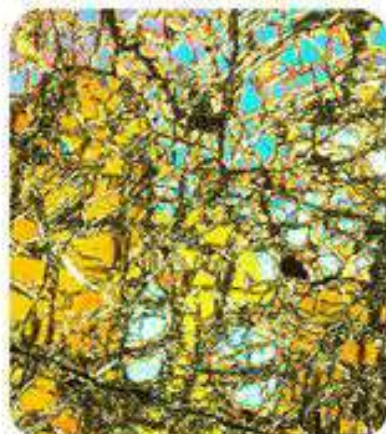


ISSN 2712-7761

№ 4 (364), апрель 2025



Вестник геонаук





Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Апрель
April
2025,
№ 4 (364)

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

Технический редактор Г. Н. Каблис

Заведующий редакцией Т. А. Некучаева

Editorial Board

L. N. Andreicheva, Syktyvkar, Russia
A. I. Antoshkina, Syktyvkar, Russia
T. M. Beznosova, Syktyvkar, Russia
M. A. Bogdasarov, Brest, Belarus
M. A. T. M. Broeckmans, Trondheim, Norway
D. A. Bushnev, Syktyvkar, Russia
Yu. L. Voytekhoysky, Apatity, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
D. A. Zedgenizov, Yekaterinburg, Russia
V. A. Kashirtsev, 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 (2023) – 0.540



geo.komisc.ru/vestnik

SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI
impact factor (2023) – 0.540

Содержание	Content
Науки о Земле	Earth Sciences
Карбонатизация терригенных коллекторов покурской свиты сеноманского яруса севера Западной Сибири: факторы образования и характер распространения <i>Е. С. Лопатина, С. Р. Бембель, Р. М. Хисматуллин</i> 3	Carbonatization of terrigenous reservoirs of the Pokur formation of Senomanian stage in the northern West-Siberian region: factors of occurrence and nature of distribution <i>E. S. Lopatina, S. R. Bembel, R. M. Khismatullin</i> 3
Ландшафтно-климатические обстановки осадконакопления в позднеледниковье и голоцене в низовье р. Черной (юго-восток Баренцево-морского региона, НАО) <i>Ю. В. Голубева, Т. И. Марченко-Вагапова</i> 14	Landscape and climatic environments of sedimentation during the Late Glacial and Holocene in the lower reaches of the Chernaya River (southeast of the Barents Sea region, Nenets Autonomous Okrug) <i>Yu. V. Golubeva, T. I. Marchenko-Vagapova</i> 14
Роль галогенов и серы в апатите при оценке потенциальной рудоносности гранитоидов тигертышского комплекса (Кузнецкий Алатау) <i>Е. В. Наставко, Т. В. Лешуков, А. С. Слесарев, Г. А. Федосюк</i> 32	The role of halogens and sulfur in apatite in assessing the potential ore content of granitoids of the Tigertysh complex (Kuznetsk Alatau) <i>E. V. Nastavko, T. V. Leshukov, A. S. Slesarev, G. A. Fedosyuk</i> 32
Погребение мастера-ювелира на Кокпомъягском могильнике вымской культуры (археологический и археоминералогический аспекты) <i>Э. А. Савельева, В. И. Силаев, В. Н. Филиппов, А. Ф. Хазов</i> 40	Burial of a Master Jeweler in the Kokpomyag ground of the Vym culture (archaeological and archaeomineralogical aspects) <i>E. A. Savelyeva, V. I. Silaev, V. N. Filippov, A. F. Khazov</i> 40
Из опыта преподавания. XVII. Бордюры и предельные группы Кюри <i>Ю. Л. Войтеховский</i> 51	From teaching experience. XVII. Borders and Curie's limit groups <i>Yu. L. Voytekhovsky</i> 51
Хроника, события, факты	Chronicle, events, facts
Выдающийся геолог, минералог и геммолог. К 95-летию со дня рождения В. В. Буканова (1930–2018) 57	Outstanding geologist, mineralogist and gemologist Marking the 95 th anniversary of the birth of V. V. Bukanov (1930–2018) 57
Взгляд сквозь годы. Выставка полевых и экспедиционных фотографий М. Б. Тарбаева (1983–2020 гг.) 59	A look through the years Exhibition of field and expedition photographs by M. B. Tarbaev (1983–2020) 59

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



Карбонатизация терригенных коллекторов покурской свиты сеноманского яруса севера Западной Сибири: факторы образования и характер распространения

Е. С. Лопатина¹, С. Р. Бембель², Р. М. Хисматуллин¹

¹ ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия

ES_Lopatina2@tnnc.rosneft.ru, rmkhismatullin@tnnc.rosneft.ru

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия,

bembelsr@tyuiu.ru

В статье дан обзор публикаций, посвящённых образованию карбонатизации в терригенных породах-коллекторах. Широкое распространение этого явления на многих месторождениях углеводородов и значительное снижение пористости, обусловленное заполнением пустотного пространства карбонатным цементом, обосновывают актуальность изучаемого вопроса. Рассмотрена проблематика формирования пород-флюидопоров в коллекторе, способных влиять на перераспределение флюидопотоков при разработке месторождения. Отмечается отсутствие общепринятой методики по выявлению и прогнозированию распространения этих интервалов по данным интерпретации геофизических методов исследований скважин, а также невозможность дифференциации по данным сейсморазведки.

Рассмотрены проблемы прогноза распространения карбонатизации на примере изучаемого месторождения X Пур-Тазовской нефтегазоносной области Западной Сибири, где отмечено наличие карбонатизации в виде тонких прослоев, цельных интервалов с различной степенью цементации, а также в виде конкреций. Установлена фациальная приуроченность карбонатизации к наиболее песчаным коллекторам прибрежно-континентальных обстановок. Рассчитано влияние карбонатизации на фильтрационно-емкостные свойства. Выявлено отсутствие взаимосвязи между интенсивностью карбонатизации и близостью разрывных нарушений по материалам рассматриваемого месторождения. Установлено, что карбонатизированные прослои простираются не более чем на первые десятки метров.

На примере других месторождений отражена необходимость учёта карбонатизированных интервалов в петрофизической, геологической и гидродинамических моделях. Показано, что наличие карбонатизации является риском для прорыва флюидов как ввиду естественной трещиноватости, так и после проведения гидравлического разрыва пласта. С этой точки зрения изучение карбонатизированных интервалов и их распространения в объёме залежи позволяет увеличить прогностические возможности гидродинамических моделей, учитывая процессы фильтрации в литологически неоднородном резервуаре.

Ключевые слова: карбонатизация, диагенетические преобразования, конкреции, трещиноватость, сеноманские отложения, литолого-фациальный анализ

Carbonatization of terrigenous reservoirs of the Pokur formation of Senomanian stage in the northern West-Siberian region: factors of occurrence and nature of distribution

E. S. Lopatina¹, S. R. Bembel², R. M. Khismatullin¹

¹ Tyumen Oil Research Center, Tyumen, Russia

² Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

The article observes publications devoted to postsedimentation carbonatization in terrigenous reservoir rocks. The widespread occurrence of this phenomenon in many hydrocarbon deposits and a significant decrease in porosity caused by filling the void space with carbonate cement constitute the relevance of the issue under study. The problems of formation of fluid-resistant rocks in the reservoir, which can influence the redistribution of fluid flows during the development of the deposit, are considered. It is noted that there is no generally accepted methodology for identifying and predicting the distribution of these intervals based on the interpretation of geophysical methods of well survey, as well as the impossibility of differentiation based on seismic data.

The problems of predicting the distribution of carbonatization are considered using the example of the studied field X in the Pur-Taz oil and gas region of Western Siberia, where the presence of carbonatization in the form of thin interlayers, solid intervals with varying degrees of cementation, and also in the form of nodules is noted. The facies association of carbonatization with the most sandy reservoirs of coastal-continental environments has been established. The effect of carbonation on filtration-capacitance properties is calculated. The absence of a relationship between the intensity of carbonatization and the proximity of discontinuous faults based on the materials of the deposit under consideration has been revealed. It is established that the carbonatized interlayers extend no more than the first tens of meters.

Для цитирования: Лопатина Е. С., Бембель С. Р., Хисматуллин Р. М. Карбонатизация терригенных коллекторов покурской свиты сеноманского яруса севера Западной Сибири: факторы образования и характер распространения // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 3–13. DOI: 10.19110/geov.2025.4.1

For citation: Lopatina E. S., Bembel S. R., Khismatullin R. M. Carbonatization of terrigenous reservoirs of the Pokur formation of Senomanian stage in the northern West-Siberian region: factors of occurrence and nature of distribution. Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 3–13, doi: 10.19110/geov.2025.4.1

Using the example of other deposits, we focus on the need to consider for carbonatized intervals in petrophysical, geological, and hydrodynamic models. It is shown that the presence of carbonatization is a risk for fluid breakthrough both due to natural fracturing and after hydraulic fracturing. From this point of view, the study of carbonatized intervals and their distribution in the reservoir volume allow increasing the predictive capabilities of hydrodynamic models, taking into account filtration processes in a lithologically heterogeneous reservoir.

Keywords: carbonatization, diagenesis, diagenetic transformations, concretions, fracturing, cenomanian sediments, lithological and facies analysis

Введение

Под карбонатизацией терригенных отложений в настоящей работе, основанной на приведённых литературных источниках, понимаются процессы, приводящие к обогащению пустотного пространства горной породы карбонатами в результате реакции гидроксида кальция с углекислым газом (формула 1) и формированию карбонатного цемента (рис. 1).

Это явление распространено и описано как в отношении резервуаров Западной Сибири (Поднебесных, 2019), так и на месторождениях Красноярского края (Стариков и др., 2020), Анадырского и Западно-Камчатского бассейнов (Карньюшина, 2012), Северного моря (Gibbons и др., 1993), штатов Юта и Колорадо (Taylor и др., 2000), а также в китайской провинции (Cui и др., 2024), что делает проблематику общемировой.

Основная сложность в вопросе изучения карбонатизированных коллекторов заключается в определении природы возникновения карбонатного цемента и соответствующего прогноза распространения таких зон в объёме залежи.

В задачи данного исследования входят прогноз распространения карбонатизированных интервалов в объёме залежи и анализ влияния на разработку месторождения нефти с газовой шапкой. Основной же целью является установление генезиса карбонатизации на месторождении X с учётом имеющейся актуальной научной основы.

Принимая во внимание, что карбонатизированные интервалы обладают аномально упругими характеристиками, обусловленными повышенным значением плотности, логично предположить их прослеживание при атрибутом анализе данных сейсморазведки. Однако с учётом малых толщин карбонатизированных интервалов и их небольших размеров по площади проследить эти прослои по данным сейсморазведки не удалось ввиду недостаточной разрешающей способности сейсмического метода.

Седиментологическое изучение пород по данным исследования полноразмерного керна позволяет точнее исследовать природу, морфологию и относительное время их образования в породе.

Обзор существующих представлений о причинах карбонатизации

Несмотря на значительное количество изученных залежей с карбонатизированными прослоями и длительной историей исследований, на данный момент для них отсутствуют как общепринятая классификация основных типов вторичных изменений, так и критерии закономерностей их распространения. Как следствие, это приводит к недостаточной обоснованности методики прогноза распространения карбонатизации в залежах различного типа (Поднебесных, 2019). В данной работе обобщены сложности, с которыми сталки-

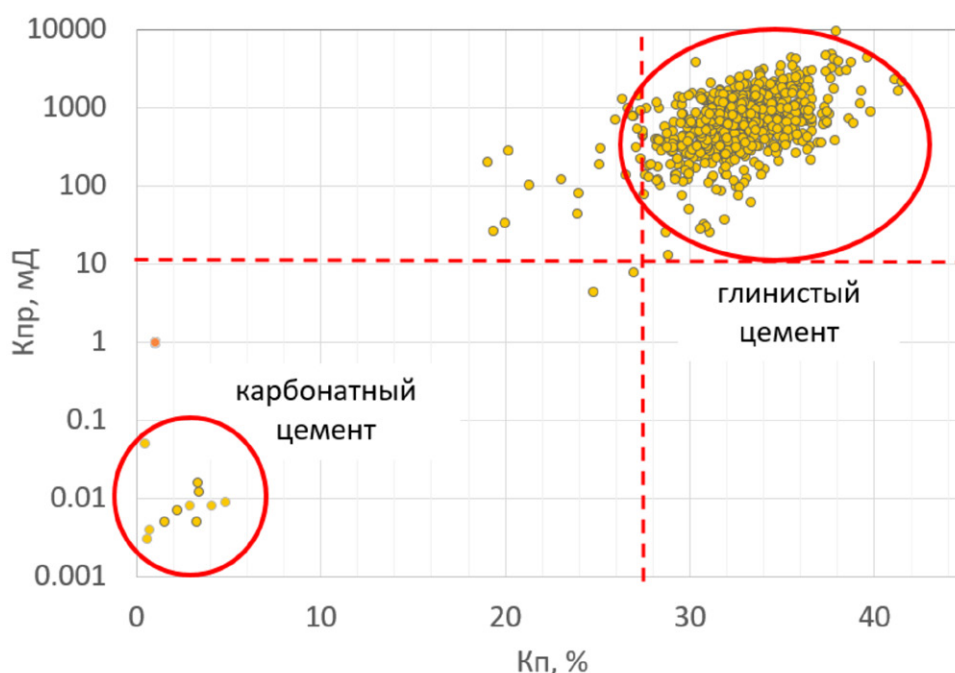


Рис. 1. Ухудшение фильтрационно-емкостных свойств при карбонатизации пород-песчаников фации каналов с влиянием приливов-отливов в зависимости от состава цемента

Fig. 1. Decrease of permeability and porosity in carbonatized sandstones in the fluvial channel facies influenced by tides in terms of cement composition

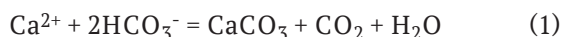


ваются специалисты научно-исследовательских центров, а также описывается проблема недостаточности геолого-геофизической информации.

В литературе по обобщённым исследованиям (Рыкус, 2020) приводятся пять основных условий формирования карбонатизации (рис. 2). Вопросы диагенетического образования карбонатов в разное время были рассмотрены исследователями: Т. И. Гуровой, Е. А. Жуковской, О. Г. Зариповым, Н. М. Недоливко, Г. Н. Перозио, Е. А. Предтеченской, Р. С. Сахибгареевым, И. Н. Ушатинским, О. А. Черниковым и другими. Отмечается, что карбонатизация алеврито-песчаных пород является наиболее распространённым в мезозойских отложениях Западной Сибири процессом, оказывающим наиболее существенное влияние на фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС) гранулярных коллекторов (Ян, 2019). Важно отметить, что в изучаемом разрезе породы залегают на глубине 700–900 м, поэтому отложения мелового возраста испытали лишь раннедиагенетические преобразования, характеризующиеся формированием преимущественно кальцитового цемента.

Катагенетические изменения, способствовавшие образованию доломитового, сидеритового и анкеритового цемента (Поднебесных, 2019), более широко описанные для юрских отложений Западной Сибири, в данной работе не рассматриваются, т. к. на изучаемом месторождении отсутствуют.

Источниками карбонатизации песчаников (т. е. заполнения пустотного пространства карбонатным цементом) являются растворённый в воде диоксид углерода (CO_2) и угольная кислота (HCO_3^-) + Са, происхождение которых связано с растворением раковинного и растительного органического материала (Рыкус, 2020; Walderhaug, 1998). Карбонатизация соответствует формуле:



Заполнение пустотного пространства песчаной породы карбонатным цементом может происходить в раннем диагенезе. Этому процессу благоприятствуют следующие обстановки:

1) межструктурные впадины палеорельефа как зоны с пониженными температурами (Грищенко, 2021);

2) приливно-отливные условия субаэральной экспозиции;

3) заполнение врезанных долин и формирование геохимического барьера (Закревский и др., 2017).

Характерной формой проявления карбонатизации являются также конкреции — небольшие дискретные образования, сформированные в раннем диагенезе (Македонов, 1977; Ян, 2019).

Основными путями формирования постседиментационной карбонатизации (рис. 2) являются процессы выделения угольной кислоты и растворённых ионов в результате отжатия минералов из глин при уплотнении породы, деградация органического вещества (сульфатредуцирующие бактерии), формирование зон декомпрессии вблизи добывающих скважин, привнос термальных вод по разломам. Также влияние оказывают процессы преобразования органического вещества на границах водонефтяного (ВНГ) и газонефтяного (ГНК) контактов (Сахибгареев, 1989).

Некоторыми учёными отмечена главенствующая роль процессов вертикальной миграции газонефтяной эмульсии из нижележащих резервуаров, способствующих формированию залежей нефти в Западной Сибири. Углекислый газ в данном случае обеспечивает подвижность нефти. В качестве аргумента приводится отсутствие карбонатизированных прослоев в областях с отсутствием нефтяных залежей. Связь карбонатизации с древним водонефтяным контактом оспаривается (Касьянов, 2020).

Логично предположить, что если на месторождении обнаружена карбонатизация песчаника, то своей природой она может быть обязана как одному, так и нескольким процессам.

Фактический материал и методика

Изучаемым объектом являются пласты ПК₁₋₇ пур-тазовской свиты нефтегазового месторождения X Пур-Тазовской нефтегазоносной области Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна, вскрытые более чем 700 скважинами. Керновым материалом охарактеризованы 52 скважины, из которых 11 скважина с полноразмерным керном. Детальные седиментоло-

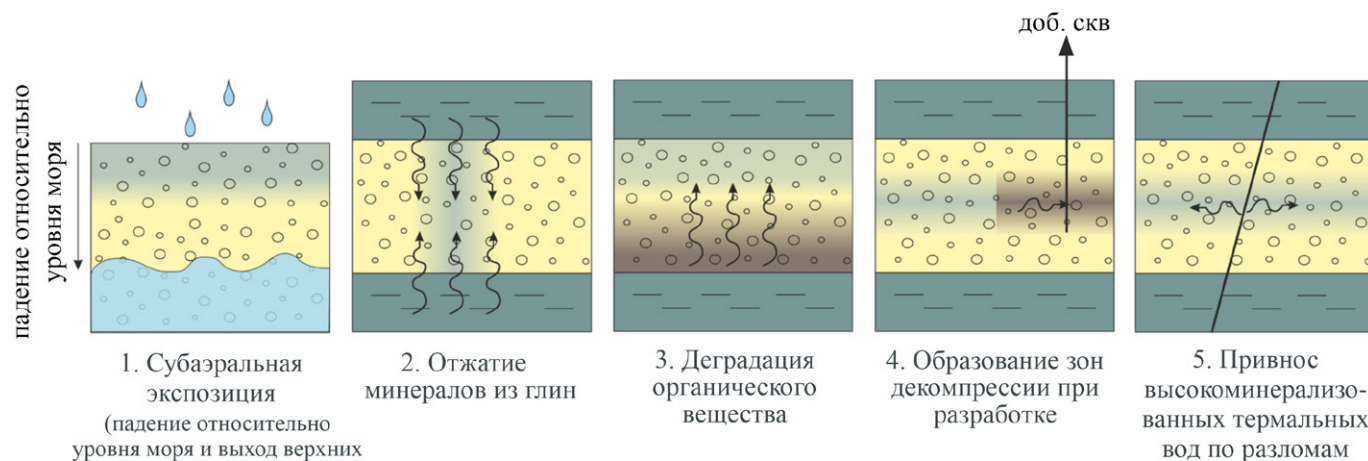


Рис. 2. Генетическая классификация условий образования карбонатизации в породе

Fig. 2. Genetic classification of carbonation formation conditions in the rock

гические исследования были проведены в объёме выноса 1406 м с привлечением бескерновых скважин для оценки масштаба распространения фациальных зон. В скважинах проведён полный комплекс геофизического исследования скважин (ГИС), позволяющий выполнить литологическое расчленение разреза. Сейсмические данные представлены обработанным в 2021 году 3D сейсмическим кубом, неопределённости которого обусловлены наличием мощной (до 140 м) газовой шапки и отсутствием контрастных отражений, связанных с условиями осадконакопления.

Краткое описание фациального строения исследуемой залежи

По результатам проведённого детального литолого-фациального анализа в соответствии с сиквенс-стратиграфической концепцией уточнена обстановка осадконакопления пластов ПК₁₋₇. Породы были сформированы в условиях постепенной бореальной трансгрессии (Конторович и др., 2014) в обстановке приливно-отливной равнины (Лопатина, 2024). Самые ранние из исследуемых отложений (ПК₅₋₇) демонстрируют свидетельства континентальной обстановки (наличие угля, янтаря, ризокреций), затем наблюдается усиление влияния приливов-отливов (ПК₂₋₄) и постепенное затопление (сдвоенные углисто-глинистые слойки, ихнофаии *Skolithos-Cruziana*), завершившееся накоплением пляжевых прибрежно-морских отложений пласта ПК₁ (площадное распространение песчаников, увеличение доли монтмориллонита в породе) и полным затоплением территории (накопление глин кузнецовской свиты).

