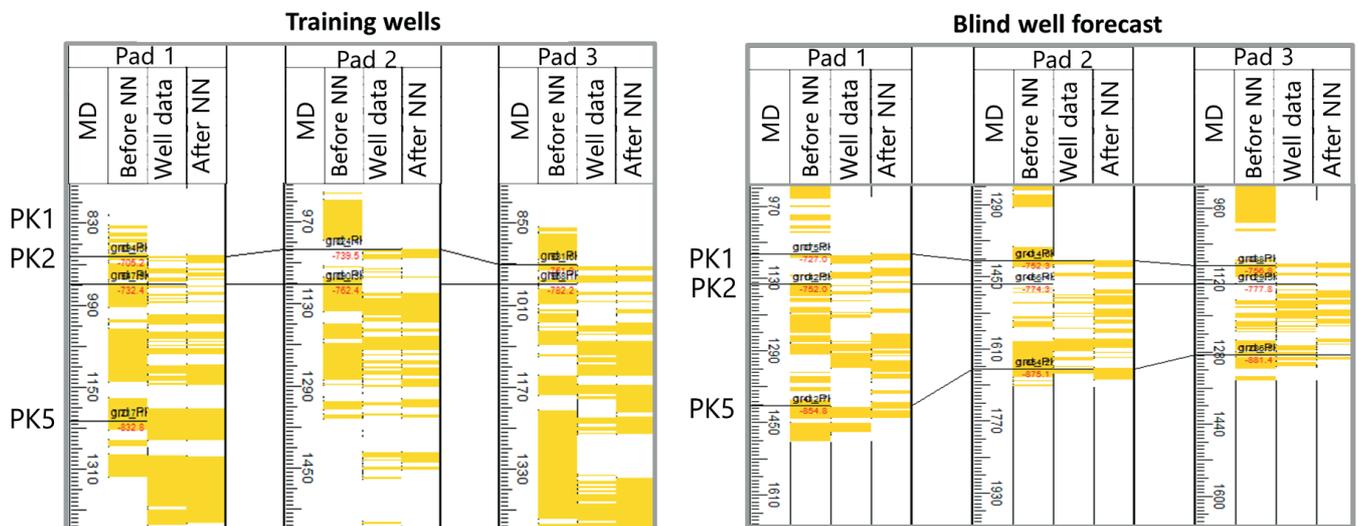


Fig. 3. Net-reservoir/non-reservoir curves in training and "blind" wells

Рис. 3. Кривые «коллектор/неколлектор» в обучающих и «слепых» скважинах



- Classical Neural Networks – nonlinear regression, prediction operator based on a classical neural network with hybrid learning technologies.

- The Kolmogorov neural network. It is not a practical algorithm for training networks, but a fundamental theoretical theorem proven by the Soviet mathematician Andrey Nikolaevich Kolmogorov in 1957. The essence of the theorem is that any continuous function of many variables can be represented with any given accuracy as a superposition (combination) of a finite number of functions of one variable and the addition operation.

- A hierarchical neural network – a deep learning-based extension of the Kohonen self-organizing map (SOM), where clustering is performed using a nearest neighbors similarity measure.

Testing of neural network prediction methods showed that the running time for linear regression and classical neural networks takes about 40 minutes for 63 wells, with no correlation between the “net-reservoir/non-reservoir” curves in “blind” wells and the prediction results. The Kolmogorov Neural Network performed the run in 15-20 minutes, the result showed a poor relationship between the data. The Hierarchical Neural Network took a short time (1-2 minutes) and showed the highest quality prediction with a large number of wells.

Based on the test results, it was decided to use a Hierarchical Neural Network. The basis is the method of analogies. If the seismic field is similar to the field around a well point, then the property values may also be similar.

Let us consider the algorithm in more detail (Priezzhev et al., 2025):

1) Form a training sample

The training sample is formed by creating a set of “seismic response – predictive parameter” pairs in wells. Each pair is formed as follows:

- The predicted parameter is calculated as the average value of the target characteristic within a specified interval along the well deviation. In this study, the discrete property of “reservoir/non-reservoir” along the wells was forecasted. The averaging is performed by selecting the most frequent value among the nearest neighbors, which allows for obtaining the most probable predicted parameter.

- The seismic response is a fragment of the wave field of size  $m \times n$ , where  $m$  is the number of vertical samples and  $n$  is the number of adjacent traces. Parameters  $m$  and  $n$  are set by the user, allowing the analysis to be adjusted to the specific discretization of the seismic base.

2) Build a search cluster decision tree

The clustering process is performed using an unsupervised classification algorithm –Kohonen's Self-Organizing Map (SOM) (Kohonen, 2008) using multidimensional space projection (1D, 2D, 3D). The clustering criterion is a measure of response signature similarity determined by the distance in the multidimensional space. With this approach, two seismic responses will be assigned to the same cluster if their signatures are similar. In a simple case, the distance can be defined as the squared difference between the two responses. The result of the procedure is a cluster decision tree.

3) Perform prediction runs based on a cluster decision tree

Each seismic response is compared with reference samples stored in the nodes of the search cluster decision tree. The comparison process starts from the root node and ends with one of the tree leaves. As a result, the seismic response is assigned a value of the predictive parameter according to the pairs in the training sample.

This approach effectively considers nonlinear functions between seismic attributes and predicted parameter

**Table 1.** Assessment of prediction accuracy before and after neural network training in “blind” wells, %  
**Таблица 1.** Оценка точности прогноза до и после нейросетевого обучения в «слепых» скважинах, %

Seismic volumes Сейсмические кубы	Before training До обучения	After training / После обучения				
	Accuracy Общая точность прогноза	Accuracy Общая точность прогноза	Precision Точность	Recall Полнота	F1-score	ROC-AUC
Amplitude volume Амплитудный куб	The reservoir can't be predicted Коллектор не прогнозируется	52	48	58	53	53
Elastic property volumes (P-impedance, Vp/Vs) Кубы упругих свойств (P-импеданс, Vp/Vs)	The reservoir can't be predicted Коллектор не прогнозируется	51	47	51	49	51
Volumetric lithology prediction from inversion Объёмный прогноз литологии по инверсии	50	57	53	60	56	58
Lithology probability volume from stochastic inversion Куб вероятности литологии по стохастической инверсии	51	61	56	64	59	62

ters which improves interpretation accuracy when addressing complex geological problems.

During testing, all computation modes were tried; the following, presented in Figure 2, were chosen as optimal. Parameter testing showed that with a vertical discretization of 1 m, the number of the nearest neighbors should be around 20. The greater the number of the nearest neighbors, the smoother the prediction volume. With values greater than 30, the layering of the section disappears; with values less than 10, the prediction volume becomes noisy.

The nearest neighbor computation mode has 4 types:

- 1) an average value with weights based on similarity and distance;
- 2) an average value with weights based on similarity only;
- 3) an average value with weights based on distance only;
- 4) a median value.

The similarity and distance mode proved to be more accurate than the others.

The option with the addition of a low-frequency component (LFM, a low frequency model) stabilizes the computation result, since the volume with a low-frequency

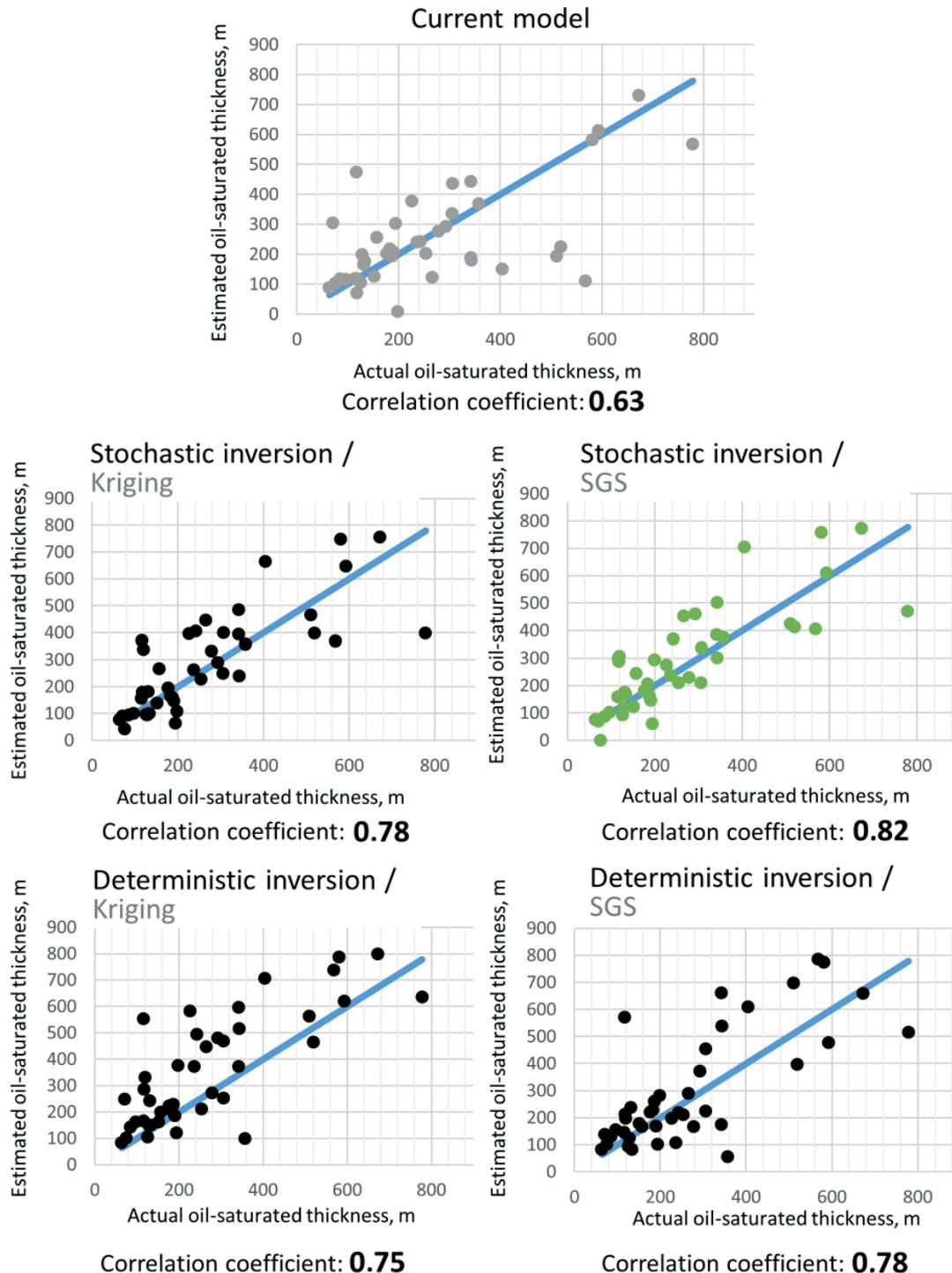


Fig. 4. Comparing estimated net pays (MD) with actual well data from the test sample

Рис. 4. Сопоставление прогнозных эффективных толщин по MD с фактическими по скважинам тестовой выборки



trend, bounded by horizons, is entered into the neural network to consider the low frequencies in the log curve that are absent in the seismic spectrum.

Various options for the seismic base were tested. To evaluate the training results, the average prediction accuracy values in “blind” wells were estimated using the formula:

$$P = \frac{m_{col} + m_{noncol}}{n}, \quad (1)$$

where:  $m_{col}$  is the number of true positive outcomes,  $m_{noncol}$  is the number of true negative outcomes,  $n$  is the total number of outcomes.

The best prediction was shown by the lithology probability volume based on stochastic inversion where the prediction accuracy in “blind” wells increased from 51% to 61%. Table 1 shows how much the prediction accuracy changed before and after neural network training using various seismic bases in “blind” wells. A comprehensive description of the model parameters, the volumes of input data, and the results achieved is available in Appendix 1.

The application of neural prediction improved the prediction accuracy by 7–10% depending on the input data. Given the high geological heterogeneity of the target reservoir, it is expected that the absolute values of classification metrics do not reach levels typical of more homogeneous formations. Nevertheless, the proposed approach demonstrated a statistically significant improvement over both random prediction and the pre-training baseline, particularly when tested using the stochastic inversion cube. For this cube, the model achieved a recall of 0.64 after training, indicating correct identification of approximately two-thirds of all reservoir bodies. The precision-recall trade-off reveals that the model is predominantly optimized to minimize the omission of reservoir intervals — a strategic priority during the field development drilling stage.

Fig. 3 shows the net-reservoir/non-reservoir curves before neural network training (prediction option based on the net-reservoir/non-reservoir probability volume from stochastic inversion), actual data (log-based lithology), and curves after neural network prediction in training and “blind” wells. The log displays clearly show the

**Table 2.** Quality Evaluation of Geological Models

**Таблица 2.** Оценка качества геологических моделей

Model Accuracy Metrics Метрики качества	Current model Действующая модель	Neural network prediction based on stochastic inversion + SGS Нейронный прогноз по стохастической инверсии + СГС	Neural network prediction based on stochastic inversion + Kriging Нейронный прогноз по стохастической инверсии + Кригинг	Neural network prediction based on deterministic inversion + SGS Нейронный прогноз по детерминистической инверсии + СГС	Neural network prediction based on deterministic inversion + Kriging Нейронный прогноз по детерминистической инверсии + кригинг
Correlation coefficient Коэффициент корреляции	0.63	0.82	0.78	0.78	0.75
Root Mean Square Error Средне-квадратичная ошибка	101.4	87.2	98.1	99.2	103.2
Maximum error Максимальная ошибка	437	444	462	472	504

**Table 3.** Comparison of predicted vs. actual total net pay for new and current models

**Таблица 3.** Сопоставление прогнозных суммарных нефтенасыщенных толщин по новой и действующей модели с фактическими данными

Well Скважина	30pl	33pl	35pl	36pl	37pl
Model Модель					
Current model Действующая модель	15.8	4.1	49.9	32.9	26.1
New model Новая модель	24.1	21.2	22.4	25.1	30.8
Well logging data Факт РИГИС	19.2	27.9	24.2	26.2	34.2

predicting performance in both thin-bedded sand reservoirs and in thicker units.

The application of neural prediction using the lithology probability volume from stochastic inversion data showed the best result when compared with well curves. The prediction accuracy was evaluated in "blind" wells both before and after training, with a detailed description provided in Appendix 2.

The resulting net-reservoir/non-reservoir prediction volumes based on volumetric lithology prediction from deterministic inversion and the lithology probability volume from stochastic inversion were handed over for further testing and updating of the geological model.

### Building a Geological Model

To update the geological model, the existing structural framework and two reservoir probability volumes obtained from the described neural network analysis were used. Based on this data, four model options were built: two kriging-based and two Sequential Gaussian Simulation (SGS)-based options. All four options demonstrated an improved accuracy in net reservoir prediction compared to the current geological model. The modeling results are shown in Figure 4.

The best results were achieved using the SGS method based on the neural network prediction from stochastic inversion. The modeling result, presented as a com-

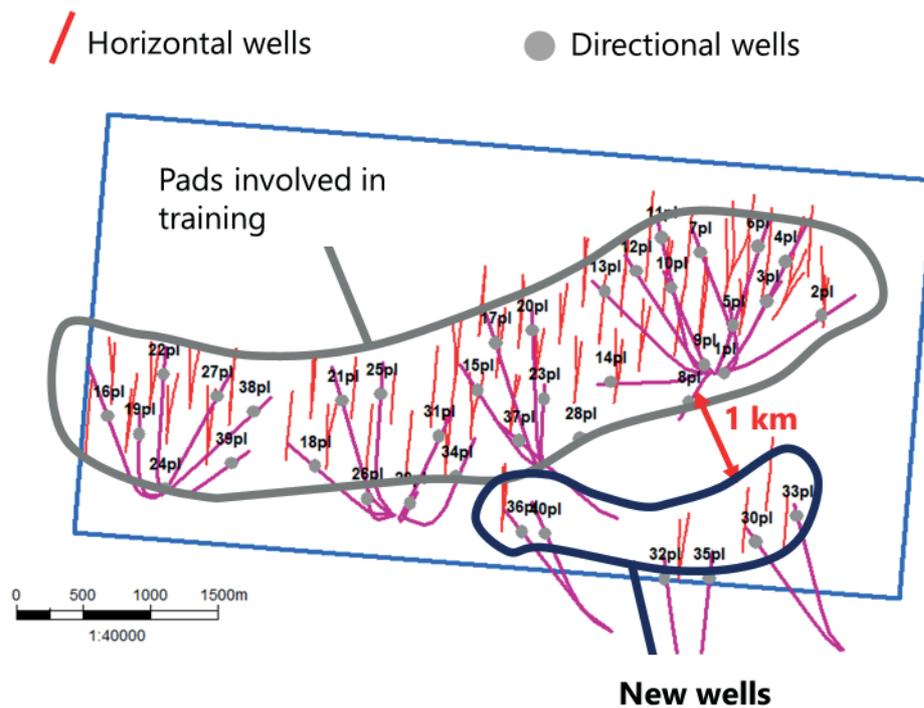


Fig. 5. Map of "blind" well locations

Рис. 5. Карта расположения "слепых" скважин

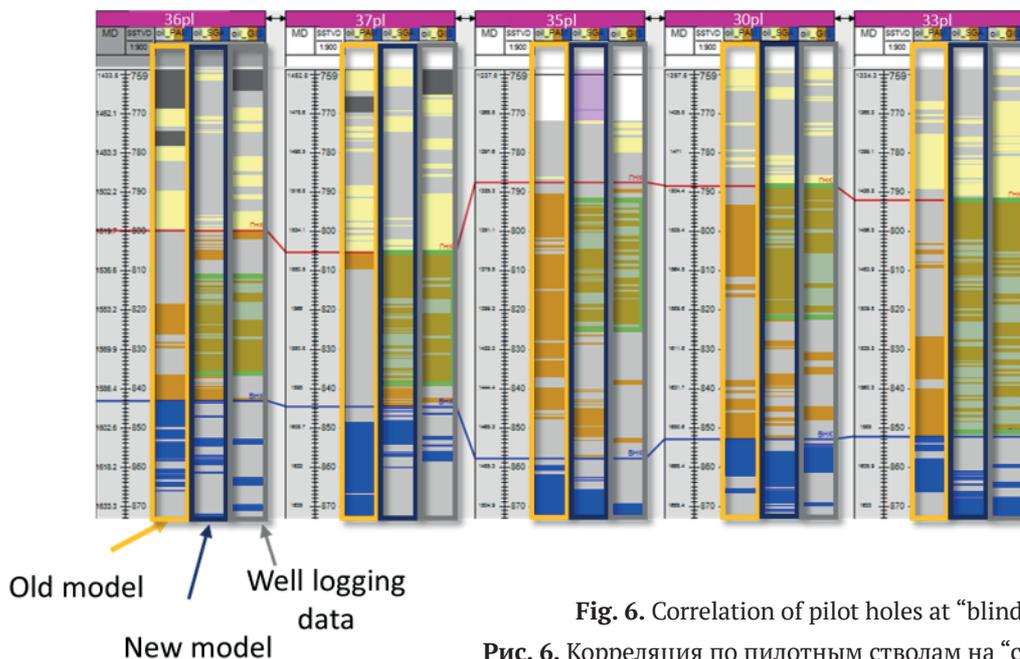


Fig. 6. Correlation of pilot holes at "blind" pads

Рис. 6. Корреляция по пилотным стволам на "слепых" кустах



parison of the estimated net pays and well data for the test well set, is shown in Figure 4.