Литолого-петрофизическая характеристика

На месторождении X в разрезе каждой поисково-разведочной и пилотной скважины встречаются карбонатизированные прослои, т. е. интервалы песчано-алевролитовой породы, цемент которой частично или полностью выполнен карбонатными минералами (рис. 3).

Породы, в которых наблюдается карбонатизация, по вещественному составу представлены граувакковыми аркозами и полевошпатово-кварцевыми граувакками.

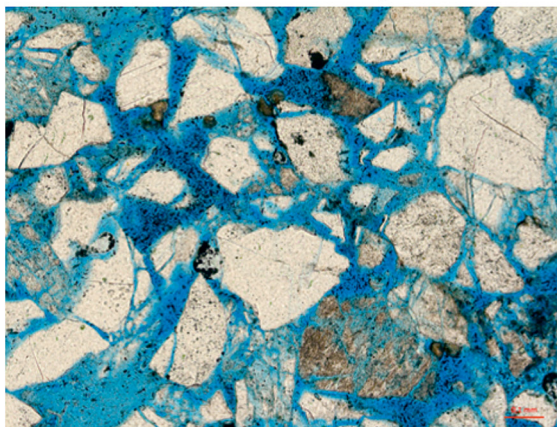
Карбонатизированные песчаники в среднем по минералогическому составу представлены кварцем (43–45 %), полевыми шпатами (33–35 %) средней и слабой степени пелитизации и серицитизации. В составе обломочных пород (13–15 %) отмечаются обломки кремнистых, эффузивных, слюдисто-кремнистых пород, единично халцедона. Слюдистые составляют 8 % и представлены в основном биотитом в значительной степени хлоритизированным и сидеритизированным. Порово-базальный цемент неравномерный; кальцит агрегатного, мозаичного, пойкилитового строения. Акцессорные минералы представлены цирконом, гранатом, магнетитом, апатитом, шпинелью, гематитом; приурочены к прерывистым слойкам. Аутигенные минералы представлены кальцитом цемента, пелитоморфным сидеритом (по биотиту), лейкоксеном (редкие примазки), титанистами, хлоритом (в виде чешуйчатых, волокнистых, реже червеобразных агрегатов до 2–3 %), единично пиритом. Растительный детрит присутствует в виде единичных углефицированных обломков, иногда со следами ячеистой структуры. Видимые полые поры не отмечаются.

Для базального (48 %) и порово-базального (30 %) цемента средние содержания кальцита составляют 23–45 %, доломита — 5 %, сидерита — до 3 %, редко каолинита или хлорита (2 %).

Мощность карбонатизированных прослоев, по данным из скважин с керном, составляет 0.2–1.3 м, отдельные пропластки достигают толщины 5.2 м. Коэффициент пористости, по данным лабораторных исследований, изменяется в пределах 1–6 %, в среднем составляет 3.6 %. Коэффициент проницаемости изменяется от 1 до 16 мД, в среднем составляет 4.8 мД, зависит от интенсивности карбонатизации и наличия трещиноватости.

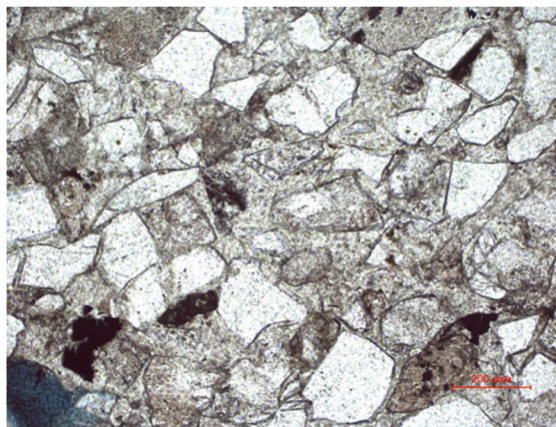
В соответствии с гранулометрическим анализом, карбонатизация песчано-алевролитовых прослоев происходит в породах со средней долей песчаной фрак-

Fct: поры связаны между собой



Скв. 8, шлиф 913/13, гл. по бур. 870.88 м, песчаник средне- и мелкозернистый, глинистый цемент

FCt_c: поры заполнены карбонатным цементом



Скв. 22, шлиф 254, гл. по бур. 915.86 м, песчаник средне- и мелкозернистый, карбонатный цемент

Рис. 3. Примеры песчаника с глинистым и карбонатным цементом

Fig. 3. Examples of sandstone with clay and carbonate cement



ции 65 % (рис. 4, левый столбец) — наибольшей из всех представленных фаций. Таким образом, можно утверждать, что карбонатизации подвержены породы с изначально высокой долей пустотного пространства и небольшим количеством глинистого материала. Текстура таких пород слабо различима, реликтовая от первоначальной фации. Отсутствие ихнофоссилий в породе подтверждает образование осадка в высокоэнергетических условиях осадконакопления, не способствовавших жизнедеятельности роющих организмов.

Генетические типы карбонатизации

В соответствии с выполненным анализом, по керну месторождения X выделены два генетических типа цементации порового пространства карбонатными минералами: раннедиагенетическая и постседиментационная.

Раннедиагенетическая карбонатизация подтверждается наличием окатанных и полуокатанных литокластов овальной, округлой формы мелкозернистого (размером от 1×1.5 см до 7×8 см) серого карбонатного песчаника с четкими границами (рис. 5) и отличающейся от вмещающих пород текстурой. Это свидетельствует о размыве и переотложении уже карбонатизированного песчаника. При этом вмещающие песчаные породы содержат глинистый цемент. Если бы карбонатизация происходила в условиях более позднего диагенеза, то подобное включение интракластов было бы невозможно, поскольку порода имеет однородный литологический состав, а значит, граница не была бы такой резкой. Также против гипотезы о формировании конкреций говорит неизометричная морфология карбонатизированных агрегатов и отличающаяся реликтовая текстура этих включений. Таким образом, логично предположить образование карбонатов в условиях субаэрального, раннего диагенеза, связанное с эпизодическим обнажением уже сформированных приливно-отливных баров, выпадением

карбонатов ввиду смешения морской воды и атмосферных осадков, а также последующим размывом и переотложением русловыми потоками при повышении относительного уровня моря. При этом над рассматриваемыми переотложенными обломками залегает маломощный (15 см) прослой карбонатизированного песчаника, связанный с очередным колебанием относительного уровня моря.

Постседиментационная карбонатизация связана с отжатием минерализованных (элизионных) вод из глинисто-алевролитовых разностей, а также притоком ионов кальция по зонам разломов. Именно такой вид карбонатизации может отличаться локальным площадным распространением, на которое указывают ровные границы карбонатизированных прослоев по керну. Более того, не наблюдается расхождений в показаниях разноглубинных зондов геофизических методов исследования скважин, что указывает на распространение карбонатизации в удалении от ствола скважин, а не нахождение его в виде конкреций.

Не до конца остаётся изученным вопрос о роли микробиальной сульфатредукции, но замечено, что прослой карбонатизированного песчаника в большинстве скважин встречаются (рис. 6) на газонефтяном контакте. При этом явной корреляции с ВНК не выявлено.

Распространение карбонатизированных интервалов по разрезу

Общая толщина покурских пластов ПК₁₋₇ на месторождении X составляет около 220 м. Средняя суммарная толщина карбонатизированных прослоев при этом 5.04 м, что составляет 0.02 % от всего разреза. При этом распределение по седиментологическим циклам, т. е. группам пластов со сходной обстановкой осадконакопления, демонстрирует явное преобладание (53 %) карбонатизированных прослоев в прибрежно-континентальных отложениях, к которым относятся фации

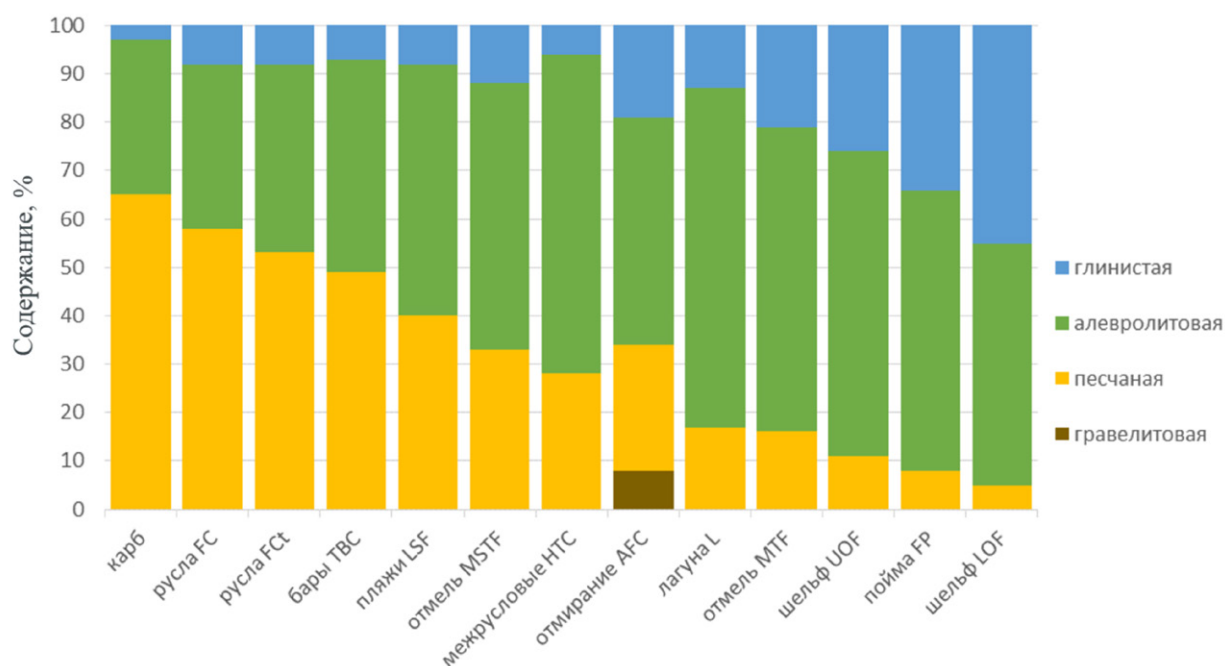


Рис. 4. Среднее распределение гранулометрических фракций по фациям

Fig. 4. Average distribution of granulometric fractions by facies

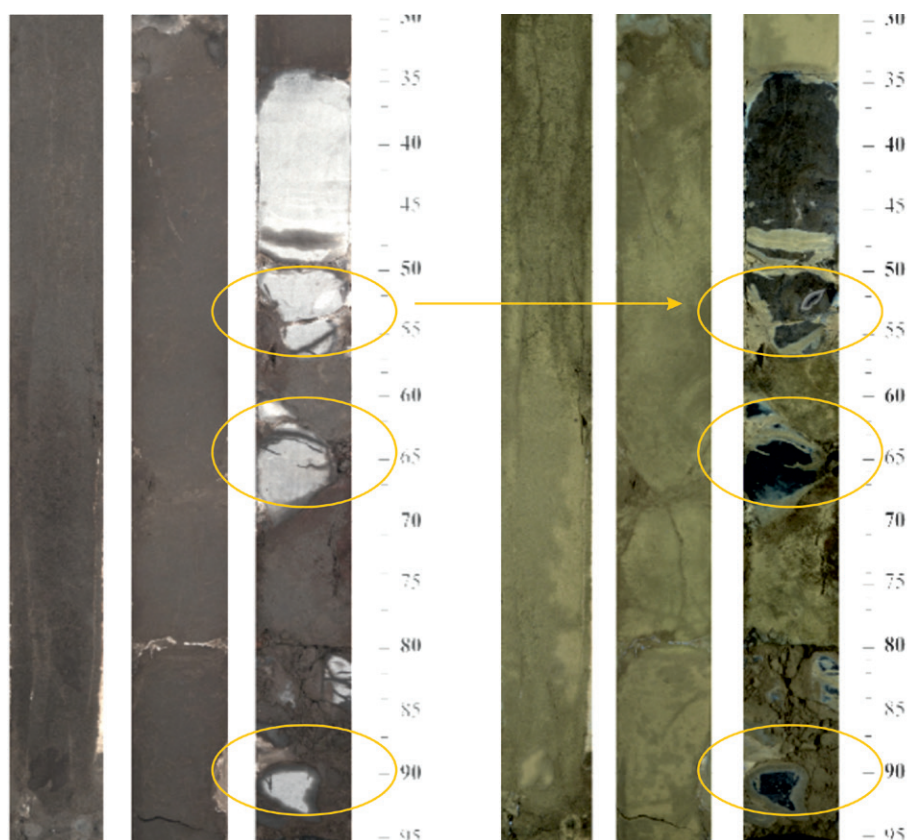


Рис. 5. Обломки карбонатизированного песчаника в массивном песчанике с глинистым цементом.
Глубина по керну: 817.55–818.1 м, фото в дневном и УФ-свете

Fig. 5. Fragments of carbonatized sandstone in massive sandstones with clay cement.
Core depth: 817.55–818.1 m, photos in daylight and UV light

приливно-отливной равнины (рис. 7). С одной стороны, это может быть связано с изначально улучшенными коллекторскими свойствами русловых отложений пластов ПК₅₋₇. С другой стороны, именно в прибрежно-континентальных обстановках сформировались благоприятные условия для смешивания минерализованных морских вод, наносимых приливами, и пресных вод, приносимых руслами и атмосферными осадками, что способствовало образованию геохимического барьера (Taylor, 2000).

Плотные карбонатные прослои с высоким значением карбонатизации (так называемые плотняки) уверенно выделяются по методам ГИС максимальными пиками плотности RHOV, сопротивления RT, а также минимальными значениями водородосодержания NPHI.

Согласно макроописанию полноразмерного керна выделено 4 текстурных типа карбонатизации. Она проявляется частичной или полной цементацией в виде тонких прослоев, а также конкреций (рис. 8). Полная и частичная цементация ввиду своей равномерности распознаётся методами ГИС как «плотняки» (без определённого граничного значения, толщиной не менее 0.4 м по разрешающей способности ГИС). Цементация прослоями (обычно 1–3 см) или конкрециями, напротив, определяется лишь по керну, но не диагностируется на кривых ГИС, а значит, не учитывается при моделировании. В литературе описаны возможные сценарии учёта карбонатизации в петрофизической модели через трёхмерные нелинейные петрофизические зависимости (Байков и др., 2018), однако эта методика не может считаться универсальной.

Отсутствие признаков нефтенасыщения в карбонатизированных прослоях свидетельствует о том, что сначала произошла карбонатизация осадка, затем наложение углеводородами.

Распространение карбонатизированных интервалов по площади

В результате исследования старого неизолированного керна в объёме 932.3 м (вынос 29 %) по 41 скважине в 16 скважинах были выделены тонкие ритмичные прослои и признаки карбонатизации, в 12 скважинах карбонатизированные интервалы не обнаружены (или нет керна из этих интервалов), в 13 скважинах встречен плотный массивный карбонатизированный песчаник. Сопоставление скважин, в разрезе которых установлены массивные карбонатизированные песчаники с предполагаемыми разломами по семи моделям, принятым в разные годы разными авторами, не показало явной приуроченности процессов карбонатизации к зонам разломов, тем самым не подтвердив гипотезу о преобладающей роли дизъюнктивов в транспортировке насыщенных углекислотой растворов в коллектор (рис. 9).

Интегрирование представлений о карбонатизации в разработку месторождений

Исследования карбонатизированных прослоев демонстрируют необходимость учёта этих интервалов при разработке месторождений. Например, проведе-

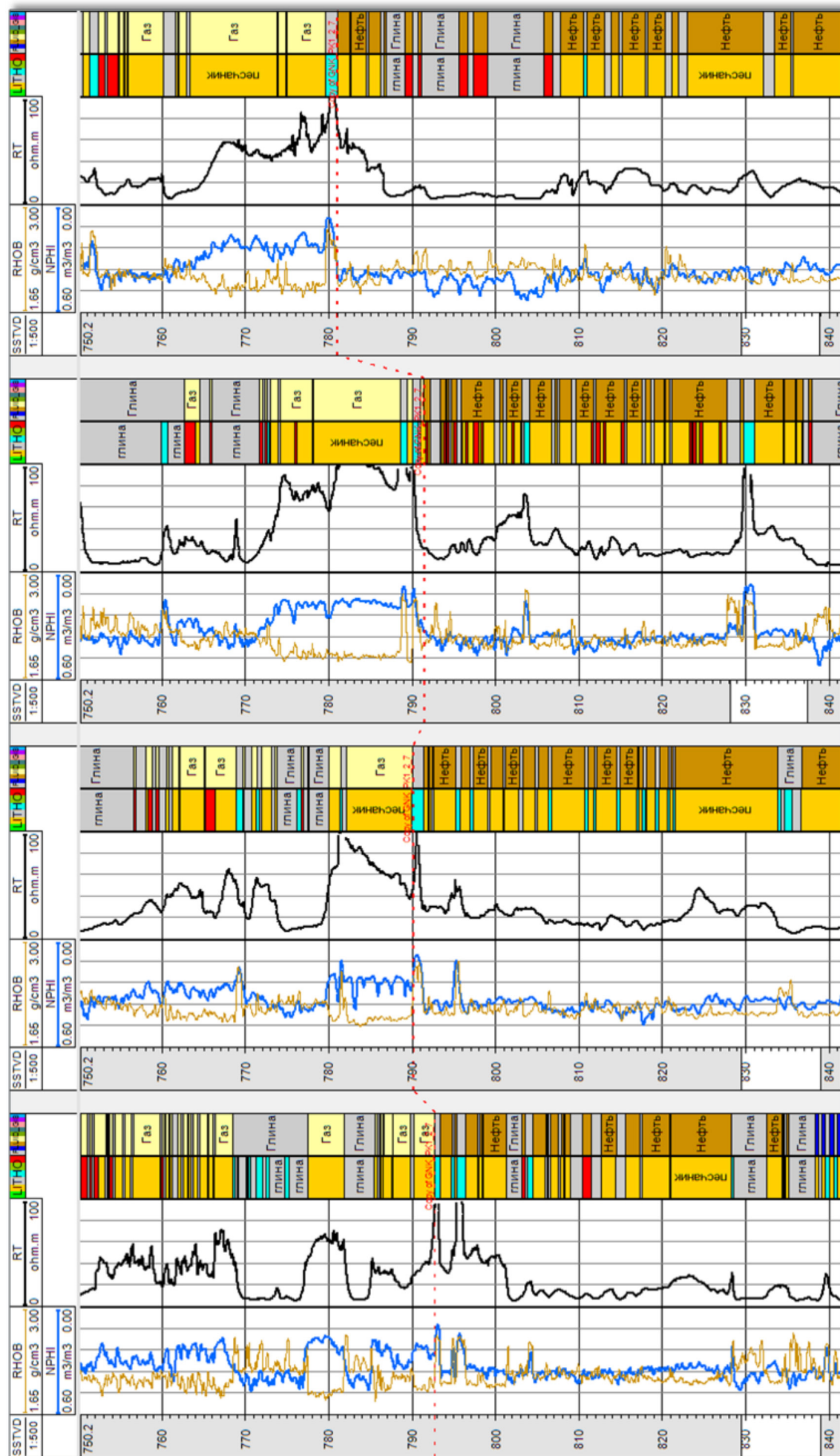


Рис. 6. Присутствие карбонатизированного песчанника (голубой цвет) на уровне ГНК (красная пунктирная линия)
 Fig. 6. The presence of carbonatized sandstone (blue) at the level of the gas and oil contact (red dotted line)

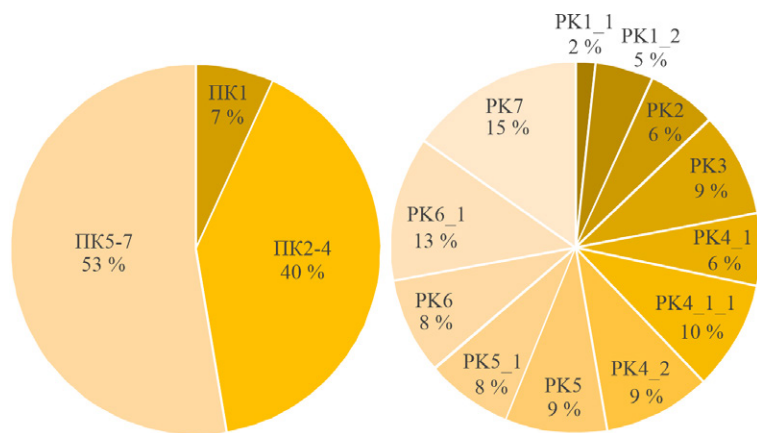


Рис. 7. Распространение карбонатизированных прослоев по разрезу: слева — по крупным циклам осадконакопления, справа — по отдельным циклитам

Fig. 7. Distribution of carbonatized interlayers along the section: on the left — by large cycles of sedimentation, on the right — by individual cyclites

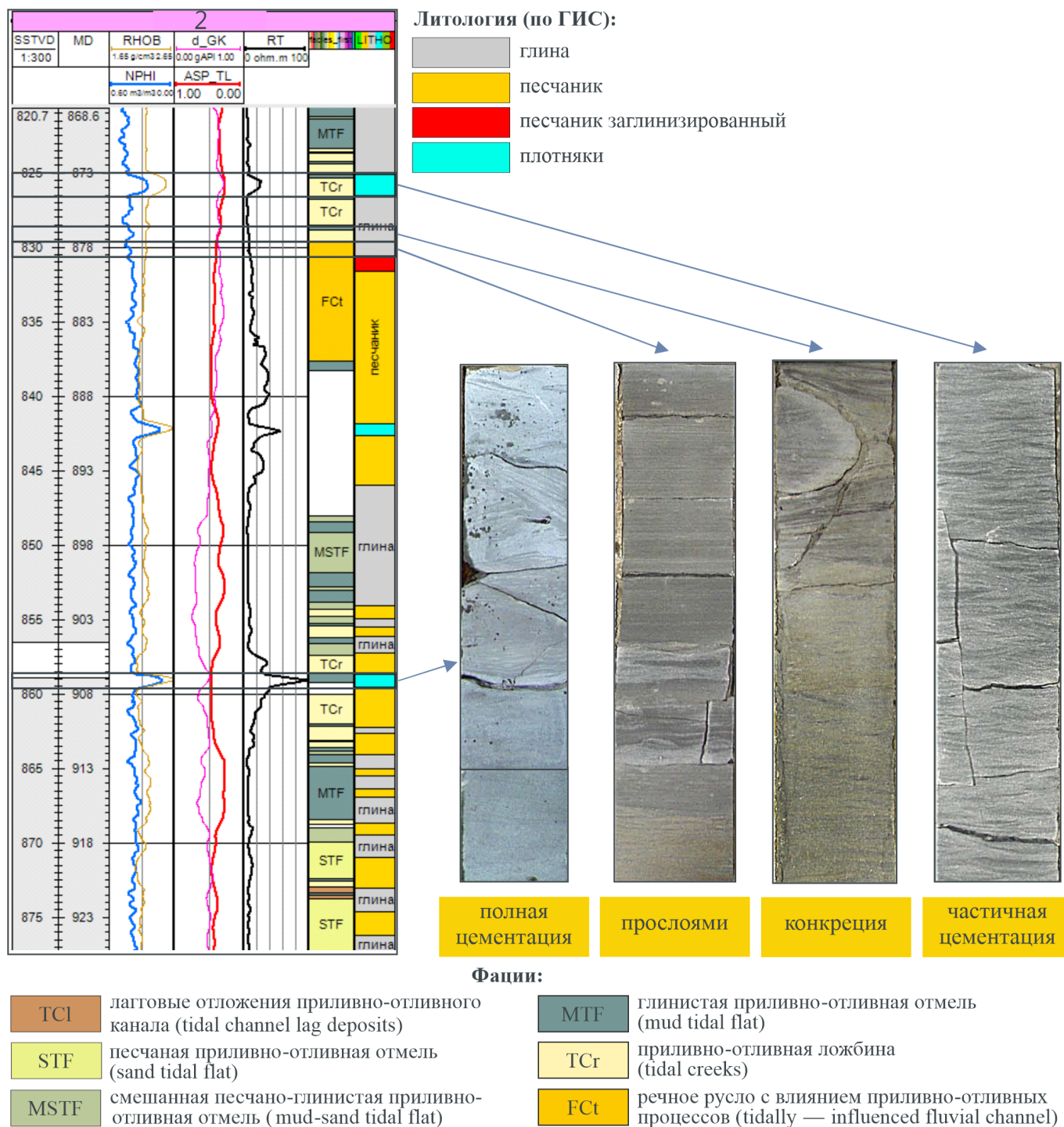


Рис. 8. Виды проявления карбонатизации в песчаниках

Fig. 8. Types of carbonatization in sandstones



ние гидроразрыва пласта на Пермском месторождении спровоцировало прорыв воды вследствие растрескивания карбонатизированного прослоя, сформированного, по представлениям специалистов, на месте древнего водонефтяного контакта (Пуртова и др., 2006).

Примерами прослеживания плотных карбонатизированных пропластков в качестве репера при корреляции могут служить подошвенные отложения пласта ВК₁ на Ем-Еговском лицензионном участке (Грищенко, 2021) и пласта ЮВ₁ в пределах Бахилловского месторождения (Паняк, 2021).

В качестве интеграции карбонатизированных прослоев в геологическую модель вместо приобщения их к классу неколлектора предложена методика создания куба литологии в два этапа (Паняк, 2021). Сначала создаётся куб обобщённых литотипов «коллектор» и «неколлектор», в котором карбонатизированные пропластки входят в состав коллектора, определяя свою принадлежность к резервуару до формирования вторичных процессов. Затем в объёме «коллектора» моделируются карбонатизированные интервалы, отражающие наложенные процессы в высокопористых разностях. Предложенная этапность позволяет учесть стадийность литогенеза, уточнить морфологию распространения процессов карбонатизации и обосновать гидродинамический барьер для фильтрации флюидов.

Если по скважинным данным прослеживаемость карбонатизированных пропластков меньше размера гидродинамической ячейки $100 \times 100 \times 0.2$ м, то имеет место их недоучёт в расчётах параметров разработки (Стариков и др., 2020). Авторы предлагают два способа моделирования карбонатизированных прослоев: задание минимальных ФЕС в ячейке с «плотняком» и задание несоседних соединений (NNC) между ячейками, разделёнными «плотняком».

На изучаемом месторождении X не обнаружено стабильного площадного распространения отдельных пропластков, а их мозаичное расположение не способствует уверенному прослеживанию и корреляции. Более того, анализ скважин с прорывом газа на месторождении X не продемонстрировал обязательного наличия карбонатизированного прослоя над зоной прорыва, по трещинам которого прорвался газ.

Обсуждение

Причина карбонатизации терригенных коллекторов и, главное, прогноз их распространения и степень влияния на процессы разработки месторождения, а также адаптацию гидродинамических моделей всё ещё остаются недоизучены и требуют от геологического сообщества создания методологии исследования. В настоящее время нет общепринятых диагностических

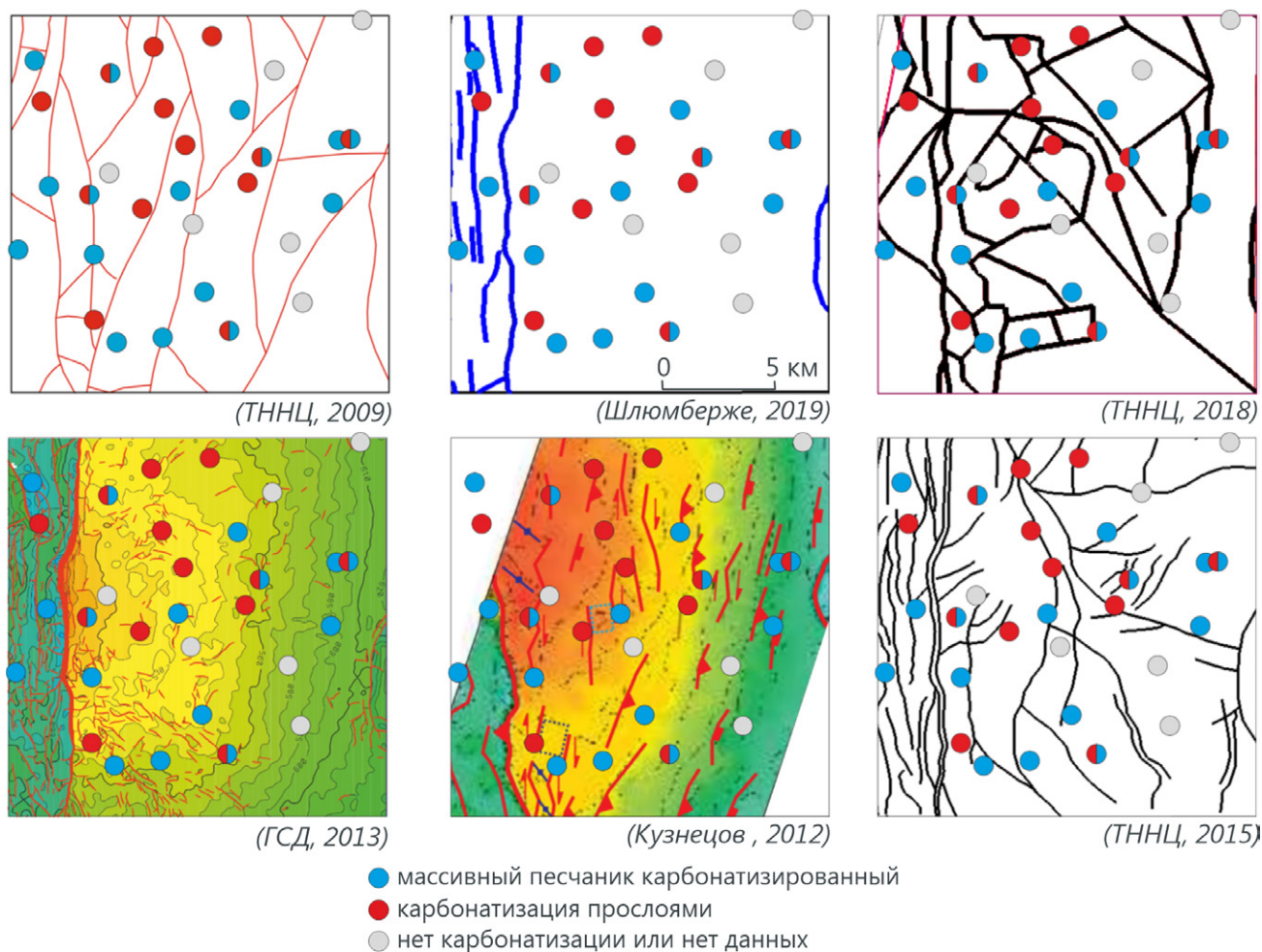


Рис. 9. Сопоставление скважин с различными типами карбонатизации с предлагаемыми в разные годы разломными моделями

Fig. 9. Comparison of wells with different types of carbonatization with different models proposed in different years



критериев и единой классификации причин образования карбонатизированных терригенных отложений.

Макро- и микроанализ керн позволяют установить морфологию и степень карбонатизации, однако интервалы с маломощной, слабой или неравномерной карбонатизацией фактически неразличимы методами ГИС, а значит, остаются недоучтёнными как в петрофизической, так и в гидродинамической модели.

Неясен также вопрос о роли и скоростях поедания нефти сульфатредуцирующими бактериями, которые также могут способствовать образованию карбонатного цемента. Если эти скорости сопоставимы со временем разработки месторождения, то это новое знание может инициировать переучёт карбонатизированных интервалов.

Наличие геохимического барьера обусловлено смешением пресных и солёных вод в пределах прибрежно-континентальных фаций. Именно в этой области происходит вероятное образование карбонатного цемента в породах. С точки зрения сопровождения бурения знание о прибрежно-континентальных условиях формирования коллектора может быть выражено в рекомендации большего отступа от газонефтяного контакта в зонах потенциального развития карбонатизированных интервалов для уменьшения риска прорыва газа из газовой шапки.

Отсутствие повсеместной корреляции карбонатизированных интервалов в соседних горизонтальных скважинах (при многозабойных скважинах расстояние между боковыми стволами составляет 50 м) на одних абсолютных глубинах или в пределах одного цикла позволяет допустить, что размеры отдельных карбонатизированных прослоев в длину не превышают десятков метров. Наличие карбонатизированных прослоев на разных абсолютных глубинах в соседних скважинах указывает на то, что образование карбонатного цемента происходило до окончательного формирования антиклинальной структуры и контролировалось диагенетическими процессами.

С другой стороны, повсеместно встречаются интервалы, в которых прослои карбонатизированного песчаника расположены на одном гипсометрическом уровне, что указывает на их формирование уже после формирования ловушки (как, например, в случае ГНК).

Так или иначе, нет достоверных методов определения связности и стадийности формирования отдельных карбонатизированных прослоев песчаников. В этом смысле адаптация гидродинамической модели является одним из способов подтверждения проницаемости и связности/изолированности этих тел.

Выводы

Проведённые аналитические работы на исследуемом месторождении X показали следующие результаты:

1. По данным керн выделено два генетических типа цементации порового пространства карбонатными минералами — раннедиагенетическая и постседиментационная, определены 4 текстурных типа карбонатизации.

2. Установлено, что распространение карбонатизированных прослоев по латерали составляет не более первых десятков метров, при этом карбонатиза-

ция происходит в наилучших коллекторах, ухудшая их ФЕС.

3. Не выявлено взаимосвязи распространения участков карбонатизации и местоположения разрывных нарушений на изученном месторождении. Определена стадийность заполнения порового пространства: сначала карбонатсодержащими флюидами, затем углеводородами.

4. С точки зрения дальнейшего прогнозирования и выделения слабокарбонатизированных прослоев методами ГИС необходимо продолжить поиск новых методологических приёмов их обнаружения, т. к. наличие зон и участков карбонатизации в пределах продуктивных интервалов разрабатываемых нефтегазовых объектов является риском для прорыва флюидов как ввиду естественной трещиноватости, так и при применении гидравлического разрыва пласта.

5. Совместное изучение кернового материала и ГИС — приоритетное направление для определения генезиса, морфологии и прочностных свойств карбонатизированных терригенных интервалов.

В ООО «Тюменский нефтяной научный центр» продолжается исследование карбонатизации песчаников в качестве перспективного метода улучшения адаптации модели.

Авторы выражают благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и рекомендации, позволившие расширить область исследования вопроса карбонатизации.

Литература / References

- Байков В. И., Жонин А. В., Коновалова С. И., Мартынова Ю. В., Михайлов С. П., Рыкус М. В. Петрофизическое моделирование сложнопостроенного терригенного коллектора // Территория «Нефтегаз». 2018. № 11. С. 34–38.
- Baikov V. A., Zhonin A. V., Kononova S. I., Martynova Yu. V., Mikhailov S. P., Rykus M. V. Petrophysical modelling of complex terrigenous reservoirs. Oil and gas territory, 2018, No. 11, pp. 34–38. (in Russian)
- Грищенко М. А., Иванова И. В. Уточнение литологической модели пластов ВК1–3 в пределах Ем-Еговского лицензионного участка с учетом вторичных процессов карбонатизации коллекторов // Геология нефти и газа. 2021. № 2. С. 47–59. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-2-47-59
- Grishchenko M. A., Ivanova I. V. Em-Egovsky License Area: update of BK1–3 beds lithology model accounting for processes of secondary carbonatization. Geologiya nefi i gaza, 2021, No. 2, pp. 47–59. (in Russian)
- Закревский К. Е. и др. Геологическое моделирование прибрежно-морских отложений (на примере пласта АВ₁ (АВ₁¹⁺²+АВ₁³) Самотлорского месторождения). Тюмень: Вектор Бук, 2017. 314 с.
- Zakrevskiy K. E. et al. Geological modelling of coastal-marine sediments (using the example of the АВ₁ (АВ₁¹⁺²+АВ₁³) formation of the Samotlor deposit). Tyumen: Vector Buk, 2017, 314 p. (in Russian)
- Карньюшина Е. Е. Основные причины возникновения зон карбонатной цементации в толщах нефтегазоносных бассейнов // Вестник Московского университета. Серия 4, Геология. 2012. № 5. С. 47–49.
- Karnyushina E. E. The main reasons for the occurrence of carbonate cementation zones in the strata of oil and



- gas basins. Bulletin of the Moscow University, Series 4, Geology, 2012, No. 5, pp. 47–49. (in Russian)
- Касьянов И. В., Нежданов А. А. Роль процессов карбонатизации пород в формировании залежей углеводородов в Западной Сибири // Геология нефти и газа. 2020. № 1. С. 69–79. DOI: 10.31087/0016-7894-2020-1-69-79
- Kasyanov I. V., Nezhdanov A. A. Role of rock carbonation in formation of hydrocarbon deposits in Western Siberia. Russian oil and gas geology, 2020, No. 1, pp. 69–79. (in Russian)
- Конторович А. Э., Ершов С. В., Казаненков В. А., Карогодин Ю. Н., Конторович В. А., Лебедева Н. К., Никитенко Б. Л., Попова Н. И., Шурыгин Б. Н. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в меловом периоде // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 5–6. С. 745–776
- Kontorovich A. E., Ershov S. V., Kazanenkov V. A., Karogodin Y. N., Kontorovich V. A., Lebedeva N. K., Nikitenko B. L., Popova N. I., Shurygin B. N. Cretaceous paleogeography of the western Siberian sedimentary basin. Russian Geology and Geophysics, 2014, 55, No. 5–6, pp. 582–609.
- Лопатина Е. С. Дифференциальная диагностика фаций приливо-отливной равнины и смежных обстановок // Геология нефти и газа. 2024. No 6. С. 31–43. DOI: 10.47148/0016-7894-2024-6-31-43
- Lopatina E. S. The differential diagnosis of tidal flat facies and adjacent depositional environments. Russian oil and gas geology, 2024, No. 6, pp. 31–43. (in Russian)
- Македонов А. В., Зарицкий П. В. Конкрециеобразование и стадийность литогенеза // Конкреции и конкреционный анализ. М.: Наука, 1977. С. 5–17.
- Makedonov A. V., Zaritskiy P. V. Nodule formation and stages of nodule lithogenesis, Nodules and nodular analysis. Moscow: Nauka, 1977, pp. 5–17. (in Russian)
- Нежданов А. А. Типы карбонатных конкреций и их роль в изучении нефтегазовых толщ Западной Сибири // Конкреционный анализ углеводородных формаций. Тюмень, 1995. Вып. 201. С. 95–102.
- Nezhdanov A. A. Types of carbon concretions and their role in oil and gas West Siberia layers studying. Nodular analysis of carbon-bearing formations. Tyumen, 1995, 201, pp. 95–102. (in Russian)
- Паняк С. Г., Иванова И. В. Учет влияния процессов карбонатизации на фильтрационно-емкостные свойства пласта ЮВ1 Бахилковского месторождения при создании модели литологии // Известия УГТУ. 2021. Вып. 3 (63). С. 68–79. DOI 10.21440/2307-2091-2021-3-68-79
- Panyak S. G., Ivanova I. V. Accounting for the influence of carbonatization processes on the reservoir properties of the Yuv1 formation of the Bakhilovsky deposit when creating a lithological column. News of the Ural State Mining University, 2021, 3(63), pp. 68–79. (in Russian)
- Поднебесных А. В. Закономерности размещения основных типов вторичных изменений коллекторов на территории Западно-Сибирской плиты // Нефтегазовое дело. 2019. Т. 17 № 2. С. 6–13. DOI: 10.17122/ngdlo-2019-2-6-13
- Podnebesnykh A. V. Regularities of accommodation of main types of secondary changes of collectors in the territory of the West Siberian plate. Petroleum engineering, 2019, V. 17, No. 2, pp. 6–13. (in Russian)
- Пуртова И. П., Янкова Н. В., Кадочникова Л. М., Васильев В. И., Сытник Н. В. Моделирование сложнопостроенных залежей на примере юрских отложений месторождений Нижневартовского района // Интервал. 2006. № 7. С. 38–43
- Purtova I. P., Yankova N. V., Kadochnikova L. M., Vasiliev V. I., Sytnik N. V. Modelling of complex reservoirs using the example of Jurassic sediments of Nizhnevartovsky region fields. Interval, 2006, No. 7, pp. 38–43. (in Russian)
- Рыкус М. В. Карбонатная цементация в песчаных породах-коллекторах: обзор представлений // Нефтегазовое дело. 2020. Т. 18, № 5. С. 15–26. DOI: 10.17122/ngdlo-2020-5-15-26
- Rykus M. V. Carbonate cementation in sandstone reservoirs: an overview of views. Petroleum engineering, 18, No. 5, 2020, pp. 15–26. (in Russian)
- Сахибгареев Р. С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных залежей. Л.: Недра, 1989. 260 с.
- Sakhibgareev R. S. Secondary reservoir changes in the process of formation and destruction of oil deposits. Leningrad: Nedra, 1989, 260 p. (in Russian)
- Стариков М. А., Киселев В. Л., Архипов В. Н., Грандов Д. В., Утяшев Ю. Н., Евдошчук А. А. Влияние методических подходов моделирования плотных песчаников на точность оценки уровней добычи углеводородного сырья // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2020. № 10(346). С. 112–118. DOI: 10.30713/2413-5011-2020-10(346)-112-118
- Starikov M. A., Kiselev V. L., Arkhipov V. N., Grandov D. V., Utyashev Yu. N., Evdoshchuk A. A. The influence of methodological approaches to tight sandstones modelling on the estimation accuracy of hydrocarbons productions levels. Geology, geophysics and development of oil and gas fields, 2020, No. 10(346), pp. 112–118. (in Russian)
- Ян П. А., Вакуленко Л. Г., Ершов С. В., Николенько О. Д., Шестакова Н. И. Оценка масштабов карбонатизации терригенных пород-коллекторов // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. Т. 2 № 1. С. 12–15.
- Yan P. A., Vakulenko L. G., Yershov S. V., Nikolenko O. D., Shestakova N. I. Assessment of the carbonatization extent of terrigenous reservoir rocks. Interexpo Geo-Siberia, 2019, V. 2, No. 1, pp. 12–15. (in Russian)
- Cui H., Zhu S., Gao Y. Hydrothermal activity near the Permian–Triassic transition in the south-western Ordos Basin, China: Evidence from carbonate cementation in Upper Permian sandstones // Sedimentology. August 2024. DOI:10.1111/sed.13232
- Gibbons K., Hellem T., Kjemperud A., Nio S.D., Vejenstad K. Sequence Architecture, Facies Development and Carbonate Cemented Horizons in the Troll Field Reservoir, Offshore Norway // Geological Society, London, Special Publications. 1993. Vol. 69. P. 1–31. DOI: 10.1144/GSL.SP.1993.069.01.02.
- Taylor K. G., Gawthorpe R. L., Curtis C. D., Marshall J. D., Awwiller D. N. Carbonate Cementation in a Sequence Stratigraphic Framework: Upper Cretaceous Sandstones, Book Cliffs, Utah Colorado // Journal of Sedimentary Research. 2000. Vol. 70. P. 360–372. DOI: 10.1306/2DC40916-0E47-11D7-8643000102C1865D.
- Walderhaug O., Bjorkum P.A. Calcite Cement in Shallow Marine Sandstones: Growth Mechanisms and Geometry // Carbonate Cementation in Sandstones / Ed. S.Morad. Oxford: UK Blackwell Publishing. 1998. P. 179–192.