Table 2 also presents model evaluation metrics, calculated from the estimated net pays (MD) in the test wells, allowing for a comparison with the current model in use.

Despite an increase in the maximum error, the new models show a significant improvement in reproducing the spatial trends of reservoir distribution — the correlation coefficient rose from 0.63 to 0.82 a critical enhancement for geological modeling. This indicates that the model now better reflects the geological heterogeneity of the intervals, though it requires additional calibration in local zones of complex structure.

## Results

To assess the feasibility of the methodology, the correctness of lithology prediction by the geological model was verified in the area of new drilling, located at a significant distance (1 km) from the wells used for neural network training and local model update (Fig. 5). To date, five new vertical wells have been drilled in this area, and the logging interpretation data has been compared with the model prediction runs.

Figure 6 shows the correlation for the new vertical wells (pilots), where:

Left track — lithology in the current model

Middle track — lithology in the new model

Right track — actual lithology from well logging interpretation data.

Also, Table 3 presents a comparison of total oil net pays from the current and new models with actual well logging interpretation data.

The metrics obtained for assessing the quality of the geological model indicate a significant improvement in estimating oil net pays in the studied area, as well as accurate selection of the target interval within the cross-section. This confirms improved predicting capability of the model even in areas remote from drilling zones.

## Summary

The conducted analysis showed that the direct application of the neural network algorithm increased the accuracy of reservoir determination from 0.51 to 0.61.

Although the gain in absolute accuracy may seem modest, the key effect manifested at the next stage. The resulting probability cube of the reservoir was integrated into the geological model. This led to a substantial improvement in the model adequacy: the correlation coefficient between the estimated and actual data increased from 0.63 to 0.82. Thus, despite the modest improvement at the classification stage, the proposed methodology demonstrates significant potential for enhancing the reliability of geological modeling in complex reservoirs. The developed method can be applied to all fields if 3D seismic data and a sufficient volume of actual drilling data is available for training the neural network.

## References / Литература

- Ampilov Yu. P., Barkov A. Yu., Yakovlev I. V., Filippova K. E., Priezzhev I. I.* Almost everything about seismic inversion. Part 1. Seismic exploration technologies. 2009;4:3–16. Russian.  
Ампиров Ю. П., Барков А. Ю., Яковлев И. В., Филиппова К. Е., Приезжев И. И. Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 1 // Технологии сейсморазведки. 2009. № 4. С. 3–16.
- Kohonen T.* Self-organizing maps. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory; 2008. 655 p. Russian.  
Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 655 с.
- Priezzhev I. I., Danko D. A., Onishchenko A. N.* Hierarchical neural networks in problems of predicting the properties of oil and gas reservoirs based on well and seismic data. Geology and Geophysics. 2025;66(1):131–140. Russian.  
Приезжев И. И., Данько Д. А., Онищенко А. Н. Иерархические нейронные сети в задачах прогноза свойств коллекторов нефти и газа по скважинным и сейсмическим данным // Геология и геофизика. 2025. Т. 66, № 1. С. 131–140. DOI: 10.15372/GiG2024141
- Yakovlev I. V., Ampilov Yu. P., Filippova K. E.* Almost everything about seismic inversion. Part 2. Seismic exploration technologies. 2011;1:5–15. Russian.  
Яковлев И. В., Ампиров Ю. П., Филиппова К. Е. Почти все о сейсмической инверсии. Ч. 2 // Технологии сейсморазведки. 2011. № 1. С. 5–15.

Поступила в редакцию / Received 24.10.2025



Appendix to the article by K. A. Senkina, D. V. Istomina “Refinement of a 3D geological model through neural-simulation-based seismic prediction”

Приложения к статье К. А. Сенькиной, Д. В. Истоминой «Повышение качества трёхмерной геологической модели за счет сейсмического прогноза на основе нейросетевого моделирования»

Appendix 1. Information about neural network modeling parameters

Приложение 1. Информация о параметрах нейросетевого моделирования

Neural network Нейросетевое моделирование		Input data Входные данные			Output data — reservoir probability volumes Выходные данные — куб вероятности коллектора					
Model parameters Параметры модели	Value Значение	Well logging data Скважинные данные		Seismic volumes Сейсмические кубы	Accuracy of reservoir prediction before Machine Learning Точность прогноза до обучения (%)	Accuracy of reservoir prediction after Machine Learning Точность прогноза после обучения (%)	False positive results Ложноположительный прогноз (%)	False negative results Ложноотрицательный прогноз (%)		
		Training set size Объем тренировочной выборки	Test set size Объем тестируемой выборки							
Algorithm of Neural network Алгоритм нейросетевого моделирования	Hierarchical regression Иерархическая нейронная сеть	70 % of data (63 wells)	30 % of data (28 wells)	Amplitude volume Амплитудный куб	The reservoir can't be predicted Коллектор не прогнозируется	52	29	19		
Multiwell option Опция использования нескольких скважин	One result all wells together Один результат для всех скважин									
Nearest neighbor number (Seismic Survey) Количество ближайших соседей (Сейсмотрасс)	20					Elastic property volumes (Pimpedance, Vp/Vs) Кубы упругих свойств (Римпеданс, Vp/Vs)	The reservoir can't be predicted Коллектор не прогнозируется	51	26	23
Nearest neighbor calculation mode Режим вычисления ближайших соседей	Similarity and distance weighted average Среднее значение с весами по схожести и по расстоянию									
Hidden neurons Количество нейронов в скрытом слое	10					Volumetric lithology prediction from inversion Объёмный прогноз литологии по инверсии	50	57	24	19
Number of hidden layers Количество скрытых слоёв	5									
Additional options Дополнительные опции	With low-frequency content С низкочастотной составляющей									
Trimming the result cube based on unreliable values Обрезка результативного куба по недостоверным значениям	100 % (minimal trimming) 100 % (минимальная обрезка)					Lithology probability volume from stochastic inversion Куб вероятности литологии по стохастической инверсии	51	61	23	16


**Appendix 2.** Assessment of prediction accuracy using the lithology probability volume from stochastic inversion data in “blind” wells

**Приложение 2.** Оценка точности прогноза с использованием куба вероятности литологии по данным стохастической инверсии в «слепых» скважинах

Pad Куст	Well Скважина	Stochastic Inversion (before ML) / Стохастическая инверсия (до обучения)			Neural Prediction (after ML) / Нейронный прогноз (после обучения)		
		Prediction accuracy Точность прогноза (%)	False positive results Ложнополо- жительные значения (%)	False negative results Ложноотрица- тельные значения (%)	Prediction accuracy Точность прогноза (%)	False positive results Ложнополо- жительные значения (%)	False negative results Ложноотрица- тельные значения (%)
1	1	49	7	44	65	24	11
	2	58	14	27	67	15	18
	3	45	28	27	48	19	33
	4	50	31	19	56	24	20
2	5	46	37	17	59	23	18
	6	62	23	15	61	17	22
	7	87	11	2	67	7	25
	8	44	33	23	62	14	23
	9	48	25	28	50	25	26
3	10	62	14	23	55	38	7
	11	53	28	19	84	5	11
	12	55	24	21	64	25	12
	13	31	38	31	52	24	23
	14	31	69	1	79	8	13
	15	31	58	11	54	43	2
4	16	70	17	12	58	31	11
	17	46	54	0	81	19	0
	18	55	24	21	65	15	20
	19	58	24	18	75	16	9
	20	60	13	27	57	23	20
	21	46	26	29	55	32	14
	22	60	13	27	56	37	8
	23	49	39	11	53	24	23
	24	46	34	21	66	12	22
	25	61	13	26	67	18	15
	26	41	18	41	48	42	9
	27	37	25	38	48	19	33
	28	53	23	25	64	13	23
Average		51	27	22	61	22	17



## Из архива профессора Д. П. Григорьева: письма академиков Н. В. Белова и А. В. Шубникова

Ю. Л. Войтеховский

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

Статья продолжает публикацию писем и фото выдающихся российских геологов, минералогов и кристаллографов из личного архива профессора Д. П. Григорьева, хранящегося в Российском минералогическом обществе, в данном случае — от академиков Н. В. Белова и А. В. Шубникова, лидеров отечественной кристаллохимии и кристаллографии. Из писем становятся понятными побудительные мотивы и обстоятельства тех или иных событий, вписанных в историю науки или оставшихся биографическими эпизодами. Актуальность статьи состоит в необходимости отстаивания приоритетов российской науки. Цель — максимально полное освещение ее истории на основе документов. Архив Д. П. Григорьева в письмах, фото и других документах отражает несколько десятилетий довоенной и послевоенной истории российской минералогии и кристаллографии. Статья адресована профессиональным историкам науки и широкому кругу ее любителей: сотрудникам Российской академии наук, преподавателям университетов, аспирантам и студентам.