Поступила в редакцию / Received 06.03.2025



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

Обзорная статья • Review article

УДК 551.89/551.794

DOI: 10.19110/geov.2025.4.2

Ландшафтно-климатические обстановки осадконакопления в позднеледниковье и голоцене в низовье р. Черной (юго-восток Баренцевоморского региона, НАО)

Ю. В. Голубева, Т. И. Марченко-ВагаповаИнститут геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
yvgolubeva@geo.komisc.ru; timarchenko@mail.ru

В статье представлены результаты микропалеонтологического исследования палинологическим и диатомовым методами, являющимися традиционными при всестороннем изучении геосистем. На основе полученных данных в совокупности с обзором палеонтологических материалов воссозданы условия седиментации на юго-востоке Баренцевоморского региона. Изучено береговое обнажение в приустьевой области р. Черной. Вскрытый в основании разреза валунный суглинок видимой мощностью около 10 м соотнесен с полярным (осташковским) горизонтом, что подтверждено результатами OSL-датирования подморенной толщи. Вышезалегающие отложения мощностью около 0.5 м имеют диагностические признаки флю-тилла: нарушения межслойных контактов и алевритовые окатыши в глинистом заполнителе. Результаты палинологического изучения перекрывающих их глинистых осадков указывают на существование небольшого прогляциального озера, образованного при деградации полярного оледенения. Дальнейшая хронология условий в голоцене базируется на радиоуглеродных датах. С раннего голоцена по настоящее время происходило заболачивание водоема и преобразование его в вечномерзлый бугристый торфяной массив.

Ключевые слова: юго-восток Баренцевоморского региона, позднеледниковье и голоцен, палинология, диатомеи

Landscape and climatic environments of sedimentation during the Late Glacial and Holocene in the lower reaches of the Chernaya River (southeast of the Barents Sea region, Nenets Autonomous Okrug)

Yu. V. Golubeva, T. I. Marchenko-Vagapova

Institute of Geoogy, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

The article presents the results of micropaleontological studies (palynological and diatom analyses), which are traditional in a comprehensive study of geosystems. A coastal outcrop in the estuary area of the Chernaya River was studied. The boulder loam exposed at the base of the section with a visible thickness of about 10 m is correlated with the Polar (Ostashkov) horizon, which is confirmed by the results of OSL dating. The overlying sediments have diagnostic features of flow-till. The results of palynological study of clay sediments in the roof of the section indicate the existence of a small proglacial lake formed during the degradation of Polar glaciation. Later, the reservoir underwent swamping and transformation into a permafrost hummocky peat massif. Peat formation began in the Early Holocene. The process of peat accumulation is dated at 7180 ± 150 14C BP (IGAN 10839) and 5720 ± 100 14C BP (IGAN 10838), respectively. The studied glacial and lake-bog sediments were part of a supraglacial sedimentary complex, the fabric of which included both freshwater proglacial reservoirs and brackish-water basins formed during ingress. At the same time, some different types of lakes were probably isolated from each other by dead ice or ridges of loose rocks, subsequently preserved or destroyed by erosional alluvial processes.

Keywords: southeast of the Barents Sea region, Late Glacial and Holocene, palynology, diatoms

Введение

Условия осадконакопления в течение позднего неоплейстоцена-голоцена в пределах прибрежных областей Баренцева моря достаточно долго являются предметом обсуждения научным сообществом. Основные

темы дискуссий в настоящее время — это *период и площадь распространения последнего оледенения и морские трансгрессивно-регрессивные циклы на этой территории*, а также связанные с ними седиментационные обстановки.

Для цитирования: Голубева Ю. В., Марченко-Вагапова Т. И. Ландшафтно-климатические обстановки осадконакопления в позднеледниковье и голоцене в низовье р. Черной (юго-восток Баренцевоморского региона, НАО) // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 14–31. DOI: 10.19110/geov.2025.4.2

For citation: Golubeva Yu. V., Marchenko-Vagapova T. I. Landscape and climatic environments of sedimentation during the Late Glacial and Holocene in the lower reaches of the Chernaya River (southeast of the Barents Sea region, Nenets Autonomous Okrug). Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 14–31, doi: 10.19110/geov.2025.4.2



По проблеме границы распространения ледникового покрова мнения специалистов расходятся. Дж. Мангеруд с соавторами (1999), И. Н. Демидов (Larsen et al., 2006), В. И. Астахов (2013, 2020) суммируют данные, указывающие на то, что Баренцево-Карский ледниковый покров возрастом 15–25 тыс. лет в позднем валдае суши не достигал. Другие исследователи приводят не менее убедительные доводы в пользу расположения его границы по суше, в разной степени удаленной к югу от береговой линии (Четвертичные..., 1987; Величко, Фаустова, 1989; Гросвальд, 2009; Лавров, Потапенко, 2012 и др.). По данным Л. Н. Андреичевой (2002; Andreicheva, Vorobyev, 2025), ледниковый щит покрывал преимущественно территорию крайнего севера Печорской низменности, занимая низовье р. Печоры, долины рек Шапкиной, Куи и Черной.

По второй обозначенной проблеме также нет единой точки зрения. Для выявления региональной морской трансгрессии на протяжении позднеледниковья и голоцена в последние годы получил распространение метод изоляционных бассейнов (Donner et al., 1977; Long et al., 2011; Колька и др., 2013). Этот метод с использованием данных изучения литологии и диатомей был апробирован на сопредельных территориях: побережье Белого и Баренцева морей, внутренней части Кольского региона (Колька и др., 2015; Толстоброва и др., 2022). По результатам изучения изолированных бассейнов на побережье Белого моря и в юго-западной части побережья Баренцева моря выявлены два трансгрессивно-регрессивных цикла изменения относительного уровня моря в позднеледниковье и в раннем-среднем голоцене; для внутренней части Кольского региона зафиксировано минимальное проникновение морских вод в позднеледниковье. Однако для восточной части южного побережья Баренцева моря такие выводы делать преждевременно, так как опубликованные альгологические данные касаются в основном современных местообитаний диатомей (Стенина, 2010; Стенина, Патова, 2010). Об анализе их ископаемых комплексов кратко упоминается лишь единожды (Лавров, Потапенко, 2012).

Изменения растительного покрова, сопровождавшие этапы гидрологического режима озер на Баренцевоморском побережье, охарактеризованы в публикациях палинологов преимущественно по Кольскому полуострову (Сапелко, Анисимов, Носевич, 2016; Сапелко и др., 2018 и др.). Палинологические реконструкции условий в голоцене на южном побережье были проведены в районе дельты р. Печоры (Болиховская и др., 1988; Вейнбергс и др., 1995; Kaakinen, Eronen, 2002; Väiliranta et al., 2003; Нигаматзянова и др., 2022; Лаптева, Корона, 2022) и Хайпудырской губы (Velichko et al., 1997; Andreev, Klimanov, 2000).

Учитывая близкое расположение района исследований к береговой линии Баренцева моря (в 3.5 км от берега по прямой линии и 7 км — по речному руслу) в приустьевой области р. Черной и возможности используемых авторами методов, было целесообразным обратить особое внимание на вероятность проникновения сюда морских вод в позднеледниковье и голоцене. Актуальной задачей также являлось изучение субрецентных палиноспектров поверхностных проб на территории исследований, так как данных по столь труднодоступным районам недостаточно (рис. 1).

Геолого-геоморфологическое строение территории

Согласно Карте четвертичных образований, составленной А. С. Лавровым и Л. М. Потапенко (2005) по материалам аэрокосмических съемок и изучения строения осадков, долина р. Черной занимает Паханческую (Хорейверскую) депрессию между Вангурейской и Янейской платообразными возвышенностями (рис. 2). Исследователями выделена Большеземельская ледниковая лопасть, входившая в состав Баренцевоморско-Новоземельско-Карского ледникового покрова и развивавшаяся в полярное время. Однако, согласно Карте четвертичных образований территории РФ, ее континентального шельфа и прилегающих глубоководных акваторий масштаба 1:2 500 000 (2019), ледниковые осадки относятся к лайскому горизонту. Район наших исследований расположен в области развития полого-холмистого моренного рельефа, формирующего южный берег Паханческой губы.

Юго-восточное побережье Баренцева моря на протяжении 800 км от Чешской до Хайпудырской губ занимает прибрежная терраса высотой 4–5 м у морского берега до 25–30 м у тылового шва, без выраженных в рельефе уступов и с разной степенью выраженности тылового шва. В районах приращения террасы к пологим склонам ледникового рельефа тыловой шов можно наблюдать только с дневной поверхности. Прибрежную террасу слагают хорошо сортированные пески с прослоями плохо окатанного обломочного материала. В цоколе Чешской и Хайпудырской губ, о-ва Сенгейский и в других районах залегает морена последнего оледенения (Лавров, Потапенко, 2005). Однако другие исследователи на данной территории не обнаруживают прибрежную террасу, объясняя образование осадков эоловыми процессами (Mangerud et al., 1999).

Южнее, в речной долине, определены примыкающие к формам ледникового рельефа фрагменты урерьяхской эпигенетической террасы ледниковых контактов — разновидности террасы интрагляциального эстуария. Терраса располагается в области слияния р. Черной с ее притоком р. Урерьяхой и сложена хорошо сортированными мелкозернистыми горизонтально-слоистыми песками средней мощностью 3–4 м. А. С. Лавров и Л. М. Потапенко (2012) предполагают ее позднеледниковый возраст.

По результатам детального изучения вещественного состава отложений, вскрытых в береговых обнажениях долины р. Черной, Л. Н. Андреичевой (2002) в строении толщи выделены осадки печорского, вычегодского и полярного ледниковых горизонтов, а также разделяющие их отложения родионовского и сулинского межледниковых горизонтов. Осадки ледникового генезиса лайского времени не обнаружены. Лайские образования представлены перигляциальным аллювием.

Объект и методика исследований

Исследуемая территория относится к подзоне северных гипоарктических тундр с преобладанием в растительном покрове кустарничково-моховых ассоциаций с *Betula nana*, *Loiseleuria procumbens* и *Dryas octopetala*. Кустарниковые сообщества (в основном невысокие ивняки) занимают поймы и депрессии склонов

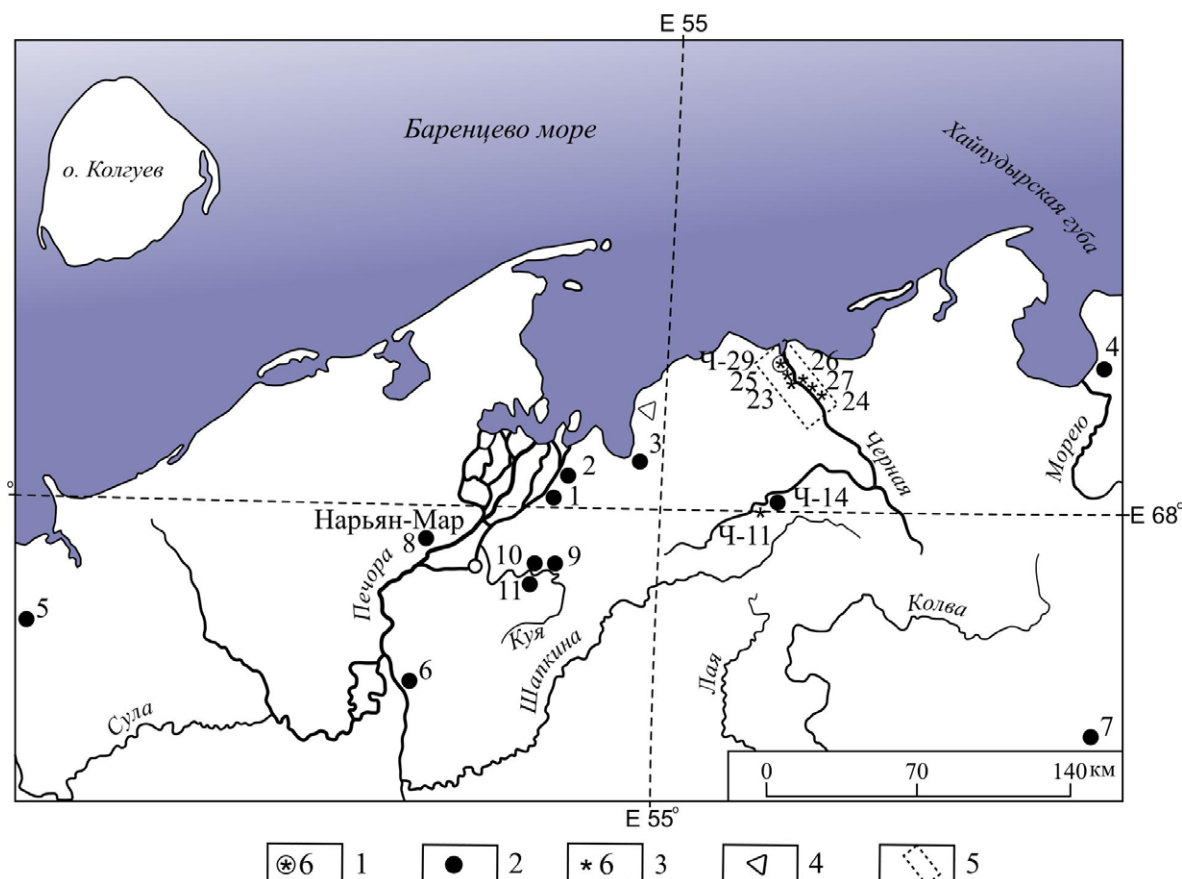


Рис. 1. Схема расположения изученных разрезов в районе работ (юго-восток Баренцевоморского региона). Условные обозначения: 1 — изученный разрез; 2 — ранее изученные разрезы с палинологическими данными; 3 — места отбора поверхностных пыльцевых проб; 4 — находки современных диатомей (Стенина, 2010; Стенина, Патова, 2010); 5 — район исследований. Ранее опубликованные палинологические данные: 1 — Kaakinen, Eronen, 2002; Välranta et al., 2003; Болиховская и др., 1988; 2 — Нигаматзянова и др., 2022; 3 — Вейнбергс и др., 1995; 4 — Andreev, Klimanov, 2000; Velichko et al., 1997; 5 — Paus, Svendsen, 2003; 6 — Никифорова, 1982; 7 — Kullti et al., 2004; 8 — Лаптева, Корона, 2022; 9–11 — Голубева, Марченко-Вагапова, Исаков, 2024

Fig. 1. Map of the studied sections (Southeastern Barents region). Legend: 1 — studied section; 2 — previously obtained palynological data; 3 — locations of surface pollen sampling; 4 — finds of modern diatoms (Stenina, 2010; Stenina, Patova, 2010). 5 — study area. Previously pollen data: 1 — Kaakinen, Eronen, 2002; Välranta et al., 2001; Bolikhovskaya et al., 1988; 2 — Nigamatzyanova et al., 2022; 3 — Veinbergs et al., 1995; 4 — Andreev, Klimanov, 2000; Velichko et al., 1997; 5 — Paus, Svendsen, 2003; 6 — Nikiforova, 1982; 7 — Kullti et al., 2004; 8 — Lapteva, Korona, 2011; 9–11 — Golubeva, Marchenko-Vagapova, Isakov, 2024

(Юрцев и др., 1978). Согласно Климатическому атласу СССР (1960), для района исследований характерны следующие климатические параметры: температура воздуха в январе составляет $-17...-18^{\circ}\text{C}$, температура июля: $9-10^{\circ}\text{C}$, годовая амплитуда температур воздуха равна $27-28^{\circ}\text{C}$. Количество осадков в году — 350 мм.

Изучено береговое обнажение Ч-29, расположенное на левом берегу р. Черной в 3.7 км от д. Черной вверх по течению и в 7 км от устья реки ($68^{\circ}33'51,22''\text{с. ш.}, 56^{\circ}31'32,40''\text{в. д.}$ (WGS84)). Его выходы наблюдаются на протяжении 320 м. В районе исследований развит вечномёрзлый торфяной массив с буграми пучения площадью около 30 км^2 . Бугры преимущественно продолговатой формы, имеют высоту до 0.5–2 м и размеры в поперечнике от 1 до 4 м, часто рассредоточены и разнонаправлены в пределах массива.

По нашим наблюдениям, на буграх вечномёрзлого торфяного массива произрастают злаки, в межгорных понижениях — ива, сабельник болотный, осоки, сфагнум, кукушкин лен, редко — крестоцветные, гераниевые. По берегу развиты травянистые сообщества из злаков, осок, виолы, чемерицы, пижмы, неза-

будки, ивы, ромашки, гераниевых и мытника. В понижениях рельефа ива и карликовая береза образуют кустарниковые заросли.

В обнажении высотой около 12 м вскрыты отложения бугристых болот, представленные торфом с массивной и шлировой криоструктурами мощностью 1.2 м. Они залегают на моренной толще видимой мощностью до 9.7 м от уреза воды, перекрытой прослоями супеси и оторфованного суглинка с редкими неокатанными обломками пород и мелкими гнездами алевритистого песка мощностью 0.15 м и 1.15 м соответственно.

Проведены спорово-пыльцевой и диатомовый анализы 32 образцов из слоёв 3–5 (глина, торф) обн. Ч-29 (рис. 1).