**Ключевые слова:** Д. П. Григорьев, Н. В. Белов, А. В. Шубников, личные архивы, история науки, минералогия, кристаллохимия, кристаллография

## From Professor D. P. Grigoriev's archive: letters from Academicians N. V. Belov and A. V. Shubnikov

Yu. L. Voytekhovsky

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

The article continues the publication of letters and photos of prominent Russian geologists, mineralogists, and crystallographers from the personal Professor D. P. Grigoriev's archive, kept at the Russian Mineralogical Society, in this case from Academicians N. V. Belov and A. V. Shubnikov, leaders of Russian crystal chemistry and crystallography. The letters and photos clarify motivations and circumstances of certain events recorded in the history of science or remaining as biographical episodes. The relevance of the article lies in the need to defend the priorities of Russian science. The goal of the work is to provide the most comprehensive coverage of its history based on documents. D. P. Grigoriev's archive of letters, photos, and other documents reflects several decades of the pre-war and post-war history of Russian mineralogy and crystallography. This article is intended for professional historians of science and a wide range of science enthusiasts, including members of the Russian Academy of Sciences, university professors, postgraduate students, and undergraduates.

**Keywords:** D. P. Grigoriev, N. V. Belov, A. V. Shubnikov, personal archives, history of science, mineralogy, crystal chemistry, crystallography

### Введение

Об истории и содержании архива профессора Д. П. Григорьева не раз упоминалось в предыдущих статьях данной серии, доступных на сайте «Вестника геонаук». На этот раз мы публикуем письма и фото академиков Н. В. Белова (1891–1982) и А. В. Шубникова (1887–1970), тщательно собранные нами воедино из разрозненных папок архива. Этих лидеров отечественной кристаллохимии и кристаллографии представлять читателю журнала не нужно. Жизненные пути обоих подробно описаны на официальном сайте Института кристаллографии РАН, который они и создали. Оба — крупные теоретики. Но это про них ска-

зано, что «нет ничего практичнее хорошей теории». Успехи отечественной кристаллофизики это доказали. Из огромных списков публикаций на ум в первую очередь приходят исследования Белова (1947), Белова и др. (1955), Белова, Тарховой (1956); Шубникова (1940б, 1951), Шубникова, Копчика (1972). Впрочем, это зависит от личных пристрастий, диапазон их работ очень широк.

Писем немного, но и они дороги нам ввиду роли обоих ученых в истории науки. Они не только объясняют нюансы событий, но и характеризуют наших героев в сугубо человеческом измерении. Письма написаны в основном от руки, трудными почерками и рас-

**Для цитирования:** Войтеховский Ю. Л. Из архива профессора Д. П. Григорьева: письма академиков Н. В. Белова и А. В. Шубникова // Вестник геонаук. 2026. 1(373). С. 42–51. DOI: 10.19110/geov.2026.1.5

**For citation:** Voytekhovsky Yu. L. From Professor D. P. Grigoriev's archive: letters from Academicians N. V. Belov and A. V. Shubnikov. Vestnik of Geosciences, 2026, 1(373), pp. 42–51, doi: 10.19110/geov.2026.1.5



шифрованы автором статьи. Упомянутые публикации проверены по библиографическим указателям и даны в квадратных скобках. Правописание везде сохранено. Письма даны в хронологическом порядке, почти все датированы отправителями. Кроме того, в верхнем правом углу писем Д. П. Григорьев обычно указывал даты получения и ответа, если таковой был. Иногда они совпадают, и это показывает, как высоко он ценил эту профессиональную (на почве систематической и экспериментальной минералогии) и личную (особенно с Н. В. Беловым, начинавшим научную карьеру в Горном институте) дружбу. Воспоминания кольского минералога И. В. Буссен о Н. В. Белове вышли ранее (Войтеховский, 2024). Из немалого собрания фото публикуются только редкие, не размноженные в общедоступных изданиях и Интернете (рис. 2, 3, 5, 6).

### Письма А. В. Шубникова

19.XII.1957–23.XII.1957

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович,

благодарю Вас за то, что Вы обратили мое внимание на Вашу интересную статью о натечных минералах, в которой Вы справедливо восстаете против пространного мнения о коллоидной их природе [Григорьев, 1953, 1956]. Сказать откровенно, у меня лично никогда не возникало никаких сомнений в том, что по крайней мере те сферолиты, которыми мне приходилось специально интересоваться, имеют кристаллическую природу.

В Вашей работе Вы ссылаетесь на некоторые статьи по геометрическому отбору. Возможно, что для Вас представляют интерес еще две относящиеся к этому предмету работы (со ссылками на предшественников): 1) «О принципе отбора Гросс — Мёллера» (Тр. Лаб. крист. АН СССР, 1940, вып. 2) [Шубников, 1940a] и 2) «О законе геометрического отбора при образовании кристаллического агрегата» (ДАН, 1946, 51, № 9) [Шубников, 1946]. В первой из этих работ закон геометрического отбора прилагается к кристаллическим индивидам любой формы, в частности и к сферолитам. Во второй статье (последняя фраза) указывается, что в «борьбе за существование» между одновременно растущими кристаллами существенную роль играет не только принцип Гросс — Мёллера, но и закон расщепления кристаллов. Очень рад, что наши интересы к вопросам образования сферолитов совпали.

С дружеским приветом (подпись) А. Шубников  
12 декабря 1957 г.

Адрес: Москва, В-17, Пыжевский пер., д. 3. Институт кристаллографии АН СССР.

Академия наук СССР  
Институт кристаллографии

№ 103 31 декабря 1957 г.

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович,

Институт кристаллографии направляет Вам записку по проблеме «Образование кристаллов». В связи с разработкой перспективного народно-хозяйственного плана на 1958–1965 гг. записка должна подвергнуться в ближайшее время доработке. Она должна содержать план основных работ по проблеме на 1958–1965 гг., план координации этих работ и план подготовки кадров по проблеме. Поэтому в настоящем виде

записка является предварительным материалом, и мы обращаемся к Вам с просьбой прислать к ней дополнения и замечания, адресуя их в Институт кристаллографии Научному совету по проблеме «Образование кристаллов». Мы хотели бы получить предложения и замечания от широкого круга специалистов различных областей науки и техники, связанных с проблемой, в частности по полупроводниковым и металлическим монокристаллам, которые почти не затронуты в записке, чтобы при составлении окончательного варианта записки можно было учесть возможно полное их мнения и интересы.

Мы просим также внести предложения о составе Научного совета по проблеме и о его структуре (при нем возможно создание некоторых комиссий). Замечания и материалы просим прислать к 18 января, чтобы их можно было использовать при обсуждении этих вопросов на Первой сессии Научного совета по проблеме. Просим также для пополнения существующей весьма недостаточной информации о работах по росту кристаллов в Советском Союзе сообщить, в каком направлении Вами ведутся работы по проблеме, фамилии и инициалы руководителей работы и число занятых в исследованиях работников.

Председатель Научного совета по проблеме, академик А. В. Шубников

Член совета, д. г.-м. н. (подпись) Н. Н. Шефталъ

На обороте письма — черновик ответа, написанный от руки с исправлениями и вставками.

Институт кристаллографии Академии наук СССР, Научному совету по проблеме «Образование кристаллов».

Проблема образования кристаллов, несомненно, является одной из центральных в науке. Составленная записка «Образование кристаллов» и приложенный к ней перспективный план научно-исследовательских работ представляются важными научными документами. У меня возникают следующие замечания.

1. Следовало бы обратить большее внимание на кристаллические агрегаты (помимо пьезоэлектрических текстур), поскольку основная часть веществ составляет именно агрегатами кристаллов. А кристаллография, как мне кажется, должна заниматься не только отдельными кристаллами, но и их сростками.

2. В число вопросов для исследования помимо зарождения и роста кристаллов необходимо включить вопросы последующего формирования особенностей кристаллов при их «работе» в различных приборах, материалах и проч. как особого этапа их генетической истории.

3. В проблематике совершенно упущен раздел «Образование кристаллов (т. е. минералов) в природе».

Как известно, природные кристаллы до сих пор имеют крупнейшее промышленное значение (пьезокварц, исландский шпат, флюорит, слюды, драгоценные камни и др.), и наука о кристаллах должна уделять их генезису значительное внимание. Вместе с тем природные кристаллы все еще находят применение в физике для изучения различных явлений. Известно, что на кварце, кальците и кристаллах других минералов были открыты главные законы кристаллографии.



Рис. 1. Кристалл кварца в 70 т., длина 7.5 м, ширина 1.6 м. Гранитный массив Акджайляу, Восточный Казахстан. 1959 г. [Подписи рукой Д. П. Григорьева — Ю. В.]

Fig. 1. Quartz crystal of 70 tons, 7.5 m long, 1.6 m wide. Akdzhai-lau granite massif, East Kazakhstan. 1959. [Handwritten by D. P. Grigoriev. — Yu. V.]

Исследование природных кристаллов помогает познавать особые условия кристаллогенезиса — геологически длительные, в огромных пространствах (вес кристаллов до 100 тонн!) (рис. 1), при особых условиях питания (посредством диффузии в твердой среде) и проч., которые представляют большой интерес и с общетеоретической точки зрения. Наконец, из минералогии вышел ряд способов искусственного выращивания кристаллов, принятых в кристаллографии. Все это заставляет поднимать вопрос об изучении в кристаллографии в какой-то мере и природного кристаллообразования.

4. На кафедре минералогии Ленинградского горного института в течение последних 10 лет была поставлена в общем виде проблема развития учения о генезисе природных кристаллов и их агрегатов как особого раздела генетической минералогии — онтогении минералов — и выполнен ряд исследований, продолжающих и развивающих известные исследования Г. Г. Леммлейна, И. И. Шафрановского, Г. Кальба, В. Маухера и др.

7 января 1958 г.

Проф. Д. П. Григорьев

К документу приколота записка.

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович, возвращаю Вам оригинал Вашего письма. Копия нами снята. 15/I — 58 г. (подпись) Н. Н. Шефталъ

12.IX.1958—14.IX.1958

Дорогой Дмитрий Павлович!

Начинаю прямо с дела. Согласились бы Вы возглавить лабораторию гидротермального синтеза у нас в

институте? Спрашиваю Вас об этом по поручению А. В. Шубникова, однако он же просил заметить, что пока этот разговор ни к чему не обязывает. Пожалуйста, срочно ответьте мне, как Вы смотрите на это. Еще один практический вопрос. В случае переезда в Москву сможете Вы свою квартиру сдать Академии или Вы обязаны сдать ее Горному институту? Это не имеет решающего значения, но надо мне знать на всякий случай, если возникнут на эту тему разговоры. Что касается меня, то я очень хотел бы, чтоб Вы стали завом нашей лаборатории, ибо я думаю, что вряд ли можно себе представить человека, с которым у меня в работе по синтезу был бы более общий язык, чем с Вами. Ясно, что всякий физик тут совершенно нежелателен.

Лаборатория довольно интересная. Идут работы по синтезу карбонатов, кварца, сульфидов. Из нее вполне можно сделать интереснейшую лабораторию экспериментальной минералогии. Для этого надо, чтоб у всех был общий язык — язык минералогов, а не технических физиков. Кстати, у нас работает Штернберг, который, как и мы с Вами, из геолого-минералогических сфер. Как экспериментатор он достаточно хорошо известен. Ответьте мне побыстрее, Д. П.! Передайте привет всем Вашим домашним. Н. Ю.

Пишите мне домой. Адрес на конверте.

Д. П. Григорьев ответил на письмо через два дня и в Москву не поехал, «завом» стал А. А. Штернберг (Аншелес, 2004, с. 35). Но кто этот Н. Ю., автор столь интересного письма? Не в первый раз сожалеем о том, что Д. П. Григорьев редко хранил конверты.

В связи с фотографией (рис. 3, вверху слева) обратим внимание на публикацию (Шубников, 1938), очень популярную среди минералогов-кварцевиков. А трест № 13 сыграл большую роль в обеспечении электротехнической промышленности СССР пьезосыррьем накануне, в годы и после войны.

8.V.1959

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович,  
Посылаю Вам фотографии. Очень извиняюсь за задержку.

Ваш (подпись).

Этот конверт сохранился. Судя по почтовому штемпелю, письмо получено 10 мая 1959 г. в Горном институте. В нем — 4 фото без пояснений. На них — разнообразные интерференционные картины, одна (рис. 4, внизу справа) очень напоминает расщепленный рост целого ряда минералов (десмин, халцедон...) (Григорьев, 1961, с. 106–108).

Глубокоуважаемый и дорогой Дмитрий Павлович,  
Разрешите мне выразить Вам мою глубокую признательность за теплые слова приветия и добрые пожелания в связи с моим 75-летием.

19 мая 1962 г. (подпись) А. В. Шубников

12.IV.1963

Глубокоуважаемый товарищ Григорьев,  
Академик А. В. Шубников проживает теперь по адресу: Москва В-312, 1-я Черемушкинская, 3 (ДНР-3), кв. 7.

8.IV. Н. Шубникова



**Рис. 2.** Вверху слева: А. В. Шубников. Вверху справа: молодой профессор А. В. Шубников занят столярным делом, оборудует лабораторию в Свердловске, 1920 г. Внизу слева: заседание кафедры кристаллографии, минералогии и геологии Свердловского горного института, слева направо: Н. И. Бальков, О. М. Шубникова, студент-химик, А. В. Шубников, М. Н. Букина, Ф. И. Кандыкин, Ф. И. Рукавишников, К. К. Матвеев, 1923 г., получено от И. И. Шафрановского 7.X.1965. Внизу справа: А. В. Шубников. Подписи рукой Д. П. Григорьева

**Fig. 2.** Top left: A. V. Shubnikov. Top right: young Professor A. V. Shubnikov is engaged in carpentry, equipping a laboratory in Sverdlovsk, 1920. Bottom left: meeting of the Department of crystallography, mineralogy, and geology at the Sverdlovsk Mining Institute, from left to right: N. I. Balykov, O. M. Shubnikova, a chemistry student, A. V. Shubnikov, M. N. Bukina, F. I. Kandykin, F. I. Rukavishnikov, K. K. Matveyev, 1923, received from I. I. Shafranovsky on 7.10.1965. Bottom right: A. V. Shubnikov. Handwritten by D. P. Grigoriev

### Письма Н. В. Белова

8.II.1956–9.II.1956

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович, я смутил сердца истинных минералогов своим ксонотлитом. В волластоните ксонотлитовые цепочки под действием температуры разорвались, и я, согласно обещанию и разговорам с Вами, шлю Вам статью, которую мы направили в «Доклады» с просьбой спешно ее поместить ввиду немецкой конкуренции. К сожалению, большая с доказательствами статья еще не готова и, очевидно, ее невозможно будет иметь для № 2 «ЗМО». Стоит ли ее откладывать до № 3? Сообщите Ваше мнение, если не затруднит. По-видимому, к тому времени удастся закончить пектолит, который, с одной стороны, похож на волластонит по геометрии, но по формуле, с другой — близок к ксонотлиту. Во избежание недоразумений еще раз повторяю, что статью Вам посылаю «для сведения», представлена же она в «Доклады» [Белов, Мамедов, 1955, 1956; Мамедов, Белов, 1956].

Это было написано несколько дней назад, далее от Г. Г. Леммлейна я узнал, что <он> ожидает Ваш приезд в Москву, и в связи с этим я задержал письмо для личной Вам передачи. Вчера Г. Г. мне позвонил, что далее аэродрома Вы в Москве не будете, и поэтому посылаю Вам письмо в согласии с первой фразой этого письма.

Одновременно делюсь с Вами моими сомнениями. Два дня назад мне было сообщено мнение одного Вам хорошо известного минералога о том, что предмет занятий Н. В. Белова совершенно не пристал минералогу, а именно поиски расположения атомов и т. д. Утешьте меня и скажите, что минералоги также делятся на культурных и некультурных и что первых это все-таки интересует. Иначе придется и мне вслед за А. В. Шубниковым объявить себя физиком, на что я имею некоторое право.

6 февраля 1956. С глубоким уважением (подпись)

Москва, 27 августа 1957

31.VIII.1957–8.IX.1957

Многоуважаемый и дорогой Дмитрий Павлович, довожу до Вашего сведения (а также, очевидно, и Совета м<инералогического> о<бщества>) следующее. Во время Канадского кристаллографического конгресса (июль с. г.), на котором присутствовало большое число минералогов, состоялось (одно) заседание инициативной группы по организации Международной ассоциации минералогических обществ.

Главную роль в этой инициативной группе играл хорошо известный американский кристаллограф проф. М. J. Vuerger (МТИ, Массачусетский технологический институт, американский Кэмбридж у Бостона), который просил меня присутствовать там в качестве пред-



**Рис. 3.** Вверху слева: курсы браковщиков кварца треста № 13, слева направо сидят Н. А. Иванов, Е. В. Цинзерлинг, А. В. Шубников, В. Н. Чернова, Г. Г. Леммлейн; стоят О. Ф. Александрова, С. А. Покровский, Н. Гнедюк, Р. А. Найок, А. Н. Иванова, Г. С. Богданова, В. А. Мининберг, Ф. Т. Строхаль. Вверху справа: заведующий лабораторией поисковых исследований Института кристаллографии АН СССР А. В. Шубников в кристаллизационной комнате с сотрудниками Щагиной и Рябкиным, 1968 г. Внизу слева: стоят Г. Г. Леммлейн и А. В. Шубников, сидят G. Tunezz с женой, 1933 г. Внизу справа: Л. Дж. Спенсер и А. В. Шубников в саду Британского музея естественной истории, Лондон, 6.VIII.1946, снимок Г. Ф. Кларингбулла. Подписи рукой Д. П. Григорьева

**Fig. 3.** Top left: Quartz culling courses at Trust No. 13, from left to right: sitting N. A. Ivanov, E. V. Tsinerling, A. V. Shubnikov, V. N. Chernova, G. G. Lemmleyn; standing O. F. Aleksandrova, S. A. Pokrovsky, N. Gnediyuk, R. A. Nayok, A. N. Ivanova, G. S. Bogdanova, V. A. Mininberg, and F. T. Strokhal. Top right: Head of the Laboratory of perspective research at the Institute of crystallography of the USSR Academy of Sciences A. V. Shubnikov in the crystallization room with his colleagues Schagina and Ryabkin, 1968. Bottom left: standing G. G. Lemmleyn and A. V. Shubnikov, sitting G. Tunezz and his wife, 1933. Bottom right: L. J. Spencer and A. V. Shubnikov in the garden of the British museum of natural history, London, 6.8.1946, photo by G. F. Claringbull. Handwritten by D. P. Grigoriev

ставителя СССР. Другой член М<инералогического> о<бщества> Г. Б. Бокий был в это время занят. Каждому Мин<ералогическому> об<ществ>у был предоставлен один голос.

Было принято решение о желательности создания узкой Ассоциации и постановлено собрать первый (учредительный) съезд весной 1958 года в Мадриде, поскольку сейчас испанское правительство широко открывает двери для международных конференций. Было выбрано временное правление — Исполнительный комитет во главе с англичанином G. F. Claringbull-ом, вице-президентом американцем M. J. Buerger-ом, секретарем-казначеем испанцем J. L. Amoros-ом. В число шести членов Исполкома я выдвинул Вас, что и было принято единогласно, о чем я довожу до Вашего сведения, если об этом Вас еще не уведомили. Сообщаю адреса указанных мною членов президиума Ассоциации.

Claringbull (Gordon Frank). Keeper of Mineralogy, Mineral. Dept. British Museum. Cromwell Rd, London, S. W. 7, England.

Buerger (Martin Julian). Prof. Mineralogy and Crystallography, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge 39, Massachusetts, USA.