Химическую обработку проб для палинологических исследований осуществляли с использованием общепринятых методик (Пыльцевой анализ, 1950). Изучение спор и пылець проводили на цифровом биологическом микроскопе «UDFU 300» при увеличении $500\times$. Спорово-пыльцевые диаграммы строились с помощью программы Tilia. При расчете результатов спо-

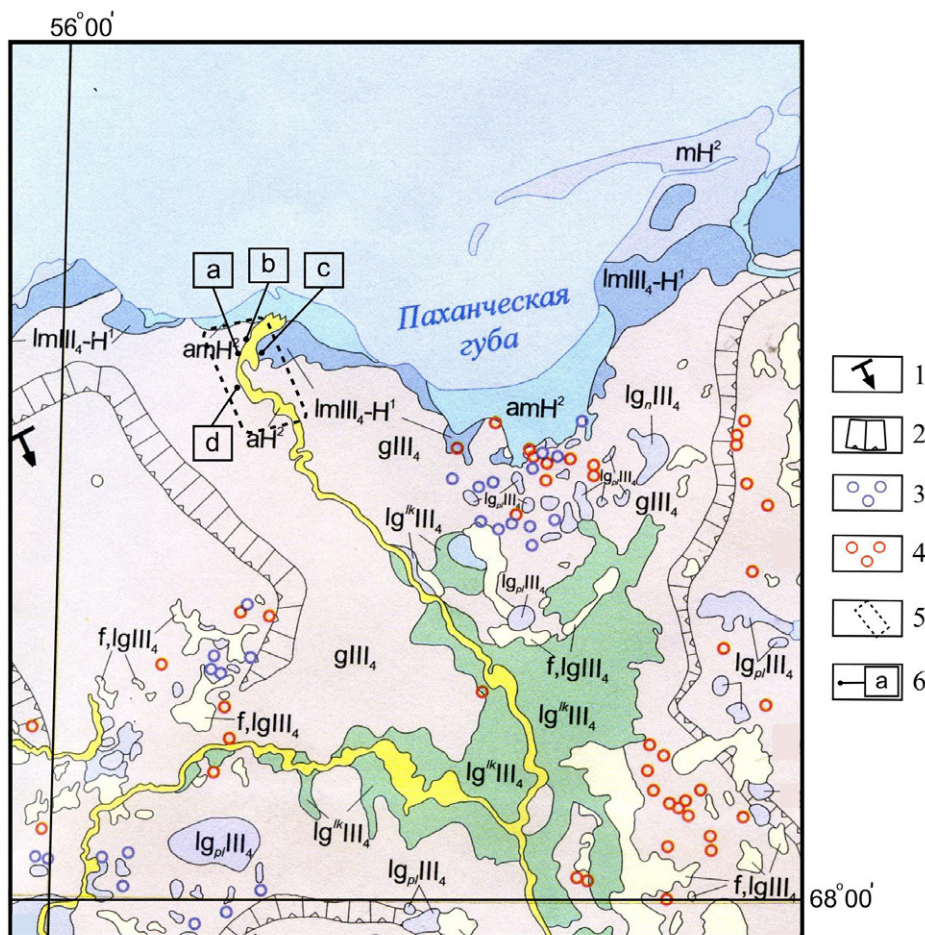


Рис. 2. Геоморфологическое строение района исследований. Условные обозначения к фрагменту карты четвертичных отложений (по: Лавров, Потапенко, 2012): 1 — направление наклона поверхности гляциоизостатических плато и предполагаемая амплитуда поднятия; 2 — уступы гляциоизостатических плато; 3 — проталинные лимнокамы; 4 — камы, не выражающиеся в масштабе; 5 — район исследований; 6 — фото рельефа; $gIII_4$ — рельеф основной (донной и абляционной) морены; $f, IgIII_4$ — камы, камовые поля, камовые террасы; Ig_nIII_4 — террасы наледниковых интрагляциальных озер; $Ig_{pl}III_4$ — лимнокамы проталинные (субаэральные); Ig^kIII_4 — терраса ледниковых контактов (эпигенетическая) до 100 м; $ImIII_4-H_1$ — прибрежная (озерно-морская) терраса до 20 м (абс. отм.); aH_2 — пойма; amH_2 — аллювиально-морская терраса; mH_2 — марши, пляжи, бары, косы, пересыпи

Fig. 2. Geomorphological structure of the study area. Legend for the map of Quaternary deposits fragment (according to Lavrov, Potapenko, 2012): 1 — direction of inclination of the surface of glacioisostatic plateaus and the assumed amplitude of uplift; 2 — scarps of glacioisostatic plateaus; 3 — inversion fluvioglacial landforms formed in subaerial conditions — thawed limnokams, not expressed to scale; 4 — kames, not expressed to scale; 5 — our research area; 6 — photo of the relief; $gIII_4$ — relief of the main (bottom and ablation) moraine; $f, IgIII_4$ — kames, kame fields, kame terraces; Ig_nIII_4 — terraces of supraglacial intraglacial lakes; $Ig_{pl}III_4$ — thawed (subaerial) limnokams; Ig^kIII_4 — glacial contact terrace (epigenetic) up to 100 m; $ImIII_4-H_1$ — coastal (lake-marine) terrace up to 20 m (elevation); aH_2 — floodplain; amH_2 — alluvial-marine terrace; mH_2 — marches, beaches, bars, spits, islets

рово-пыльцевого анализа за 100 % принималась сумма пыльцы древесных пород (AP) и травянистых растений (NAP), исходя из которой определялись процентные содержания пыльцы и спор, в том числе переложенных и непыльцевых палиноморф. Также обращалось внимание на присутствие в образцах микро-частиц угля размером более 10 микрон. При определении водорослей *Pediastrum* учитывались тестации с сохранностью не менее 60 %.

С целью повышения корректности интерпретации ископаемых спорово-пыльцевых спектров проведен анализ 12 поверхностных проб, отобранных в районе исследований из верхних 1–2 см почвы или моховых подушек. Точки отбора проб расположены в пределах зоны кустарничково-моховой северной тундры в разных геоморфологических условиях: низкой и высокой пойм реки, надпойменной террасы, бугристого торфяника, приручейных и приозерных местообитаний (рис. 1). Выделенные локальные пыльцевые зоны сопоставлялись с ранее полученной палинологической характеристикой позднеледниковых озерно-болотных отложений в среднем течении р. Черной (Максимов и др., 2021).

Обработка образцов для диатомового анализа проводилась по общепринятым методикам (Диатомовый..., 1949–1950; Глезер и др., 1974). Створки изучались с помощью микроскопа Motic BA 300 при увеличении 1000×.

Радиоуглеродное датирование образцов торфа из обн. Ч-29 и древесины из обн. Ч-26 выполнено в ЦКП «Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии» Института географии РАН (Москва). В данной статье используется калиброванный возраст (2σ), значения которого рассчитаны при калибровке радиоуглеродных дат с помощью программы CALIBREV 8.2 (табл.). Возрастная принадлежность морены в основании изученного разреза установлена на основании OSL-датировок подморенных толщ, вскрытых в низовьях Куи и Черной. OSL-датирование выполнено в лаборатории OSL ФГБУ «ВСЕГЕИ» (Санкт-Петербург). В ходе работы над статьей использовалось

оборудование ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар).

Результаты

Литолическое описание и датирование осадков

Расчистка мощностью 2.95 м расположена в 9 м над урезом воды и вскрывает наиболее полный разрез голоцена в пределах изученного нами участка приустьевой области реки. Описание разреза снизу вверх (см).

1. Суглинок валунный серого цвета с сизым оттенком. Контакт с вышележающим слоем четкий, неровный, наклонный (со следами сплыва) и элементами падения: угол падения 45°, азимут падения 15°. Мощность 25 см.

2. Супесь серо-коричневая, ожелезненная. Слой имеет неправильную форму в виде затека. Контакт с вышележающим слоем четкий, неровный, наклонный, подчеркнут ожелезнением. Контакт между слоями 2 и 3 идентичен нижележащему. Мощность 10 см.

3. Глина сизо-коричневая, с редкими валунами, гальками, гравием и мелкими включениями (окатышами) алевритистого пылеватого светло-серого песка диаметром до 1 см. Наблюдается ожелезнение в виде пятен и редкие гнезда оторфованного темно-коричневого суглинка размером около 10 × 10 см. В верхней части (гл. 135–105 см) редко наблюдаются обломки пород. Контакт с верхним слоем четкий, субгоризонтальный. Мощность 155 см.

4. Торф черный, хорошо разложившийся, с остатками веток, переходящий вверх по разрезу с гл. 50 см в торф темно-коричневый, хорошо разложившийся. С гл. 95 см и выше — торф мерзлый, криотекстура массивная, встречаются кристаллы и тонкие прожилки льда толщиной ~ 1 мм. Мощность 80 см.

Отложения торфа из сл. 4 датированы на глубинах 50–55 см и 75–80 см: 5720 ± 100 ¹⁴C л. н. (6306–6682 кал. л. н.) (IGAN 10838) и 7180 ± 150 ¹⁴C л. н. (7696–8222 кал. л. н.) (IGAN 10839).

5. Почвенно-растительный слой. Мощность 25 см.

Таблица 1. Результаты датирования образцов

Table 1. Results of dating

Радиоуглеродное датирование Radiocarbon dating							
№ п/п	Лабораторный номер Laboratory number	Полевой номер Field number	Глубина отбора, м Sampling depth, m	Материал Material	¹⁴ C, л. н. yrs ago	¹⁴ C, кал. л. н. (1σ) yrs ago (1σ)	¹⁴ C, кал. л. н. (2σ) yrs ago (2σ)
1	IGAN10834a	26/56	1.1–1.15	древесина / wood	3060±70	3776–3788	3698–3709
2	IGAN10838	29-1-1	0.5–0.55	торф / peat	5720±100	6405–6429	6306–6682
3	IGAN10839	29-1-2	0.75–0.8	торф / peat	7180±150	7855–7902	7696–8222
Датирование методом OSL OSL dating							
№ п/п	Лабораторный номер Laboratory number	Полевой номер Field number	Минерал Mineral		Возраст, тыс. лет Age, thousand years		
1	RGI- 1421	K-15-2	Кварцевые зерна Quartz grains		55 ± 4		
2	RGI- 1423	Ч-24-2	Кварцевые зерна Quartz grains		65 ± 6		



Палинологический анализ поверхностных проб приустьевой области р. Черной

Палинологическое изучение поверхностных проб является для авторов дополнительной методической основой. В будущем оно будет продолжено и, учитывая труднодоступность изученной территории и недостаточное количество опубликованных данных, будет представлять интерес при составлении базы данных России.

Выявлены типичные тундровые спорово-пыльцевые спектры (СПС) и зависимость их состава от геоморфологической позиции опробованных местообитаний (рис. 3). СПС из массива *многолетнемерзлого торфяника* (пробы 29а, 29б) характеризуются максимальным по сравнению с остальными пробами количеством пыльцы трав (77–84 %), среди которой преобладает пыльца злаков (65–80 %). Из непыльцевых палиноморф определены грибы.

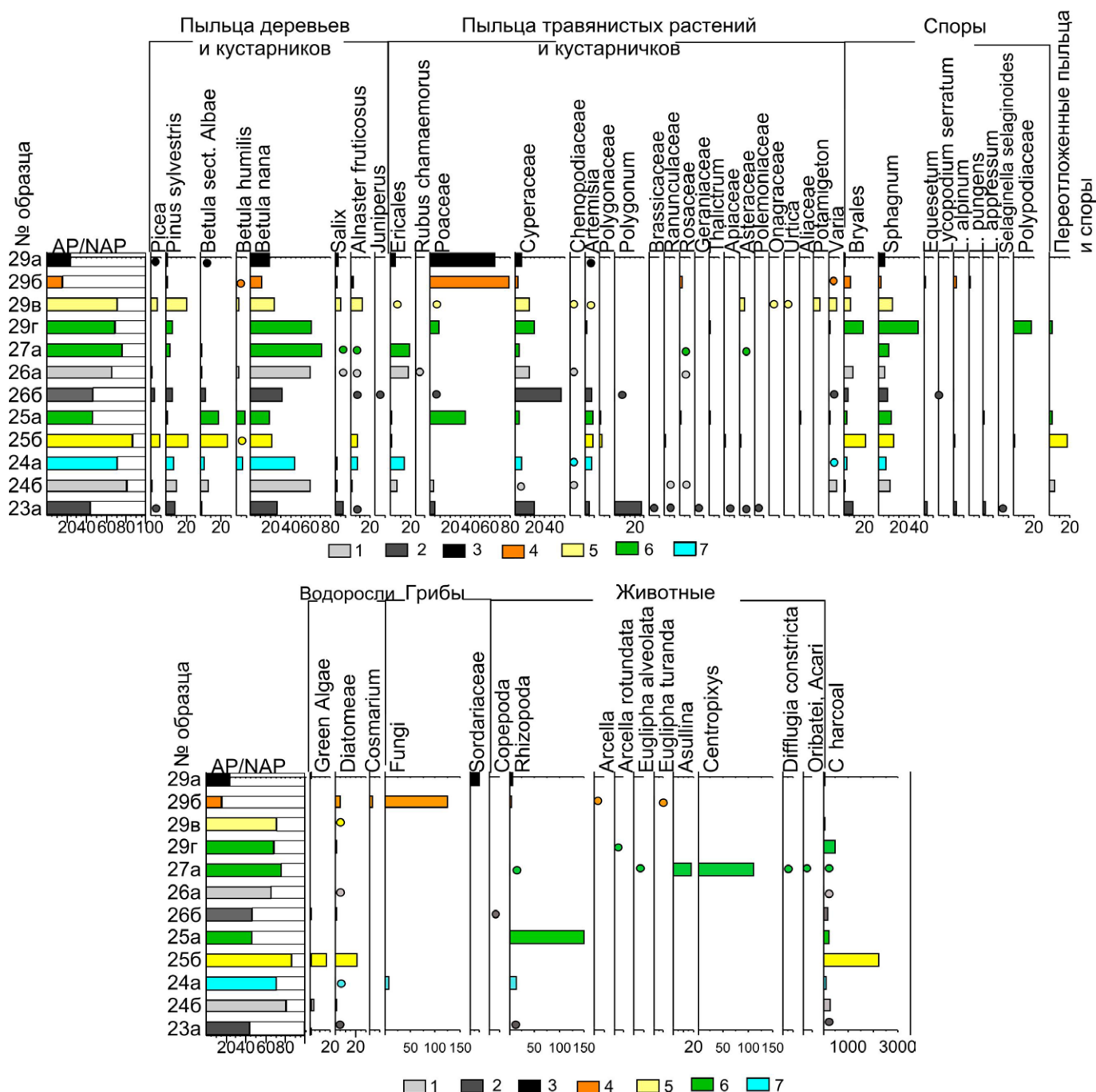


Рис. 3. Спорово-пыльцевая диаграмма поверхностных спектров из северной субарктической тундры в пределах Большеземельской тундры в низовье р. Черной (AP+NAP = 100 %). Геоморфологическая позиция точек отбора проб: 1 — моренная гряда (вершина; травяно-кустарничковые заросли); 2 — моренная гряда (подножие, терраса; травяно-кустарничковые заросли); 3 — бугристый торфяник (бугор пучения); 4 — бугристый торфяник (межбугорное понижение); 5 — низкая пойма; 6 — высокая пойма; 7 — термокарстовое озеро

Fig. 3. Spore-pollen diagram of surface spectra from the northern subarctic tundra within the Bolshezemelskaya tundra in the lower reaches of the Chernaya River (AP+NAP = 100%). Geomorphological position of sampling points: 1 — moraine ridge (summit; grass-shrub thickets); 2 — moraine ridge (foot, terrace; grass-shrub thickets); 3 — hummocky peat bog (frost mound); 4 — hummocky peat bog (inter-mound depression); 5 — low floodplain; 6 — high floodplain; 7 — thermokarst lake

В подавляющем большинстве проб в составе СПС преобладает пыльца деревьев и кустарников (66–86 %) при доминировании *Betula nana* (44–70 %). Исключение составляют пробы 29в и 25б из *низкой поймы* с повышенным количеством пыльцы деревьев (*Picea* sp., *Pinus sylvestris*, *Betula* sect. *Albae* — в сумме 26–55 %) за счет привноса ее речными потоками. В некоторых пробах пыльцы группы древесно-кустарниковой и кустарниково-травянистой растительности образуют примерно равные доли в диапазоне 43–57 %.

В СПС из отложений *моренной гряды* наблюдается тенденция к сокращению участия пыльцы травяно-кустарниковой группы (от 60 до 20%) и увеличению доли пыльцы кустарниково-древесной группы по направлению от подножия к вершине гряды. Отмечена следующая тенденция в составе группы NAP: с повышением высоты в СПС чаще встречается пыльца кустарничков *Ericales* sp. и реже обнаруживается пыльца осок. При этом несколько сокращается разнообразие трав. В СПС у подножия определены Poaceae, *Polygonum* sp., Cyperaceae, *Artemisia* sp., Brassicaceae, Ranunculaceae, Geraniaceae, Apiaceae, Asteraceae, Onagraceae.

СПС из суглинистых осадков *высокой поймы* характеризуются значительным участием пыльцы карликовой березки, злаков, осок и верескоцветных. Отличительной особенностью СПС из приручейных (обр. 27а), приозерных (обр. 24а) и переувлажненных (обр. 25а) местообитаний является присутствие среди непыльцевых палиноморф разнообразных раковинных амёб. Наличие микрочастиц угля в СПС в достаточном количестве объясняется его привносом из больших скоплений каменного угля близ д. Черная.

Результаты палинологического анализа фоссильных спектров

Палинозона (ПЗ) I (210–255 см)

Основу СПС образуют переотложенные формы. Присутствуют лишь единичные пыльцевые зерна берез, полыни, маревых, смолевки, споры сфагновых мхов и папоротников хорошей сохранности. Обращает на себя внимание большое количество пресноводных холодолюбивых водорослей *Pediastrum integrum* в начале зоны и разнотипных зеленых водорослей выше по разрезу. В верхнем образце обнаружены грибы *Glomus*. Во всех образцах содержится много частиц угля (рис. 4, 5).

Палинозона II (170–210 см)

Для зоны характерна низкая концентрация пыльцы и большое количество переотложенных пыльцы и спор. Преобладает пыльца карликовой березы разной степени сохранности (35–76 %). В обр. 5 на гл. 200 см определено незначительное содержание пыльцы ольховника и ивы (5–6 %). Среди пыльцы травянистых растений достаточно хорошей сохранности доминирует пыльца Poaceae (до 24 %), в нижней части палинозоны также наблюдаются в меньшем количестве Cyperaceae (до 11 %), *Artemisia* sp. (10 %) и единичные зерна Chenopodiaceae и *Litrum miritimus*. В верхней части зоны состав группы трав менее разнообразен: наряду с преобладающими злаками встречена пыльца Caryophyllaceae. В нижней части зоны численность

спор незначительна, встречены зеленые и сфагновые мхи, папоротники. Из непыльцевых палиноморф определены те же, что и в предыдущей зоне, зеленые водоросли. При этом значительно сократилось участие *Pediastrum*.

Палинозона III (105–170 см)

ПЗ характеризуется изменениями в группе пыльцы трав: исчезает Poaceae, увеличивается доля Cyperaceae с максимумом 64 % в верхней части ПЗ, в которой к тому же сокращается количество пыльцы ксерофильных растений *Artemisia* sp. и Chenopodiaceae с 26 % до единичных зерен. В верхнем образце (гл. 105 см) пыльца осок зачастую образует скопления, посчитанные за одно зерно. Споры в спектрах не обнаружены. В группе водных палиноморф состав зеленых водорослей становится менее разнообразным, исчезают пресноводные хлорофитовые водоросли рода *Pediastrum*.

Образец суглинка на контакте сл. 3 и 4 с гл. 105–95 см не содержит палиноморфы хорошей сохранности, отмечены лишь единичные зерна переотложенной пыльцы и многочисленные углистые частицы.

Палинозона IV (90–95 см)

Спектры этой ПЗ и выше по разрезу отличаются отсутствием дочетвертичных и переотложенных форм. Группы древесных и травянистых растений содержатся примерно в равных количествах (по 44–55 %). В первой группе по-прежнему доминирует *Betula nana* (38–44 %). В составе второй группы наряду с преобладающей пыльцой семейства Cyperaceae (22–47 %) появляется пыльца Poaceae (6–14 %), *Ericales* sp. (8 %) и в единичном количестве Rosaceae, Fabaceae, *Artemisia* sp., Caryophyllaceae и Asteraceae. Споры содержатся в незначительных количествах и представлены *Sphagnum* sp., *Bryales* sp., *Equisetum* sp., *Lycopodium pungens* и Polypodiaceae. Микрочастицы угля в спектрах ПЗ и выше не обнаружены.

Палинозона V (50–90 см)

ПЗ выделена на основании значительных изменений во всех группах палиноморф и подразделится на две подзоны: ПЗ Va в интервале 55–90 см и ПЗ Vb в интервале 50–55 см. В группе пыльцы деревьев и кустарников ПЗ Va резко увеличивается количество *Betula* sect. *Albae* (28–50 %), значительно уменьшается доля *Betula nana* (с 31 до 4 %), появляется единичная пыльца хвойных деревьев *Picea* sp. (до 2 %), *Pinus sylvestris* и кустарников *Juniperus* sp. Среди пыльцы травянистых появляются водные *Typha latifolia*, *Potamogeton* sp., Lemnaceae, Alismataceae. В группе спор существенно чаще встречаются *Bryales* sp. и *Equisetum* sp. В числе непыльцевых палиноморф пресноводные водоросли отличаются наиболее разнообразным составом: среди *Pediastrum* наряду с *P. integrum* впервые определены *P. duplex forma*, *P. duplex* var. *rugulosum*, *P. boryanum* var. *boryanum*, *P. boryanum* var. *pseudoglaurum*, появляется *Cosmarium*. Впервые также обнаружены микроостатки различных животных: раковинных амёб, клещей, ветвистоусых и веслоногих рачков, а также яиц тихоходок. Осадки на уровне нижней части подзоны датированы 7180 ± 150 ^{14}C л. н. (7696–8222 кал. л. н.) (IGAN 10839).