Amoros (Jose Luis). Prof. Mineralogy and Crystallography, Universidad de Madrid, Catedra de Cristalografia,

Museo de Ciencias Naturales. Castellana 84, Madrid, Espana.

Вряд ли Вам потребуются еще какие-либо сведения от меня. Если понадобятся, то готов к Вашим услугам. (подпись)

Об участии Д. П. Григорьева в учредительном съезде Международной минералогической ассоциации мы писали ранее (Войтеховский, 2019). Там же дан список статей Д. П. Григорьева, освещающих это событие.

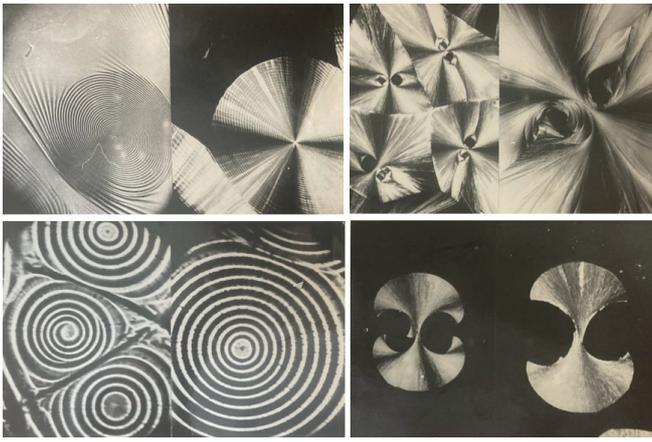
Иркутск 16.9.57.

23.IX.57–24.IX.57

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович!

Вами высланные фотографии в Иркутск я получил и за это весьма Вам благодарен. Это будет для меня хорошей памятью о встречах, которые я имел в эту осень в Ленинграде.

Дмитрий Павлович! Мною написана небольшая заметка о натриевом санидине, который мною впервые был найден в основных щелочных лавах Селенгинской Даурии. Подобные образования из С<редней> Азии были недавно описаны В. И. Влодавцом из лав Дариганской вулканической области [Влодавец, Шаврова, 1953]. Но эти щелочные полевые шпаты были почему-то названы анортоклазами, хотя они и име-



**Рис. 4.** Интерференционные картины из письма А. В. Шубникова от 8.V.1959. Без пояснений Д. П. Григорьева  
**Fig. 4.** Interference patterns from A. V. Shubnikov's letter dated 8.5.1959. Without explanations by D. P. Grigoriev

ют, по оптическим данным, моноклинную сингонию. Я склонен их называть натриевыми санидинами. В будущем, я думаю, будет найден полный изоморфный ряд между калиевым и натриевым компонентами, и иные названия здесь только вносят путаницу. В вопросах номенклатуры щелочных полевых шпатов я придерживаюсь работы Офтедаля (1952, русск. пер.). Если моя заметка о натриевом санидине Селенгинской Даурии заслуживает внимания, я просил бы Вас представить ее к публикации в *Записках* минералогического общества.

Уважающий Вас (подпись).

Иркутск, ул. Богдана Хмельницкого, дом 1, кв. 33, Белову Н. В.

3.X.57–10.X.57

Дорогой Дмитрий Павлович,

значительную часть сентября я был в отпуску в Крыму и потому не сразу прореагировал на Ваше письмо от 8/IX. Рад, что Вы положительно отнеслись к Вашему избранию во временный Исполком (Оргбюро) Международной ассоциации минералогических обществ, основной задачей которого пока явится созыв первого — учредительного — конгресса в Мадриде весной 1958 года. Продуктом этого конгресса будет уже настоящий Исполком, членом которого от СССР, смею думать, будете также Вы. Предложений было много, из всяких соображений кандидатура нашего москвича Г. П. Барсанова успеха не имела. Г. П., в отличие от Вас, оказался неизвестен зарубежным минералагам.

Довожу до Вашего сведения — в надежде, что это Вам будет интересно, — содержание письма на мое имя от 21/IX из Лейпцигского издательства Akademische Verlagsgesellschaft. Они рассчитывают, что долгожданное (мною, по крайней мере) 3-е издание «Минералогических таблиц» Штрунца (во 2-й корректуре которого я принял деятельное участие еще в ноябре 1955 г.) выйдет в свет в текущем октябре. Обещая мне сразу выслать gratis экземпляр, они также сообщают, что принимают на «Таблицы» предварительные заказы либо непосредственно в издательство Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig K.-G., Leipzig C1, Sternwartenstrasse 8, либо через Deutsche Buch Export und Import GmbH Leipzig. Они просят так-

же меня написать рецензию в «ЗВМО». Ну это будет видно.

Теперь орашаюсь к более частному вопросу. Мы давно ищем монокристалл дюмортьерита. Как Вам должно быть известно, наши требования крайне скромны: нужен монокристалл, пусть даже совсем без граней, размером около 0.5 мм вдоль одного направления, 0.1–0.2 вдоль других. Больше 2 мм даже желательно, меньше 0.1 невозможно.

В. С. Соболев в свое время адресовал нас к Н. И. Наконнику, что мы сделали лишь в последнее время. Н. И. Наконник сообщил мне, что вряд ли его кристаллы нас удовлетворили бы и что он сам в качестве стандарта пользовался образцами дюмортьерита из Северной Америки, находящимися в Горном музее и якобы хорошо Вам известными. Если это так, то не могли бы Вы способствовать в получении для нас нескольких образчиков с указанными крохотными размерами, но монокристаллических! Был бы весьма благодарен за возможную иную информацию по этому вопросу.

1 октября 1957 Ваш (подпись).

24.X.57

Дорогой Дмитрий Павлович,

благодарю Вас за скорый ответ с вложением. Мы образец запустили сегодня же после получения, но сегодня же я уезжаю в Горький до конца недели, и поэтому никаких результатов не имею еще. Третьего дня через Э. Н. Елисеева я послал Вам протокол того «учредительного заседания», о котором я имел честь довести до Вашего сведения. Надеюсь, Вы его получили. Я получил их 5 экземпляров для дальнейшего распространения, но пока, кроме Вас, никому не посылал.

Не знаю, есть ли там адрес А. Пабста (Беркли, Калифорния), от имени которого эти копии протокола идут. Он не послал непосредственно Вам, не зная точного Вашего адреса, и спрашивал меня о нем. Следует ли это сделать мне лично, чтобы он затем до некоторой степени официально написал Вам, или Вы заведете с ним связь непосредственно? Если в таком случае Вам понадобится его не имеющийся у Вас адрес, то я немедленно Вам сообщу.

Простите за несколько несуразное письмо человека, торопящегося к поезду.

Ваш (подпись). Verte! [Переверни лист (лат.)]

С. Китайцы только что расшифровали один из многих оставшихся неопределенных силикатов — пренит. Эта структура у меня, и пока отсутствуют требующиеся доказательства. Не могу не констатировать, что она несколько странна, но в то же время все расстояния в ней правильны. Самый большой порок — это наличие центра симметрии, который до сих пор считался в прените отсутствующим. Если Вас она интересует, постараюсь — после извещения о такой необходимости — послать Вам копию своего о ней реферата для Львовского минералогического сборника № 12.

11.XII.1957–11.XII.1957

Дорогой Дмитрий Павлович,

две недели собираюсь написать Вам по поводу Вашей юбилейной статьи, которую Вы мне прислали и которая «на порядок» выше всех других из того же номера «ЗМО». Надеюсь, что суждение мое не связано с неоднократным упоминанием моего имени, тем

не менее у меня имеется ряд замечаний, которые я надеюсь ввиду их интимности высказать Вам лично при встрече в Ленинграде, куда я собираюсь в ближайшее время.

Я польщен Вашим предложением, вряд ли мне следует возглавлять делегацию, но совершенно верно замечание о, быть может, кристаллохимическом-кристаллоструктурном уклоне некоторых зарубежных минералогов. В особенности это относится к Пабсту, Бюргеру (Бергеру) и — что меня поразило — к Фронделю, который, возглавляя почтеннейшую гарвардскую кафедру, пришел туда из бюргеровских ассистентов и сам читает лекции только по кристаллохимии (я был двое суток его гостем с утра до позднего вечера). Если я стану участником Вашей делегации, то могу быть поле-

зен некоторым опытом, знанием языков и опытом по Испании, в частности «дружбой» с Аморосом, разжившим 35-летним испанцем.

На условиях неразглашения сообщаю, что 2 ноября с. г. на приеме в А<кадемии> н<аук> в честь зарубежных гостей В. А. Николаев после совместного со мной распития спиритизов выразил мне неудовольствие, что мною в Канаде было названо в Оргкомитет не его имя. Мои возражения о неминералогической его сущности отводились им с президентской точки зрения<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> В. А. Николаев — чл.-корр. АН СССР (1946), президент ВМО (1952–1960)



Рис. 5. Слева — Н. В. Белов, 1947. Справа — сидят: Е. Н. Белова (дочь), Н. В. Белов, Л. М. Беляев; стоят: В. П. Бутузов, (?). Институт кристаллографии АН СССР, 1950 г. Подписи рукой Д. П. Григорьева

Fig. 5. Left — N. V. Belov, 1947. Right — sitting: E. N. Belova (daughter), N. V. Belov, L. M. Belyaev; standing: V. P. Butuzov, (?). Institute of Crystallography of the USSR Academy of Sciences, 1950. Handwritten by D. P. Grigoriev



Рис. 6. Слева — сидят: Ю. Пекун, (?), И. В. Михеева, (?); стоят в 1-м ряду М. М. Сливко, (?), Н. В. Белов, В. И. Михеев, М. Н. Шкабара, Е. К. Лазаренко, (?); стоят сзади: (?), Л. И. Карякин (в шляпе). Карьер лабрадорита близ Житомира, 1954 г. Получено от Н. В. Логвиненко VI. 1963. Справа: Н. В. Белов (почетный член ряда зарубежных минералогических обществ и доктор ряда университетов. На фото — одно из чествований). Подписи рукой Д. П. Григорьева

Fig. 6. Left — sitting: Yu. Pekun, (?), I. V. Mikheeva, (?); standing in the 1<sup>st</sup> line M. M. Slivko, (?), N. V. Belov, V. I. Mikheev, M. N. Shkabara, E. K. Lazarenko, (?); standing in the back: (?), L. I. Karyakin (with a hat). A labradorite quarry near Zhitomir, 1954. Received from N. V. Logvinenko VI. June 1963. Right: N. V. Belov (honorary member of several foreign mineralogical societies and Doctor of several universities). The photo shows one of his honors). Handwritten by D. P. Grigoriev



Действительно, с проведением дела надо спешить, и даже очень. Хотя решающее слово всегда за отделом науки ЦК (В. А. Кириллин, Н. И. Глаголев), но официально они требуют пройти линию «Отделение (Д. И. Щербаков и его заместители) — Президиум (Несмеянов, Топчиев и К. А. Власов)<sup>2</sup> — ЦК». Действительно, нужно спешить. ЦК пожелает мотивировку на каждого. Опасаюсь, что мне говорить об этом в Ленинграде уже будет поздно. Если будете раньше в Москве, позвоните Ж 2.30.79, служебный В 1.06.22.

Прошу поверить <в> искренность моего глубокого уважения к Вам. (подпись)  
10.XII.1957

7.I.58. Телеграмма. Ленинград, В-178, 15-я линия, 34, кв. 15, профессору Григорьеву. Получили официальное приглашение Амороса на 6 апреля с просьбой ответа до 31 января. Если нет, я Вам перешлю. Белов.

Очевидно, в телеграмме речь идет о приглашении к участию в учредительном съезде Международной минералогической ассоциации (ИМА, ММА), которая начала свою историю с 8 апреля 1958 г. Вместе с Д. П. Григорьевым в съезде участвовал именно К. А. Власов, фото приведены в статье (Войтеховский, 2019).

Дорогой Дмитрий Павлович,

О причинах, заставляющих нас сделать международной Федоровскую сессию 1959 г., я докладывал ленинградским кристаллографам в мае этого года. Особенно много говорить было нельзя до получения одобрения из наиболее высоких инстанций. Сейчас это разрешение получено, и от имени А<кадемии> н<аук> послано приглашение — официально — президенту Международного кристаллографического союза, где вызвало живой отклик, что снова поставило перед нами задачу добиться увеличения числа приглашаемых, которое пока остается 50.

Как Вам известно, сессию предполагается провести в Ленинграде и, вероятно, через пару-другую недель придется устроить уже заседание Оргкомитета с учетом, что максимум оргработы придется просить взять на себя ленинградцев. Итак, пока главное, над чем мы «работаем», это увеличение числа приглашаемых. Конечно, до Вашего предположения приехать сюда это дело еще не разрешится.

Был бы Вам обязан, если бы Вы сообщили мне судьбу моего маленького опуса по Сердюченке. Опус до передачи в «ЗМО» был передан Вам лично.

С кристаллохимическим, увы, все еще не минералогическим, приветом.

17.IX.1958 (подпись)

Следующие 5 писем отпечатаны на официальных бланках.

**Академия наук СССР.  
Институт кристаллографии**

№ 155 8 января 1959 г.

Профессору Д. П. Григорьеву

Национальный комитет советских кристаллографов доводит до Вашего сведения, что давно задуман-

ная расширенная Федоровская сессия 1959 года в рамках Международного союза кристаллографов с широким участием зарубежных ученых получила утверждение во всех инстанциях и создан Организационный комитет для ее проведения, в который включено и Ваше имя. Если Ваше согласие на это включение будет получено, то мы рассчитываем и на большое Ваше участие в этой международной акции [Белов и др., 1959].

Председатель Национального комитета кристаллографов СССР, академик (подпись) Н. В. Белов  
Секретарь комитета, д.г.-м.н. (подпись) Н. Н. Шефтал

Приписки простым карандашом рукой Д. П. Григорьева:

1. Письма от Президиума.
2. В Ленинграде оч<ень> много времени упущено.
3. Локальн<ый> комитет не действует.
4. В Г<орном> И<нституте> — ...

**Всесоюзное минералогическое общество  
Редакция журнала «Записки ВМО»**

19 января 1960 г.

Уважаемый Дмитрий Павлович!

Редакция просит Вас не отказать в любезности прорецензировать статьи: 1) Н. Д. Соболева — «О сунгуните, антигорите и вермикулите»; 2) А. И. Киселева — «Ильваит из Тасхантахского хребта Якутской АССР»; 3) Д. П. Сердюченко и Н. В. Белова — «Сулунит — не новый минерал» [Сердюченко, Белов, 1960].

С уважением зав. редакцией (подпись) Мусолин.

**Пригласительный билет**

Уважаемый проф. Д. П. Григорьев,

Азербайджанское отделение Всесоюзного минералогического общества приглашает Вас на доклад академика Н. В. Белова (Москва) на тему «Новые разделы кристаллохимии силикатов». Доклад состоится в здании Института геологии Академии наук Азербайджанской ССР (ул. Физули, 67) 24 апреля 1964 г. в 10 час. утра.

Председатель Совета Азербайджанского отделения Общества (подпись) акад. М.-А. Кашкай

**Международный союз кристаллографов  
VII генеральная ассамблея, Международный  
конгресс и симпозиум**

Москва, 12–21 июля 1966 г.

16 октября 1965 г.

Глубокоуважаемый Дмитрий Павлович,

Организационный комитет приглашает Вас принять участие в работе VII Международного конгресса кристаллографов. Ваши сотрудники могут запросить дополнительные экземпляры информационных материалов и регистрационных форм в Организационном комитете конгресса.

Председатель программного комитета академик (подпись) Н. В. Белов

**Открытое письмо**

Куда: Здесь, В. О., 21 л., д. 2, Горный ин-т, каф. минералогии

Кому: Д. П. Григорьеву

В понедельник, 4/III 1968 г., в 18 час. в помещении кафедры кристаллографии (ауд. 52) состоится очеред-

<sup>2</sup> Подчеркнуто в письме



ное заседание Федоровского научного кристаллографического кружка. Повестка дня: акад. Н. В. Белов (Ин-т кристаллографии АН СССР) «Новые структурные исследования силикатов». Вход свободный.

Среди писем нашлись поздравление «К 60-летию Н. В. Белова» и дополнение «Промчалось 10 лет...», скорее всего написанные профессором И. И. Шафрановским, хорошо знавшим юбиляра.

Николай Васильевич Белов!  
Не найти нам подходящих слов.  
Здесь бы нужен звон колоколов,  
Гром зазданных чаш среди столов!  
Николай Васильевич Белов!  
Вы среди рядов, узлов, углов,  
Словно велемудрый зверолов,  
Тайны уловляете миров!  
Полиэдры, кладки из шаров  
Нам ценней роскошнейших даров!  
Сколько Вы наставили умов,  
Николай Васильевич Белов!  
Сколько Вы наставили колов  
Для заморских шавок и ослов,  
В кашу супостатов размолов,  
Николай Васильевич Белов!  
Ум Ваш стоит тысячи умов,  
Том Ваш стоит тысячи томов!  
Честь и слава Вам без лишних слов,  
Николай Васильевич Белов!

Промчалось 10 лет, и снова  
Толпится люд многоголово  
И ждет торжественного слова  
В честь академика Белова.  
Всех потрясли его основы —  
Раздел о силикатах новый.  
Цветут мозаики махрово  
В честь академика Белова.

### Заключение

Личные архивы — важный источник знаний о прошлом. Письма (жаль, в одну сторону), заполняющие время между громкими событиями и подчас даже обнаруживающие их подоплеку, создают связную сеть истории, в которой всему найдется место. Отдадим должное профессору Д. П. Григорьеву, сохранившему ценные рукописи. Как узнали бы мы, что у него была возможность переехать в Москву ради гидротермального синтеза в Институте кристаллографии? Случись это, вероятно, не вышла бы в свет «Онтогения минералов» (Григорьев, 1961) — методология отечественной минералогии, не сразу принятая академическим сообществом (об этом в архиве есть письмо академика Д. С. Коржинского) и даже в родном Горном институте (хорошо известно негативное отношение чл.-корр. П. М. Татарина), но устоявшая и развитая целой плеядой учеников и последователей. Как узнали бы мы о причине участия Д. П. Григорьева в Учредительном съезде Международной минералогической ассоциации (Мадрид, 1958), в которой он стал инициатором (Копенгаген, 1960), а потом и председателем (Вашингтон, 1962) Комиссии по космической минералогии?

Автор благодарит группу истории геологии Геологического института РАН (Москва) за создание инфор-

мационной системы «История геологии и горного дела», упростившей библиографический поиск, а также рецензентов за профессиональные и доброжелательные советы, улучшившие изложение материалов.