Спектры ПЗ Vb отличаются ростом кривой ели и сосны, причем участие ели является максимальным,

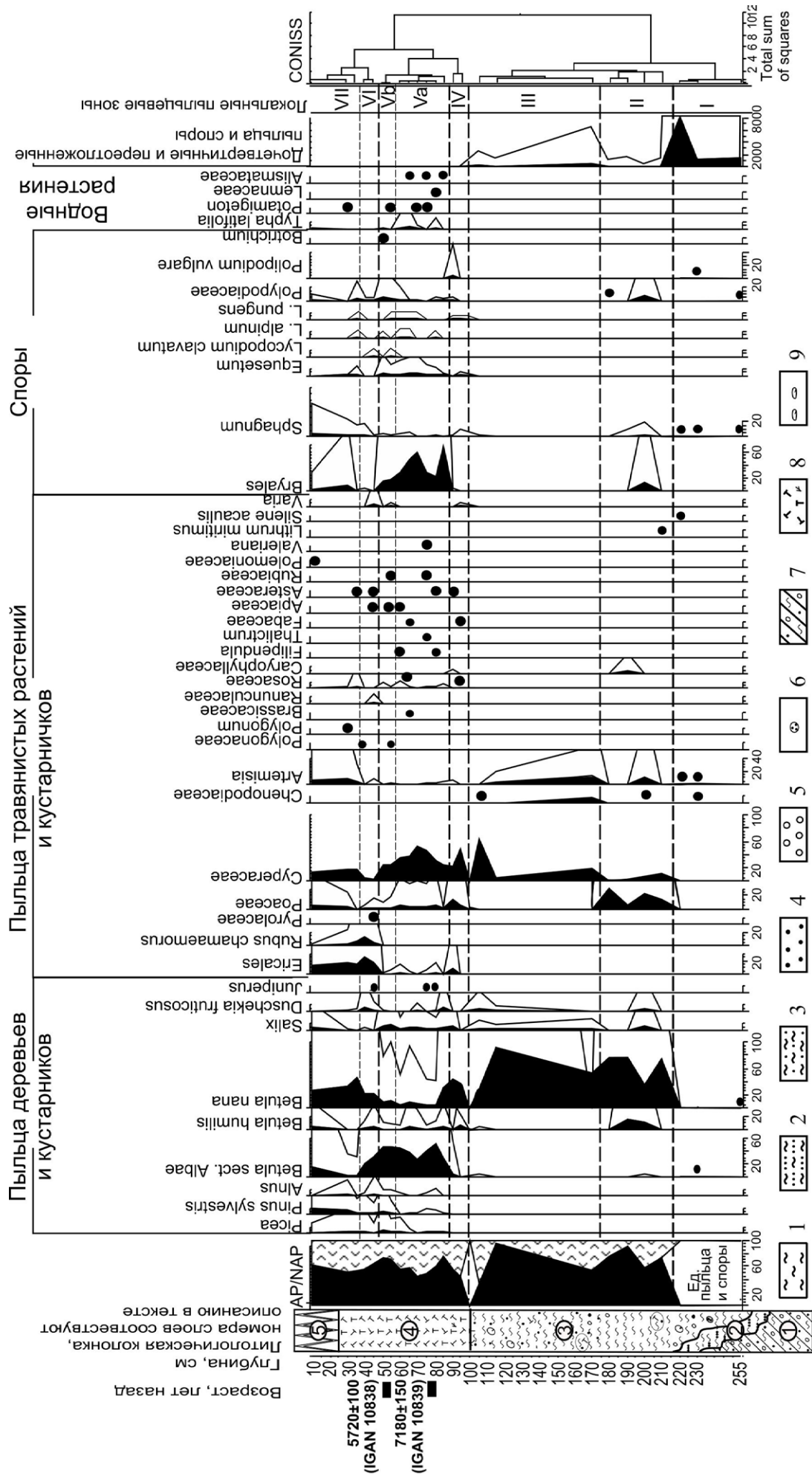


Рис. 4. Спорово-пыльцевая диаграмма отложений в обн. Ч-29. Условные обозначения: 1 — глина; 2 — супесь; 3 — суглинок; 4 — гравий; 5 — галька; 6 — окатыши алевроит-стого песка; 7 — валунный суглинок; 8 — торф; 9 — обломки пород; точкой на диаграмме обозначено содержание палиноморф в единичном количестве

Fig. 4. Pollen and spore diagram in Ch-29 palsa section in the lower Chernaya River. Legend: 1 — clay; 2 — sandy loam; 3 — loam; 4 — gravel; 5 — pebbles; 6 — sand pellets; 7 — boulder loam; 8 — peat; 9 — rock fragments; minor taxa (less than 2%) are expressed as dots

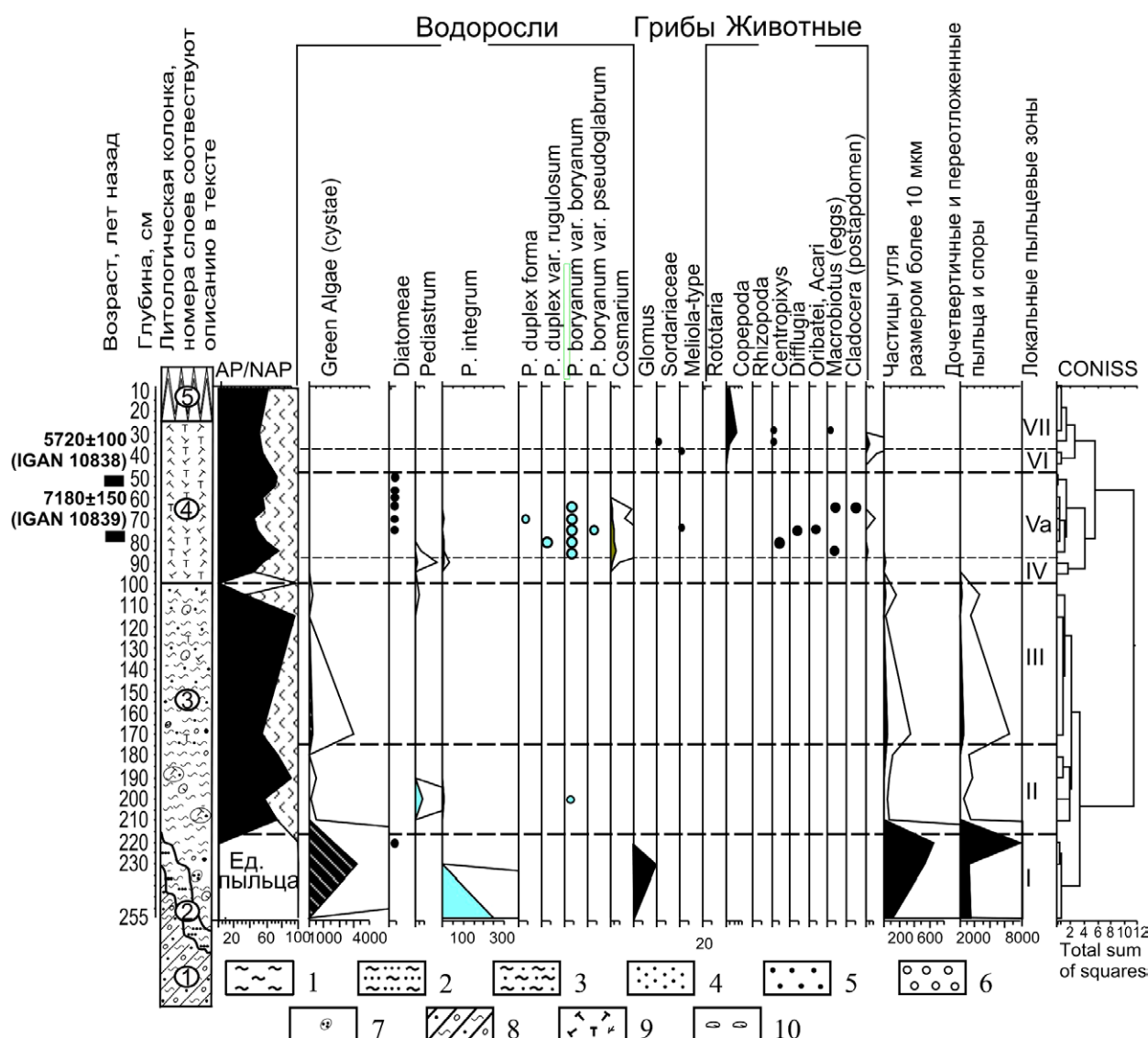


Рис. 5. Диаграмма непыльцевых палиноморфов отложений в обнажении Ч-29 (непыльцевые палиноморфы).
Условные обозначения — на рис. 4

Fig. 5. Non-pollen palynomorphs diagram of the Ch-29 palssa section in the lower Chernaya River. Legend is in Fig. 4

но не столь значительным (до 5 %). Пыльцы можжевельника не встречено. Изменения коснулись и других групп палиноморфов. В группе трав и кустарничков сокращается доля осок и прибрежно-водных трав, а в группе спор уменьшается участие зеленых мхов и увеличивается — папоротников. Осадки в интервале 50–55 см датированы 5720 ± 100 ^{14}C л. н. (6306–6682 кал. л. н.) (IGAN 10838).

Палинозона VI (40–50 см)

Обращает на себя внимание рост кривых пыльцы кустарничков (карликовой березы — 21 % и ольховника — до 5 %) и падение кривой древовидных берез (21–32 %). Вновь появляется единичная пыльца можжевельника. Среди пыльцы трав увеличивается количество пыльцы кустарничков верескоцветных (18–26 %), морошки (6–13 %) и грушанки (единичные зерна).

Палинозона VII (10–50 см)

В составе спектров преобладает пыльца карликовой березы (26–45 %). Пыльца деревьев представлена *Betula* sect. *Albae* (3–16 %), *Picea* sp. (до 1–3 %) и *Pinus sylvestris* (2–10 %). В группе пыльцы травянистых рас-

тений доминируют верескоцветные (14–16 %) и осоковые (14–18 %), в меньшем количестве присутствуют злаковые (2–5 %) и полыни (3–8 %). В группе спор повышается роль зеленых и сфагновых мхов. Среди непыльцевых палиноморфов определены остатки животных-сфагнобионтов и почвенных грибов.

Результаты диатомового анализа

В 26 образцах из 32 створки диатомовых водорослей отсутствуют либо обнаружены единичные центрические водоросли (преимущественно в виде обломков). Сообщества диатомей определены в 6 образцах, отобранных в интервале глубин 10–75 см. Установленный комплекс в целом включает 54 вида и разновидности, относящихся к 22 родам в количестве от 194 до 7438 экземпляров на препарат. Класс *Centrophyceae* представлен видами *Aulacoseira islandica* и *Stephanodiscus* sp., встречающимися с оценкой обилия «редко». Остальные створки относятся к классу *Pennatophyceae*. Господствующее положение в комплексе занимают виды родов *Pinnularia* (12 форм), *Eunotia* (11) и *Navicula* (9). В целом виды немногочисленны: с оценкой обилия



«в массе» встречена *Eunotia fallax*, оценкой обилия «очень часто» отмечены *Eunotia parallela*, *E. exigua*, *E. lunaris*, *E. septentrionalis*, *Pinnularia viridis*, *P. subcapitata* и некоторые другие (рис. 6).

Образцы из сл. 3 (в интервале глубин 100–215 (260) см, глина сизо-коричневая с редкими гравием, галькой и валунами, включениями гнезд песка) практически немые. В них обнаружены лишь единичные обломки и створки диатомеи *Paralia sulcata*, спикулы губок. В более позднее время в результате улучшения климатических условий происходило накопление органического материала в мелководном водоеме (сл. 4, в ин-

тервале глубин 20–100 см, торф). В обр. 22 на гл. 75 см отмечено небольшое количество пресноводных диатомей, где преобладает ацидофил — *Eunotia fallax* (рис. 6). С гл. 45 см и выше (обр. 28–32) в толще торфа встречен достаточно разнообразный и обильный комплекс диатомовых водорослей. Среди отмеченных форм преобладают донные виды (до 67 %; рис. 7). По отношению к солености преобладают индифференты (до 59 %), количество галофобов составляет около 40 %, галофилов — 14 %, встречен единственный вид-мезагалоф *Diploneis interrupta* с низкой оценкой обилия. По отношению к кислотности доминируют ацидофилы — 66 %:

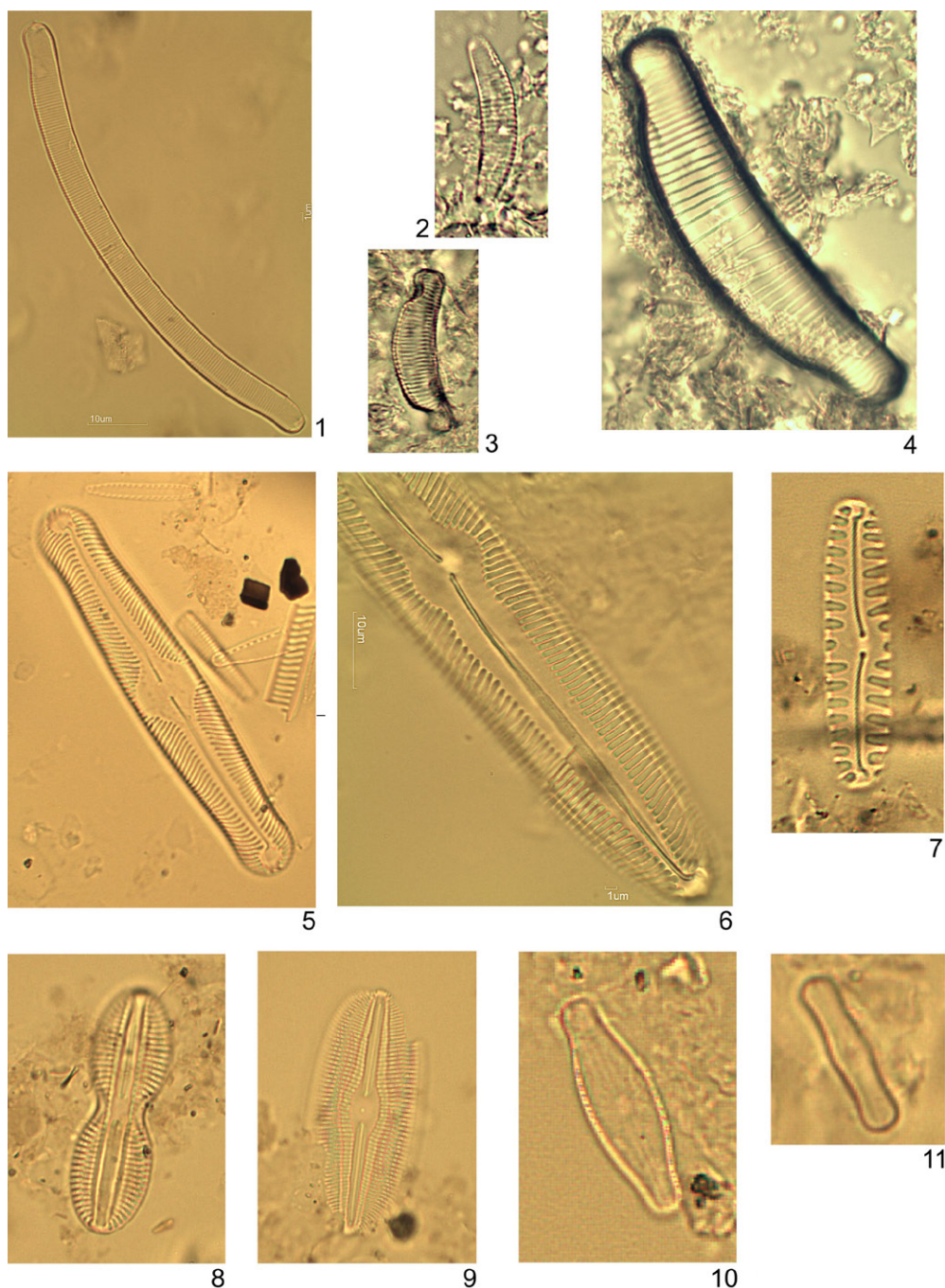


Рис. 6. Диатомеи (фототаблица): 1 — *Eunotiaparella* Ehr., 2 — *E. lunaris* (Her.) Grun., 3 — *E. septentrionalis* Oestr., 4 — *E. praeurupta* Ehr., 5 — *Pinnularia divergens* W. Sm., 6 — *P. maior* (Kütz.) Rabenh., 7 — *P. borealis* Ehr., 8 — *Diploneis interrupta* (Kütz.) Cl., 9 — *D. ovalis* (Hilse) Cl., 10 — *Anomoeoneis brachisira* (Bréb.) Grun., 11 — *Navicula contenta* Grun

Fig. 6. Diatoms (photo table). 1 — *Eunotia parallela* Ehr., 2 — *E. lunaris* (Her.) Grun., 3 — *E. septentrionalis* Oestr., 4 — *E. praeurupta* Ehr., 5 — *Pinnularia divergens* W. Sm., 6 — *P. maior* (Kütz.) Rabenh., 7 — *P. borealis* Ehr., 8 — *Diploneis interrupta* (Kütz.) Cl., 9 — *D. ovalis* (Hilse) Cl., 10 — *Anomoeoneis brachisira* (Bréb.) Grun., 11 — *Navicula contenta* Grun

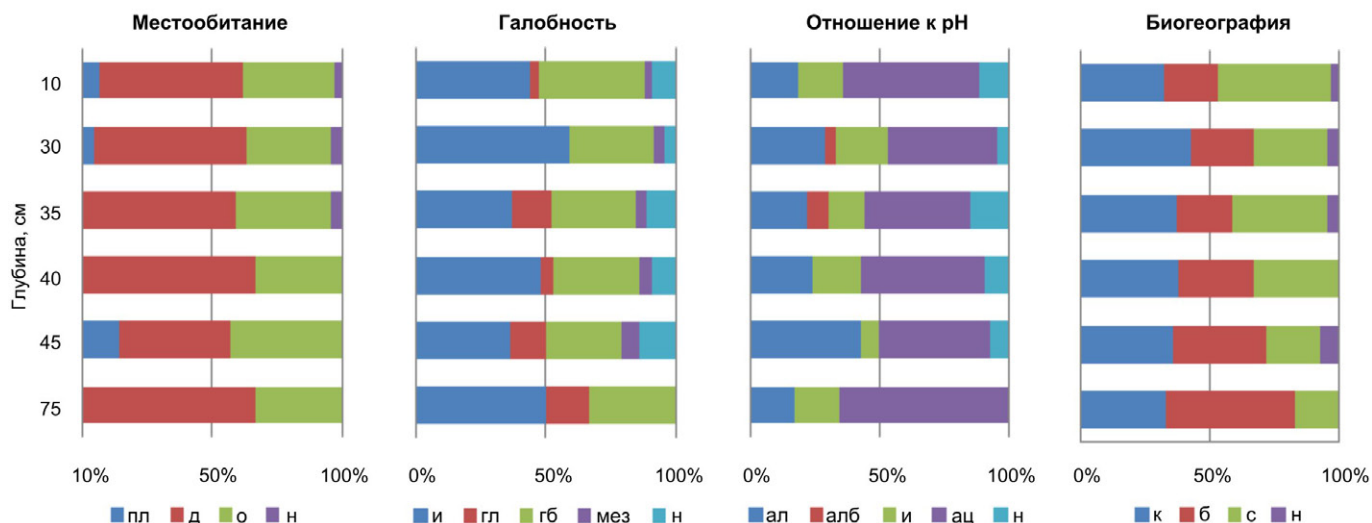


Рис. 7. Экологическая характеристика диатомовых комплексов в обн. Ч-29. Условные обозначения: распределение диатомей по местообитанию (пл — планктонные, д — донные, о — обрастатели), галобности (гб — галофобы, и — индифференты, гл — галофилы, мез — мезогалофы), отношению к pH среды (ац — ацидофилы, и — индифференты, ал — алкалифилы, алб — алкалибионты) и биогеографии (с — северные, к — космополиты, б — бореальные). Во всех подразделах: н — неустановленная экология

Fig. 7. Ecological characteristics of diatom assemblages in Ch-29 site. Legend: distribution of diatoms by habitat: пл — planktonic, д — benthic, о — fouling, halobities: гб — halophobes, и — indifferent, гл — halophiles, мез — mesohalobes, relation to pH of the environment: ац — acidophiles, и — indifferent, ал — alkaliphiles, алб — alkalibionts and biogeographies: с — northern, к — cosmopolitan, б — boreal. In all subsections: н — unspecified ecology

Eunotia fallax с оценкой обилия «в массе», «очень часто» отмечены *Eunotiaparallela*, *E. exigua*, *E. lunaris*, *E. septentrionalis*, *Pinnularia viridis*. Преобладают космополиты, участие бореальных форм убывает вверх по разрезу (с 50 до 21 %), а северных возрастает (с 17 до 44 %).

Обсуждение результатов и выводы

Ландшафтно-климатические условия осадконакопления на территории исследований

Полученные микропалеонтологические данные (пыльцевые и непыльцевые комплексы, диатомовые комплексы) позволили восстановить следующие особенности осадконакопления в течение позднеледникового и голоцена.

Вскрытый в основании разреза валунный суглинок видимой мощностью 9.65 м соотнесен с полярным (осташковским) горизонтом на основании ОСЛ-датирования подстилающих морену осадков в обн. Ч-24-2 в низовье р. Черной и в обн. К-15-2 в низовье р. Куи. Возраст составил 65 ± 6 тыс. л. (RGI-1423) и 55 ± 4 тыс. л. (RGI-1421) соответственно.

Вышезалегающие отложения слоев 2 и 3, представленные супесью и глинами с редкими обломками пород и включениями алевритового пылеватого песка, характеризуются смешанным составом, то есть имеют признаки гляциогенных и ледниково-озерных образований. В осадках отсутствуют такие типичные признаки для аквальных образований, как слоистость и хорошая сортировка, преимущественно песчаный состав, а для морских отложений — фаунистические остатки. Так, морские осадки вдоль берега Паханческой губы образуют моногранулярные пески, глубже — в центральной части — бигранулярные алевритовые пески (Государственная..., 2014). Лимногляциальные образования, слагающие эпигенетическую террасу (терра-

су ледниковых контактов) позднеледникового возраста на участке слияния рек Урерьяхи и Черной, представлены хорошо сортированными горизонтально-слоистыми песками (Лавров, Потапенко, 2005). Для ледниково-озерных отложений характерны ленточная слоистость и рябь течения.