### Литература / References

- Аншелес О. М. История развития кафедры кристаллографии ЛГУ // Зап. ВМО. 2004. № 5. С. 34–39.
- Ansheles O. M. History of the development of the department of crystallography at Leningrad State University. Proc. Rus. Miner. Soc. 2004;5:34–39. Russian.
- Белов Н. В. Структура ионных кристаллов и металлических фаз. М.: Изд. АН СССР, 1947. 237 с.
- Belov N. V. Structure of ionic crystals and metallic phases. Moscow: USSR AS; 1947. 237 p. Russian.
- Белов Н. В., Вайнштейн В. К., Порай-Кошиц М. А. и др. Международная Федоровская сессия по кристаллографии в Ленинграде // Кристаллография. 1959. № 5. С. 796–800.
- Belov N. V., Weinstein V. K., Porai-Koshits M. A., et al. The International Fedorov Session on Crystallography in Leningrad. Crystallography. 1959;5:796–800. Russian.
- Белов Н. В., Мамедов Х. С. Кристаллическая структура ксонотлита // Докл. АН СССР. 1955. Т. 104. № 4. С. 615–618.
- Belov N. V., Mamedov Kh. S. Crystal structure of xonotlite. Rep. USSR AS. 1955;104(4):615–618. Russian.
- Белов Н. В., Мамедов Х. С. Кристаллическая структура волластонита // Докл. АН СССР. 1956. Т. 107. № 3. С. 463–466.
- Belov N. V., Mamedov Kh. S. Crystal structure of wollastonite. Rep. USSR AS. 1956;107(3):pp. 463–466. Russian.
- Белов Н. В., Неронова Н. Н., Смирнова Т. С. 1651 шубниковская группа // Тр. Института кристаллографии АН СССР. 1955. № 11. С. 33–67.
- Belov N. V., Neronova N. N., Smirnova T. S. 1651 Shubnikov groups. Proc. Institute of Crystallography. USSR AS. 1955;11:33–67. Russian.
- Белов Н. В., Тархова Т. Н. Группы цветной симметрии // Кристаллография. 1956. Т. 1. № 1. С. 4–13.
- Belov N. V., Tarkhova T. N. Groups of color symmetry. Crystallography. 1956;1(1):4–13. Russian.
- Влодавец В. И., Шаврова Н. Н. Об анортклазе из лавы Дариганской вулканической области // Вопросы петрографии и минералогии. М.: Изд. АН СССР, 1953. Т. 2. С. 71–76.
- Vlodavets V. I., Shavrova N. N. On anorthoclase from the Lava of the Darigan volcanic region. Issues of petrography and mineralogy. V. 2. Moscow: USSR AS; 1953. p. 1–76. Russian.
- Войтеховский Ю. Л. О создании Международной минералогической ассоциации и Комиссии по космической минералогии: из архива Д. П. Григорьева // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 11. С. 25–31. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-11-25-31.
- Voytekhovskiy Yu. L. On the establishment of the International mineralogical association and the Commission on space mineralogy: from the archive of D. P. Grigoriev. Vestnik of IG Komi SC UB RAS. 2019;11:25–31. Russian.
- Войтеховский Ю. Л. Из истории кольской геологии // Тр. Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2024. № 21. С. 29–36. DOI:10.31241/FNS. 2024.21.004.
- Voytekhovskiy Yu. L. From the history of Kola geology.

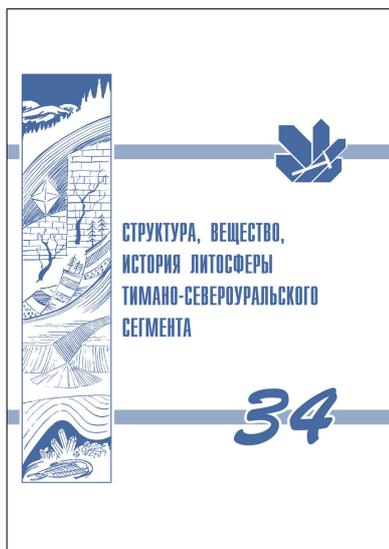


- Proc. Fersman Sci. Session. Kola SC RAS. 2024;21:29–36. Russian.
- Григорьев Д. П.* О генезисе натечных или метаколлоидных колломорфных агрегатов минералов: в связи с вопросом о роли коллоидов в рудообразовании // Зап. ВМО. 1953. № 1. С. 7–22.
- Grigoriev D. P. On the genesis of flowing or metacolloidal, collomorphic mineral aggregates: in relation to the role of colloids in ore formation. Proc. Rus. Miner. Soc. 1953;1:7–22. Russian.
- Григорьев Д. П.* К пониманию природы «коллоидных» минералов // Вопросы минералогии осадочных образований. Кн. 3/4. Львов: Изд. Львов. ун-та, 1956. С. 107–108.
- Grigoriev D. P. Understanding the nature of «colloidal» minerals. Issues in the mineralogy of sedimentary formations. Books 3/4. Lviv: Lviv University Press; 1956. p. 107–108. Russian.
- Григорьев Д. П.* Онтогенез минералов. Львов: Изд. Львов. ун-та, 1961. 284 с.
- Grigoriev D. P. Ontogeny of minerals. Lviv: Lviv University Press; 1961. 284 p. Russian.
- Мамедов Х. С., Белов Н. В.* Кристаллическая структура минералов группы волластонита: 1. Структура ксонотлита // Зап. ВМО. 1956. № 1. С. 13–39.
- Mamedov Kh. S., Belov N. V. Crystal structure of minerals of the wollastonite group: 1. Structure of xonotlite. Proc. Rus. Miner. Soc. 1956;1:13–39. Russian.
- Сердюченко Д. П., Белов Н. В.* О так называемом «сулуните» // Зап. ВМО. 1960. № 3. С. 367–368.
- Serdyuchenko D. P., Belov N. V. On the so-called «sulunite». Proc. Rus. Miner. Soc. 1960;3:367–368. Russian.
- Шубников А. В.* Конспект лекций по пьезокварцу для инженерно-технических работников Треста № 13 / Сост. А. С. Покровский. М.: Лаб. кристаллографии АН СССР, 1938. 34 табл.
- Shubnikov A. V. Lecture notes on piezoelectric quartz for engineering and technical personnel of Trust No. 13. Compiled by A. S. Pokrovsky. Moscow: Lab. of crystallography. USSR AS; 1938, 34 tables. Russian.
- Шубников А. В.* О принципе отбора Гросса–Меллера // Тр. Лаб. кристаллографии АН СССР. 1940а. № 2. С. 119–121.
- Shubnikov A. V. On the Gross–Müller selection principle. Proc. Lab. Crystallography USSR AS. 1940A;2:119–121. Russian.
- Шубников А. В.* Симметрия. М.; Л.: Изд. АН СССР, 1940б. 176 с.
- Shubnikov A. V. Symmetry. Moscow; Leningrad: USSR AS; 1940b. 176 p. Russian.
- Шубников А. В.* О законе геометрического отбора при образовании кристаллического агрегата // Докл. АН СССР. 1946. Т. 51. № 9. С. 679–681.
- Shubnikov A. V. On the law of geometric selection in the formation of a crystalline aggregate. Rep. USSR AS. 1946;51(9):679–681. Russian.
- Шубников А. В.* Симметрия и антисимметрия конечных фигур. М.: Изд. АН СССР, 1951. 172 с.
- Shubnikov A. V. Symmetry and antisymmetry of finite figures. Moscow: USSR AS; 1951. 172 p. Russian.
- Шубников А. В., Копцик В. А.* Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972. 339 с.
- Shubnikov A. V., Koptsik V. A. Symmetry in science and art. Moscow: Nauka; 1972. 339 p. Russian.

Поступила в редакцию / Received 10.08.2025



## Новые издания / New publications



УДК 5+549 (470.1)

**Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Материалы 34-й научной конференции.** Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2025. 172 с.

ISBN 978-5-98491-109-2

В сборнике представлены материалы 34-й научной конференции «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента». Обсуждаются вопросы четвертичной геологии, изотопной геохронологии, инженерной геологии, литологии и седиментологии, петрографии, стратиграфии, геологии нефти и газа, геохимии, геофизики, палеонтологии, минералогии и региональной геологии.

**Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment: Proceedings of the 34<sup>th</sup> Scientific Conference.** Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2025. 172 p.



The collection presents proceedings of the 34<sup>th</sup> scientific conference «Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment». Issues of quaternary geology, isotope geochronology, engineering geology, lithology and sedimentology, petrography, stratigraphy, oil and gas geology, geochemistry, geophysics, paleontology, mineralogy and regional geology are discussed.

### Планы научных мероприятий в ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН на 2026 год

1. Российская конференция с международным участием «Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения – 2026)» – 19–21 мая
2. Семинар «Технологическая минералогия в оценке качества минерального сырья природного и техногенного происхождения» – 22 мая
3. Российское совещание «Тиманиды-протоуралиты Европейского Северо-Востока: стратиграфия, магматизм, геодинамика, металлогения», посвященное памяти В. Г. Оловянишникова (1936–2006) – 16–18 июня
4. XXXV научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» – 24–26 ноября
5. XXXX Черновские чтения – 9 декабря

### Scientific event plans at the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS in 2026

1. Russian Conference with international participation «Modern Problems of Theoretical, Experimental, and Applied Mineralogy (Yushkin Readings – 2026)» – May 19–21
2. Seminar «Technological Mineralogy in Assessing Quality of Mineral Raw of Natural and Technogenic Origin» – May 22
3. Russian Conference «Timanides–Proto-Uralides of the European Northeast: Stratigraphy, Magmatism, Geodynamics, Metallogeny» dedicated to the memory of V. G. Olovyaniashnikov (1936–2006) – June 16–18
4. The 35th Scientific Conference «Structure, Matter, and History of the Lithosphere of the Timan-Northern Ural Segment» – November 24–26
5. The 40<sup>th</sup> Chernov Readings – December 9

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: 26.02.2026. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6.5. Тираж 140. Заказ 1260. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издатель: Институт 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, издателя, типографии: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru

На обложке использованы фото Е. Антроповой, А. Перетягина, М. Сокерина, Р. Шуктомова