Литологический состав осадков в диапазоне 215–270 см (сл. 2, подошва сл. 3) позволяет отнести их к тиллу сплывания (флоу-тиллу), который образуется в результате стекания вытаявшего материала по склону моренной гряды и накопления в понижении. Подобные отложения являются ледниковым солифлюксом (Каплянская, Тарноградский, 1993). В нижней части глинистой толщи наблюдаются характерные для флоу-тилла диагностические признаки: глиняные или алевритовые окатыши, нарушения на межслойных контактах. В то же время в эрозионной котловине образовался прогляциальный палеоводоем (глинистая пачка на гл. 100–255 см). Возможно, обломочный материал в глинистую толщу попадал при падении с фрагментов ледяной кровли или по трещинам в них, как это происходит в подледных озерно-ледниковых отложениях. Результаты палинологического изучения глинистых осадков в интервале глубин 100–255 см (ПЗ-I–III) указывают на существование в конце позднеледникового небольшого прогляциального, то есть контактирующего со льдом водоема, образованного при деградации полярного оледенения. Состав спектров, на наш взгляд, отражает обстановку озерного осадконакопления, но не в стабильных и слабoproточных условиях, обычных для озер, а при периодическом усилении таяния льда и сноса материала по склонам ледника.

Осадки на гл. 215–255 см (ПЗ-I) содержат обилие пресноводных холодолюбивых водорослей *Pediastrum integrum*, типичных для водоемов с прозрачной водой, и зеленых водорослей. Подобные комплексы зеленых



водорослей были нами обнаружены в ленточных глинах обширного приледникового бассейна в долине р. Сейды (Golubeva, Marchenko-Vagapova, 2024). Присутствие почвенного гриба *Glomus*, множества углистых частиц и переотложенных палиноморф указывает на абразионные склоновые (оплывные) процессы.

Возникающие при дальнейшем таянии льда мутьевые потоки и сплывное поступление взвеси и обломочного материала в озерный бассейн (интервал глубин 100–215 см) вызвали мутность воды в палеоводоеме, о чем свидетельствует исчезновение пресноводных, требовательных к чистой воде водорослей. На уровне 100–175 см (ПЗ-III) озеро, вероятно, испытало некоторое обмеление, усилились абразионные процессы. Об этом говорит появление песчаной составляющей и редких неокатанных обломков пород в глинистых осадках в интервале гл. 105–135 см. В пользу более активных гидродинамических процессов по сравнению с предшествующим интервалом (175–215 см) также говорит увеличение количества переотложенных форм и углистых частиц в спектрах. Ранее подобная взаимосвязь выявлена при изучении морских донных осадков в Баренцевоморском регионе: участие переотложенных спор и пыльцы в составе палиноспектров увеличивалось при усилении гидродинамической активности водоема (Руденко, 2001). В спектрах ПЗ-II преобладает пыльца тундровых кустарничков, злаков, осок, полыни и маревых. Максимум ксерофильных трав (преимущественно злаков) и присутствие пыльцы берез (*Betulas* sect. *Fruticosa* — 10–15 %; *Betula* sect. *Albae* — единичные зерна) указывает на засушливые условия и смягчение сурового климата позднеледниковья, вероятно, в течение беллинга–аллереда. Затем в позднем дриасе при более суровых условиях редкостойная древесная растительность из берез исчезла, а по берегам озера в билиии распространились осоковые заросли (ПЗ-III).

Согласно палинологическим данным по обн. Ч-14 на р. Черной (~ 68.1° с. ш.), в конце позднеледниковья (аллеред, поздний дриас) в среднем течении реки был развит сложный растительный комплекс из березово-елово-сосновых лесных, тундровых и степных сообществ (Максимов и др., 2021). Сходная обстановка в аллереде реконструирована на побережье Чешской губы (~ 66.5° с. ш.) Л. Д. Никифоровой (1982).

Отсутствие палиноморф в образце суглинка на контакте слоев 3 и 4 на гл. 100 см позволяет предположить перерыв в осадконакоплении в результате резкого спада озера.

С глубины 100 см и выше по разрезу фиксируется процесс заболачивания и преобразования палеоводоема в вечномерзлый бугристый торфяной массив. Процесс торфонакопления датирован на глубинах 0.8–0.75 м и 0.45–0.5 м 7180 ± 150 ^{14}C л. н. (7696–8222 кал. л. н.) (IGAN 10839) и 5720 ± 100 ^{14}C л. н. (6306–6682 кал. л. н.) (IGAN 10838) соответственно.

Спектры ПЗ-IV фиксируют резкую смену условий осадконакопления в начале голоцена. Из спектров исчезает дочетвертичная и переотложенная пыльца и споры. Наряду с осоковыми зарослями на переувлажненных субстратах на осушенных участках развивались кустарниковые (карликовая береза, ива), злаковые и луговые сообщества из *Rosaceae*, *Fabaceae*, *Artemisia* sp., *Caryophyllaceae* и *Asteraceae*. Климатические

условия были близки современным. Южнее, в приустьевой части р. Печоры, на основании находок семян и пыльцы древовидной березы и ели установлено их произрастание в окрестностях оз. Голодная Губа в Малоземельской тундре начиная со второй половины пребореального периода. Обнаружены единичные остатки семян и пыльца *Picea obovata* (15 %) (Лаптева, Корона, 2022).

Увеличение количества пыльцы древовидной березы до 30 % при такой же доле пыльцы карликовой березки в СПС выше по разрезу на глубине 85 см свидетельствует о распространении березовых редколесий в результате потепления климата. На произрастание березовых редколесий в период 10.2–8.7 кал. л. н. с учетом пыльцевых данных и датированных макроостатков этих древесных пород, указывают разные коллективы авторов (Kremenetski et al., 1998; Lapteva et al., 2024; Корона и др., 2024). По мнению О. М. Короны с коллегами (2024), в состав березовых редколесий, распространявшихся до ~ 70° с. ш., входила лиственница (количество пыльцы хвойных деревьев не превышает 5 %), в редколесьях на уровне ~ 68.5° с. ш. кроме них участвовала ель (содержание пыльцы ели — более 10 %). Следовательно, осадконакопление торфа в изученном нами разрезе на гл. 85 см происходило во временном интервале 10.2–8.7 кал. л. н. (бореальный период голоцена).

ПЗ-V отражает наиболее благоприятные климатические условия атлантического периода (АТ) голоцена, способствовавшие продвижению границы ели и древовидных берез на север. Осадки на уровне нижней части ПЗ датированы 7696–8222 кал. л. н. (IGAN 10839), а верхней части ПЗ — 6306–6682 кал. л. н. (IGAN 10838). В СПС преобладает *Betula* sect. *Albae* (до 50 %), появляется единичная пыльца хвойных деревьев *Picea* sp. (до 5 %), *Pinus sylvestris* и кустарников *Juniperus* sp. Березовые леса в атлантическом периоде на территории исследований имели самое максимальное распространение за весь голоцен и достигали Баренцево-морского побережья. В то время хвойные породы произрастали лишь в виде отдельных деревьев или разрозненных островков, о чем свидетельствует незначительное количество их пыльцы.

Увеличение разнообразия пресноводных водорослей рода *Pediastrum*, среди которых определены *P. integrum*, *P. duplex forma*, *P. duplex* var. *rugulosum*, *P. boryanum* var. *boryanum* и *P. boryanum* var. *pseudoglabrum*, указывает на прогрев воды в водоеме. Сохранение пресноводных условий подтверждается также появлением требовательных к чистоте воды десмидиевых водорослей *Cosmarium*. В то же время постоянное присутствие в спектрах пыльцы водных макрофитов и максимум спор зеленых мхов говорит о зарастании водоема и распространении гипновых топей. Состав диатомовых сообществ с преобладанием ацидофилов тоже отражает накопление органогенного материала в мелководном водоеме. Для этого этапа характерны активные болотообразовательные процессы. Вероятно, эвтрофные болота в окрестностях существовавшего палеоводоема преобразовывались в мезотрофные.

Состав спектров подзоны Vb свидетельствует о том, что в позднем АТ березовые древостои приобредали более сомкнутый характер, а пресноводные палеоводоемы и заболоченные участки претерпели осуше-

ние. Эти изменения объясняются дальнейшим потеплением климата.

Наши данные о существовании сомкнутого лесного покрова в приустьевой части р. Черной и его продвижении до Баренцевоморского побережья в интервале 8222–6306 кал. л. н. согласуются с результатами по сопредельным территориям. На полуострове Ямал примерно на этой же широте в долинах рек Юрибей (~ 68.5°с. ш.) и Хадытаяха (~ 67.5°с. ш.) березовые редколесья и леса с примесью лиственницы и ели произрастают 8.2–4.2 кал. л. н. В то же время в долине р. Сеяха, расположенной на севере полуострова (~ 70°с. ш.), начиная с 8.7–8.5 кал. л. н. уже происходил сдвиг ареала древовидной березы к югу, на что указывает сокращение ее пыльцы до 10 % (Lapteva et al., 2024).

Осадконакопление торфа в кровле разреза в интервале 10–50 см началось ~ 6500 кал. л. н. в условиях направленного похолодания климата, которое способствовало распространению ерниковых зарослей и сокращению площадей, занятых древесной растительностью. СПС фиксируется произрастание березовых редколесий (ПЗ-VI), вытесненных позднее ерниковыми и осоково-кустарничковыми зарослями (ПЗ-VII). Находки древесных остатков березы из обн. Ч-26 в 5.5 км от изученного обнажения вверх по течению реки (рис. 1), датированных 3600 ± 70 ¹⁴С л. н. (3698–3709 кал. л. н.) (IGAN 10834a), подтверждают участие березы в составе редколесий вплоть до среднего суббореала.

В дельте Печоры (~ 68.1°с. ш.) исчезновение лесной растительности произошло около 3.2 тыс. кал. л. н. (Välranta et al., 2003). Согласно пыльцевым записям для более южных районов, в низовье р. Куи (~ 67.4°с. ш.) на северо-западе Большеземельской тундры в это время происходило отступление границы распространения *Picea* sp. на юг, расширение зоны тундры и активизация мерзлотных процессов (увеличилось содержание пыльцы древовидной березы до 50 % за счет сокращения доли пыльцы ели) (Голубева, Марченко-Вагапова, Исаков, 2024). На востоке Большеземельской тундры (оз. Харинеи, ~ 67.2°с. ш.) похолодание с 3.5 по 2.5 тыс. кал. л. н. вызвало исчезновение леса в окрестностях оз. Харинеи около 3 тыс. кал. л. н., которое согласуется с отсутствием макроостатков (игл) ели в осадках ближайших сопредельных районов — оз. Тумбуловаты (Kullti et al., 2004) и в бассейне р. Роговой (Oksanen et al., 2001). На Ямале исчезновение древесной растительности в долине р. Юрибей (~ 68.5°с. ш.) зафиксировано во временном интервале 4.9–4.4 кал. л. н. по сокращению обилия палиноморф и отсутствию макроостатков березы и ели, а в долине р. Хадытаяха (~ 67.5°с. ш.) экстразональные лесные участки из березы, лиственницы и ели сохранились по настоящее время, образуя северную границу леса (Панова и др., 2010; Корона и др., 2024).

На этом этапе на территории исследований процессы болотообразования замедлились, а мезотрофные болота трансформировались в верховые, на что указывает увеличение в спектрах доли пыльцы и спор олиготрофных растений: верескообразных кустарничков и сфагновых мхов. Замедление накопления торфа и его промерзание в верховье и приустьевой части Печоры около 4.5 тыс. л. н. выявлено Л. Д. Никифоровой (1982) и И. Г. Вейнбергсом с коллегами (1995).

Как следует из состава субфоссильных образцов, отобранных с поверхности бугристого торфяника (обр. 29а — с бугра пучения и обр. 29б — с мочажины), позднее в растительном покрове стали преобладать злаковники, в термокарстовых понижениях рельефа — заросли из карликовой березки. В пределах 14-километрового участка речной долины такие плотные заросли злаков обнаружены лишь вблизи рассматриваемого в данной статье обнажения на поверхности бугристого торфяника. В 0.5 км от болотного массива наблюдается несколько одноэтажных строений. Возможно, увеличение роли злаков объясняется нарушением почвенного покрова в результате антропогенной активности. Подобная особенность описана Н. Б. Носовой с коллегами (2014).

Таким образом, осадки (слои 3–5 в интервале глубин 210–0 см), содержащие микропалеонтологические остатки, вероятно, образовались на окраине эрозионной котловины, сформированной на месте вытаявания льда при деградации полярного ледникового покрова. По нашему мнению, в конце полярного времени на месте бугристого торфяника существовало небольшое прогляциальное озеро. В раннем голоцене палеоводоем начал зарастать, трансформировавшись в среднем голоцене из эвтрофного в мезотрофное болото. Впоследствии (~ 6500 кал. л. н.) происходило осушение болота и его преобразование в вечномерзлый торфяной массив.

К вопросу о трансгрессиях Баренцева моря в пределах восточной части его южного побережья в позднеледниковье и голоцене

Диатомовые водоросли позволяют фиксировать положение береговой линии моря в прошлом. В последние годы получены данные диатомового анализа наряду с результатами литологического изучения для западной части Баренцевоморского побережья. На их основе сформулированы критерии выделения осадков, образованных в результате морских трансгрессий или ингрессий и последующих регрессий, построен график перемещения береговой линии Баренцева и Белого морей в голоцене в пределах Кольского полуострова (Толстоброва и др., 2022).

Предположение об изменении береговой линии юго-восточного побережья Баренцева моря в течение последних 17 тыс. л., основанное на анализе соотношения гляциоизостатических движений севера Печорской низменности и эвстатических изменений уровня океана, отражено в работе А. С. Лаврова и Л. М. Потапенко (2012). Ими установлена ингрессия, которая наиболее значительно проявилась в дельте р. Печоры. На юго-восточном побережье Баренцева моря ингрессивное проникновение воды выражено фрагментарно.

С целью выявления признаков морского генезиса отложений было проведено сопоставление полученных нами результатов диатомового анализа со схемой формирования донных осадков в разнотипных малых изолированных бассейнах северо-восточной части Фенноскандинавского щита (Толстоброва и др., 2022) и данными других авторов (Колька и др., 2013; 2015; 2016; Шелехова, Лаврова, 2021). К сожалению, об изучении диатомей в юго-восточной части побережья Баренцева моря упоминается лишь в работе А. С. Лаврова и Л. М. Потапенко (2012), в которой есть ссыл-



ка на определения Р. В. Никитиной и В. М. Смирновой пресноводных водорослей из погребенных торфяников и вмещающих их песков озерно-морского генезиса. Описание комплекса диатомей, их приуроченности к хронологическим этапам и к определенным обнажениям не приведено, что делает невозможным сопоставление наших данных с опубликованными.

Полученные нами результаты диатомового анализа указывают на существование на месте вечномёрзлого бугристого торфяника пресноводного бассейна. В озерно-болотных осадках, формировавшихся начиная с пребореального периода голоцена, не были обнаружены морские диатомовые водоросли, что может говорить о том, что морские воды не проникали в район исследований (7 км от устья р. Черной; ~ 68.3°с. ш.). Присутствие мезогалопа *Diploneis interrupta* отмечается и в других пресноводных водоемах у берегов северных морей, что также может быть вызвано процессами местного засоления. К тому же отсутствуют типичные для морских образований фораминиферы и цисты динофлагеллят.

Сходные условия седиментации в приледниковом озере — пресноводном голоценовом водоеме без стадий солоновато-водного и морского водоемов, отмечены на Кольском полуострове в озерах верхнего течения р. Лотты, в озерах долины р. Туломы (с отметками 72, 77 и 92.4 м н.у.м, расположенных ниже верхней морской границы) и некоторых других. Все они содержат диатомовую флору, которая характеризует условия пресноводного водоема (Толстоброва и др., 2022). Причем в долине р. Туломы выявлены как пресноводные, так и солоновато-водные озера, которые представляют собой хорошие аналоги для других исследований. Озерные осадки, в которых не были обнаружены собственно морские и переходные от морских к пресноводным фауны, описаны в окрестностях поселков Сумской Посад и Малошуйка на Поморском берегу Онежского залива (Колька и др., 2016; 2018) и Двинского залива (Zaretskaya et al., 2024) Белого моря. В озерных отложениях суббореального периода в оз. Юж. Хаугилампи (центральная Карелия) обнаружены диатомовые комплексы, содержащие высокий процент (50 %) мезогалобных форм в сумме с галофилами. Авторы связывают это с переотложением и выщелачиванием ранее сформированных морских микулинских (?) осадков, или осадков моря Портландия (Шелехова, Лаврова, 2021).

Напротив, в отложениях, осадконакопление которых происходило в условиях ингрессии морского водоема, чаще всего обнаруживаются комплексы диатомовых водорослей, включающие в себя перемежающиеся слои с преобладанием мезогалобных видов (например, *Coscinodiscus lacustris* var. *septentrionalis*) и слои, обогащенные галофильными видами (например, *Rhopalodia gibba* var. *ventricosa*). Так, в осадках оз. Прокопьевское на побережье Белого моря, относящихся к этой стадии, доминируют солоноватоводные виды — мезогалофы (до 82 %), среди которых преобладают донные виды (*Rhabdonema minutum*, *Rh. adriaticum*, *D. smithii*), виды-обрастатели (*Cocconeis scutellum* var. *parva* и др.) и планктонные (*Paralia sulcata*, *Hyalodiscus scoticus*), представленные в меньшем количестве. Вторую по численности группу составляют полигалобы (14–32 %), среди которых также преобладают донные формы ди-

атомей (*Grammatophora macilenta* var. *nodulosa*, *Pinnularia quadratarea*, *Amphora exigua*, *Trachyneis aspera*), среди обрастателей выделены *Cocconeis costata*, *C. stauroneiformis* и др. (Толстоброва и др., 2022).

В отложениях переходной зоны на побережье Баренцева моря доминируют мезогалофы *Diploneis didyma*, *Mastogloia smithii*, *Paralia sulcata*, *Navicula peregrina* и др., которые потом замещаются галофилами *Stauroneis pinnata*, *Nitzschia sigma*, *Navicula meniscusculus*, *Pantocsekiella schumannii*, *Anomoeoneis sphaerophora* и др.

В морских осадках диатомей представлены главным образом полигалобными и мезогалобными (морскими/солоновато-водными) видами.

В отложениях на побережье Белого моря отмечается пик содержания полигалобов (до 62 % в некоторых разрезах). В комплексах доминируют эпифит *Cocconeis stauroneiformis* и донный вид *Grammatophora macilenta* var. *nodulosa*. Преобладающими видами, по мнению авторов, являются мезогалобный планктонно-бентосный вид *Paralia sulcata*, многочисленны донный *Rhabdonema adriaticum*, бентосный полигалоб *Navicula amorphila* (Корсакова и др., 2016; Толстоброва и др., 2022). В морских осадках комплекса озер в районе пос. Чупа в северной Карелии отмечены диатомей *Grammatophora oceanica+arctica*, *Hyalodiscus* sp., *Navicula digitoradiata*, *N. pygmaea*, *Pinnularia quadratarea*, *Plagiogramma staurorum*, *Cocconeis scutellum* etv.v., *Paralia sulcata* etv.v. и др. (Колька и др., 2015).

В морских отложениях побережья Баренцева моря диатомовые комплексы представлены полигалобами и мезогалогами, чаще всего встречаются виды *Cocconeis scutellum*, *Hyalodiscus scoticus*, *Melosira moniliformis*, *Paralia sulcata*, *Diploneis didyma*, *Pinnularia quadratarea*, *Plagiogramma staurorum*.

В скважинном материале осадков Баренцева моря, сформировавшихся за последние 10.4 тыс. лет, Е. И. Поляковой (2021) получены морские комплексы диатомей. В них многочисленны разнообразные холодноводные ледово-неритические *Thalassiosira antarctica*, *T. gravis*, *T. nodulosa* и ледово-морские *Nitzschia frigida*, *Fragilariopsis oceanica*, *F. cylindrus*, *Melosira arctica*, *Atheya septentrionalis*, *Pleurosigma stuxbergii* виды, а также обычные для зон дивергенций видов рода *Chaetoceros* и *Thalassionema nitzschioides* и многие другие.

При литологическом изучении отложений не было обнаружено признаков их морского генезиса, таких как песчаный состав, хорошая сортировка материала, горизонтальная слоистость, фаунистические остатки. Абсолютная высота кровли изученного нами разреза — 13 м. Из сводного разреза отложений прибрежной террасы (Лавров, Потапенко, 2005) следует, что в строении осадков в обнажениях до вышеуказанной абсолютной отметки, за исключением дельты р. Печоры, участвуют пески, перекрытые прослоями погребенного и поверхностного торфа. Изученный разрез имеет более сложное строение: в цоколе залегает моренная толща видимой мощностью около 7 м и уходящая под урез воды. Морена перекрыта прослоями супеси (0.15 м), оторфованного суглинка с неокатанными обломками пород и мелкими гнездами глинистого мелкозернистого песка мощностью 1.15 м и выше — торфа (1.2 м).

Приведенные нами результаты согласуются с материалами Пояснительной записки к Карте четвертич-

ных отложений РФ (2022) и с Картой четвертичных образований, составленной А. С. Лавровым и Л. М. Потапенко (2012). Из первой карты следует, что голоценовые трансгрессии, отражающиеся в обнажениях прибрежно-морских образований и выраженные береговыми линиями в рельефе, имеют ограниченное распространение — западнее 42° в. д. Последледниковая трансгрессия связана только с бассейном Белого моря и западнее в результате изостатического опускания Фенноскандинавского щита под весом последнего ледника. Согласно второй карте, район наших исследований расположен в области распространения ледниковых образований полярного возраста. Позднеплейстоцен-раннеголоценовые озерно-морские осадки имеют весьма ограниченное распространение и отделяются от вышеуказанной области руслом р. Черной (рис. 2). Таким образом, изученные ледниковые и озерно-болотные образования входили в состав сложного супрагляциального комплекса пород, в строении которого участвовали как пресноводные прогляциальные водоемы, так и солоновато-водные бассейны, образованные при ингрессии. При этом некоторые разнотипные озера, вероятно, были изолированы друг от друга мертвым льдом или валами из рыхлых пород, впоследствии сохранившимися или разрушенными эрозионными аллювиальными процессами.

Выводы

Проведена оценка соответствия состава субфосильных СПС составу современной растительности. Субрецентные СПС отражают зональную тундровую растительность и зависимость от геоморфологической позиции места пробоотбора.

Согласно полученным данным, вскрытый в основании разреза валунный суглинок видимой мощностью около 10 м соотнесен с полярным (осташковским) горизонтом. Вышезалегающие осадки, представленные супесью, глинами с редкими обломками пород и включениями алевритистого пылеватого песка в диапазоне 215–270 см, согласно классификациям (Лаврушин, 1980; Каплянская, Тарноградский, 1993), представляют собой ледниковый солифлюксий. Отложения отнесены к тиллу сплывания (флоу-тилли).

По результатам микропалеонтологических анализов можно сделать вывод, что осадконакопление глин, суглинков и торфа в кровле разреза происходило на окраине эрозионной котловины, сформированной при деградации полярного ледникового покрова. В позднеледниковье на месте бугристого торфяника существовало небольшое прогляциальное озеро. По палинологическим и альгологическим данным, торфонакопление началось в раннем голоцене в пребореальном периоде. В среднем голоцене палеоводоем начал зарастать, трансформировавшись из эвтрофного в мезотрофное болото.

Во второй половине среднего голоцена болотообразовательные процессы замедлились и мезотрофные болота преобразились в верховые.

По результатам изучения комплексов диатомовых водорослей проникновение морских вод не зафиксировано.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-27-00281).

Литература / References

- Андреичева Л. Н. Стратиграфия и корреляция плейстоцена Большеземельской тундры (бассейн р. Черной) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2002. Т. 10. № 4. С. 91–104.
- Andreicheva L. N. Stratigraphy and correlation of the Pleistocene of the Bolshezemelskaya tundra (Chernaya River basin). Stratigraphy. Geological correlation. 2002, V. 10, No. 4, pp. 91–104. (in Russian)
- Астахов В. И. Четвертичная геология суши: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербурга, 2020. 440 с.
- Astakhov V. I. Quaternary geology of land: textbook. St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg University, 2020, 440 p. (in Russian)
- Болыховская Н. С., Болыховский В. Ф., Климанов В. А. Климатические и криогенные факторы развития торфяников Европейского Северо-Востока СССР в голоцене // Палеоклиматы голоцена европейской территории СССР. М.: Наука, 1988. С. 36–43.
- Bolikhovskaya N. S., Bolikhovsky V. F., Klimanov V. A. Climatic and cryogenic factors of peatland development in the European north-east of the USSR in the Holocene. Paleoclimates of the Holocene of the European territory of the USSR. Moscow: Nauka, 1988, pp. 36–43. (in Russian)
- Вейнбергс И. Г., Стелле В. Я., Савваитов А. И., Якубовская И. Я. Позднечетвертичная история развития побережья Печорского моря // Корреляции палеогеографических событий: материк – шельф – океан: Материалы конф. М.: МГУ, 1995. С. 106–112.
- Veinbergs I. G., Stelle V. Ya., Savvaumov A. I., Yakubovskaya I. Ya. Late Quaternary history of the development of the Pechora Sea coast. Correlations of paleogeographic events: continent – shelf – ocean: Proc. conf. Moscow: Moscow State University, 1995, pp. 106–112. (in Russian)
- Величко А. А., Фаустова М. А. Реконструкция последнего позднеплейстоценового оледенения Северного полушария (18–20 тыс. лет назад) // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. № 6. С. 1465–1468.
- Velichko A. A., Faustova M. A. Reconstructions of the last late Pleistocene glaciation of the Northern Hemisphere (18–20 thousand years ago). Reports of the USSR Academy of Sciences, 1989, V. 309, No. 6, pp. 1465–1468.
- Глезер З. И., Жузе А. П., Макарова И. П., Прошкина-Лавренко А. И., Шешукова-Порецкая В. С. Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Л.: Наука, 1974. Т. I. 403 с.
- Glezer Z. I., Zhuze A. P., Makarova I. P., Proshkina-Lavrenko A. I., Sheshukova-Poretskaya V. S. Diatoms of the USSR (fossil and modern). Leningrad: Nauka, 1974, V. 1, 403 p. (in Russian)
- Голубева Ю. В., Марченко-Вагапова Т. И., Исаков В. А. Ландшафтно-климатические обстановки формирования средне-, верхнеголоценовых отложений на северо-западе Большеземельской тундры (в долине р. Куи) // Литосфера. 2024. Т. 24. № 6. С. 986–1013. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-6-986-1013>
- Golubeva Yu. V., Marchenko-Vagapova T. I., Isakov V. A. Landscape and climatic conditions of formation of middle and upper Holocene deposits in the northwest of the Bolshezemelskaya tundra (in the Kuya River valley). Lithosphere, 2024, V. 24, No. 6, pp. 986–1013. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение) / Гл. ред.:



- В. А. Журавлев, Е. А. Корого, Д. А. Костин, О. Н. Зуйкова и др. Серия Северо-Карско-Баренцевоморская. Лист R-39, 40-о. Колгуев-прол Карские Ворота. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. С. 167–177.
- State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (third generation). Editors-in-chief: Zhuravlev V. A., Korago E. A., Kostin D. A., Zuykova O. N. et al. North Kara-Barents Sea Series. Sheet R-39, 40-o. Kolguev strait. Kara Gate. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2014, pp. 167–177. (in Russian)
- Гросвальд М. Г.* Оледенение Русского Севера и Северо-Востока в эпоху последнего великого похолодания // *Материалы гляциологических исследований*. 2009. Вып. 106. С. 21–78.
- Grosvald M. G. Glaciation of the Russian North and North-East during the last great cooling. Materials of glaciological studies, 2009, Issue 106, pp. 21–78. (in Russian)
- Диатомовый анализ*. Л.: Госгеолгиздат, 1949–1950. Кн. 1. Общая и палеоботаническая характеристика диатомовых водорослей / Отв. ред. А. И. Прошкина-Лавренко. М.-Л., 1949. 239 с.; Кн. 2. Определитель. Порядки Centrales и Mediales. М.-Л., 1949. 442 с.; Кн. 3. Определитель. Порядки Pennales / М.-Л., 1950. 635 с.
- Diatom Analysis. Leningrad: Gosgeolizdat, 1949–1950. Book 1. General and Paleobotanical Characteristics of Diatom Algae. Editor A. I. Proshkina-Lavrenko, 1949, 239 p.; Book 2. Key. Orders Centrales and Mediales. 1949. 442 p.; Book 3. Key. Orders Pennales. 1950, 635 p. (in Russian)
- Каплянская Ф. А., Тарноградский В. Д.* Гляциальная геология. СПб.: Недра, 1993. 328 с.
- Kaplyanskaya F. A., Tarnogradsky V. D. Glacial Geology. St. Petersburg: Nedra, 1993. 328 p. (in Russian)
- Карта четвертичных образований территории Российской Федерации, ее континентального шельфа и прилегающих глубоководных акваторий масштаба 1 : 2 500 000 / Гл. ред.: О. В. Петров, А. Ф. Морозов, А. С. Застрожных (отв. редактор) и др.* СПб., 2019.
- Map of Quaternary formations of the territory of the Russian Federation, its continental shelf and adjacent deep-water areas at a scale of 1:2,500,000. Editors-in-chief: O. V. Petrov, A. F. Morozov, A. S. Zastrozhnov (responsible editor) et al. St. Petersburg. 2019. (in Russian)
- Карта четвертичных отложений территории Российской Федерации. Масштаб 1 : 2 500 000. Пояснительная записка.* СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2022.
- Map of Quaternary deposits of the territory of the Russian Federation. Scale 1:2 500 000. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory, 2022. (in Russian)
- Климатический атлас СССР.* М.: Гидрометеиздат, 1960–1962. Т. I. 181 с.
- Climate atlas of the USSR. Moscow: Gidrometeoizdat, 1960–1962, V. 1, 181 p. (in Russian)
- Колька В. В., Корсакова О. П., Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б., Арсланов Х. А.* Реконструкция относительного положения уровня Белого моря в голоцене на Карельском берегу (район поселка Энгозеро, Северная Карелия) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 449. № 5. С. 587. <https://doi.org/10.7868/S0869565213110182>
- Kolka V. V., Korsakova O. P., Shelekhova T. S., Lavrova N. B., Arslanov K. A. Reconstruction of the relative level of the White sea during the Holocene on the Karelian coast near Engozero settlement, Northern Karelia. Doklady Earth Sciences, 2013, V. 449, No. 2. pp. 434–438.
- Колька В. В., Корсакова О. П., Лаврова Н. Б., Шелехова Т. С., Толстоброва А. Н., Толстобров Д. С., Зарецкая Н. Е.* Палеогеография западного берега Онежского залива Белого моря в позднеледниковое и голоценовое время // Пути эволюционной географии: Материалы Всерос. науч. конф., посвящ. пам. проф. А. А. Величко. 2016. С. 144–146.
- Kolka V. V., Korsakova O. P., Lavrova N. B., Shelekhova T. S., Tolstobrova A. N., Tolstobrov D. S., Zaretskaya N. E. Paleogeography of the western coast of the Onega Bay of the White Sea in the late glacial and Holocene time. Paths of evolutionary geography. Proceedings of the All-Russian scientific conference dedicated to the memory of professor A. A. Velichko, 2016, pp. 144–146. (in Russian)
- Колька В. В., Корсакова О. П., Лаврова Н. Б., Шелехова Т. С., Толстоброва А. Н., Толстобров Д. С., Зарецкая Н. Е.* Стратиграфия донных осадков малых озер и палеогеография западного берега Онежского залива Белого моря в позднеледниковье и голоцене // Геоморфология. 2018. № 2. С. 48–59.
- Kolka V. V., Korsakova O. P., Lavrova N. B., Shelekhova T. S., Tolstobrova A. N., Tolstobrov D. S., Zaretskaya N. E. Stratigraphy of bottom sediments of small lakes and paleogeography of the western coast of the Onega Bay of the White Sea in the Late Glacial and Holocene. Geomorphology, 2018, No. 2, pp. 48–59. (in Russian)
- Колька В. В., Корсакова О. П., Шелехова Т. С., Толстоброва А. Н.* Восстановление относительного положения уровня Белого моря в позднеледниковье и голоцене по данным литологического, диатомового анализов и радиоуглеродного датирования донных отложений малых озер в районе пос. Чупа (Северная Карелия) // Вестник МГТУ. 2015. Т.18. № 2. С. 255–268.
- Kolka V. V., Korsakova O. P., Shelekhova T. S., Tolstobrova A. N. Restoration of the relative position of the White Sea level in the late glacial and Holocene based on lithological, diatom analysis and radiocarbon dating of bottom sediments of small lakes in the area of the village of Chupa (northern Karelia). Bulletin of Moscow State Technical University, 2015, V.18, No. 2, pp. 255–268. (in Russian)
- Корона О. М., Трофимова С. С., Жилич С. В., Лантева Е. Г.* Динамика растительности Ямала в голоцене на основе палеоботанических данных из реликтовых торфяников // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 4. С. 446–451. <http://dx.doi.org/10.15372/SEJ20240402>
- Korona O. M., Trofimova S. S., Zhilich S. V., Lapteva E. G. Dynamics of Yamal vegetation in the Holocene based on paleobotanical data from relict peatlands. Limnology and Freshwater Biology, 2024, No. 4, pp. 446–451. (in Russian)
- Корсакова О. П., Колька В. В., Толстоброва А. Н., Лаврова Н. Б., Толстобров Д. С., Шелехова Т. С.* Литология и позднеледниковая стратиграфия донных отложений из котловин изолированных бассейнов побережья Белого моря (на примере малого озера из района поселка Чупа, Северная Карелия) // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2016. Т. 24. № 3. С. 81–101.
- Korsakova O. P., Kolka V. V., Tolstobrov A. N., Lavrova N. B., Tolstobrov D. S., Shelekhova T. S. Lithology and late post-glacial stratigraphy of bottom sediments from the basins of isolated basins on the White Sea coast (using a small lake from the Chupa settlement area, Northern



- Karelia, as an example). Stratigraphy. Geological correlation, 2016, V. 24, No. 3, pp. 81–101. (in Russian)
- Лавров А. С., Потапенко Л. М. Неоплейстоцен северо-востока Русской равнины. М.: Аэрогеология, 2005. 222 с. Lavrov A. S., Potapenko L. M. Neopleistocene of the north-east of the Russian Plain. Moscow: Aerogeology, 2005, 222 p. (in Russian)
- Лавров А. С., Потапенко Л. М. Неоплейстоцен Печорской низменности и Западного Притиманья (стратиграфия, палеогеография, хронология). М.: Аэрогеология, 2012. 191 с. Lavrov A. S., Potapenko L. M. Neopleistocene of the Pechora Lowland and Western Pritimanye (stratigraphy, paleogeography, chronology). Moscow: Aerogeologiya, 2012, 191 p. (in Russian)
- Лаврушин Ю. А. Некоторые общие вопросы моренного седиментогенеза // Процессы континентального литогенеза. М.: Наука, 1980. С. 123–135. (Тр. ГИН АН СССР. Вып. 350). Lavrushin Yu. A. Some general issues of moraine sedimentogenesis. Processes of continental lithogenesis. Moscow: Nauka, 1980. Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Sciences. Issue 350, pp. 123–135. (in Russian)
- Лаптева Е. Г., Корона О. М. Новые данные о динамике растительности Малоземельской тундры в голоцене на основе комплексного палеоботанического изучения озерно-болотных отложений в районе озера Голодная Губа // Экология. 2022. № 2. С. 120–128. <https://doi.org/10.31857/S0367059722020056> Lapteva E. G., Korona O. M. New data on the dynamics of vegetation of the Malozemelskaya tundra in the Holocene based on a comprehensive paleobotanical study of lake-bog deposits in the area of Lake Golodnaya Guba. Ecology, 2022, No. 2, pp. 120–128. (in Russian)
- Максимов Ф. Е., Андрищева Л. Н., Кузнецов В. Ю., Григорьев В. А., Петров А. Ю., Левченко С. Б., Марченко-Вазанова Т. И., Баранова Н. Г. Возраст и хроностратиграфическое положение озерно-болотных отложений в бассейне р. Черной на севере Большеземельской тундры по результатам их $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - и ^{14}C -датирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2021. № 66 (2). С. 289–309. DOI:10.21638/spbu07.2021.206 Maksimov F. E., Andreicheva L. N., Kuznetsov V. Yu., Grigoriev V. A., Petrov A. Yu., Levchenko S. B., Marchenko-Vaganova T. I., Baranova N. G. Age and chronostratigraphic position of lacustrine-bog sediments in the Chernaya River basin in the north of the Bolshezemelskaya tundra based on the results of their $^{230}\text{Th}/\text{U}$ - and ^{14}C -dating. Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences, 2021, No. 66 (2), pp. 289–309. (in Russian)
- Нигаматзянова Г. Р., Нигматуллин Н. М., Фролова Л. А. Палинокомплексы озерных отложений в дельте реки Печоры (государственный заповедник «Ненецкий») // Актуальные проблемы современной палинологии: Материалы XV Всерос. палинолог. конф. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, ГЕОС, 2022. С. 244–248. Nigamatzhanova G. R., Nigmatullin N. M., Frolova L. A. Palynological complexes of lake sediments in the Pechora River delta (Nenets State Nature Reserve). Actual problems of modern palynology: Proc. 15th All-Russian palynological conference. Moscow: Lomonosov Moscow State University, GEOS, 2022, pp. 244–248. (in Russian)
- Никифорова Л. Д. Динамика ландшафтных зон голоцена северо-востока европейской части СССР // Развитие природы территории СССР в позднем плейстоцене и голоцене. М.: Наука, 1982. С. 154–162. Nikiforova L. D. Dynamics of Holocene landscape zones in the North-East of the European part of the USSR. Development of nature in the territory of the USSR in the late Pleistocene and Holocene. Moscow: Nauka, 1982, pp. 154–162. (in Russian)
- Носова М. Б., Новенко Е. Ю., Зерницкая В. П., Дюжова К. В. Палинологическая индикация антропогенных изменений растительности восточно-европейских хвойно-широколиственных лесов в голоцене // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2014. № 4. С. 72–84. Nosova M. B., Novenko E. Yu., Zernitskaya V. P., Dyuzhova K. V. Palynological indication of anthropogenic changes in the vegetation of East European coniferous-broad-leaved forests in the Holocene. Proc. RAS, Geographical Series, 2014, No. 4, pp. 72–84. (in Russian)
- Панова Н. К., Трофимова С. С., Антипина Т. Г., Зиновьев Е. В., Гилев А. В., Ерохин Н. Г. Динамика растительности и экологических условий в голоцене на Южном Ямале по данным комплексного анализа отложений реликтового торфяника // Экология. 2010. № 1. С. 22–30. Panova N. K., Trofimova S. S., Antipina T. G. et al. Dynamics of vegetation and environmental conditions in the Holocene in Southern Yamal based on complex analysis of relict peat deposits. Ecology, 2010, No. 1, pp. 22–30. (in Russian)
- Полякова Е. И., Новичкова Е. А., Агафонова Е. А. Диатомеи и водные палиноморфы в донных осадках Баренцева моря: основные закономерности распространения и использование в палеоокеанологических исследованиях // Система Баренцева моря. М., 2021. С. 64–95. Polyakova E. I., Novichkova E. A., Agafonova E. A. Diatoms and aquatic palynomorphs in bottom sediments of the Barents Sea: main patterns of distribution and use in paleoceanological studies. Barents Sea System. Moscow, 2021, pp. 64–95. (in Russian)
- Пыльцевой анализ. М.: Госгеолитиздат, 1950. 571 с. Pollen analysis. Moscow: Gosgeolizdat, 1950, 571 p. (in Russian)
- Руденко О. В. Палиностратиграфия ледово-морских и морских осадков Баренцева моря // Система Баренцева моря / Под ред. акад. А. П. Лисицына. М.: ГЕОС, 2021. С. 51–63. Rudenko O. V. Palynostratigraphy of ice-marine and marine sediments of the Barents Sea. Barents Sea System. Ed. Academician A. P. Lisitsyn. Moscow: GEOS, 2021, pp. 51–63. (in Russian)
- Сапелко Т. В., Анисимов М. А., Носевич Е. С. Палинологические реконструкции разрезов среднего и позднего голоцена побережья Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2016. № 1 (107). С. 96–110. Sapelko T. V., Anisimov M. A., Nosevich E. S. Palynological reconstructions of the Middle and Late Holocene sections of the Barents Sea coast. Problems of the Arctic and Antarctic, 2016, No. 1 (107), pp. 96–110. (in Russian)
- Сапелко Т. В., Носевич Е. С., Кулькова М. А., Мурашкин А. И., Колпаков Е. М. Палеоэкологическая характеристика побережья Баренцева моря в позднем голоцене на примере полуострова Средний // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64. № 4. С. 391–406.



- Sapelko T. V., Nosevich E. S., Kulkova M. A., Murashkin A. I., Kolpakov E. M. Paleocological characteristics of the Barents Sea coast in the late Holocene using the Sredny Peninsula as an example. Problems of the Arctic and Antarctic, 2018, V. 64, No. 4, pp. 391–406. (in Russian)
- Стенина А. С. Пресноводные диатомовые водоросли (Baccillariophyta) бассейна реки Море-Ю (Бельшеземельская тундра, Ненецкий автономный округ) // Новости систематики низших растений. 2010. Т. 44. С. 90–104.
- Stenina A. S. Freshwater diatoms (Baccillariophyta) of the More-Yu River basin (Belshezemelskaya tundra, Nenets Autonomous Okrug). News of taxonomy of lower plants, 2010, V. 44, pp. 90–104. (in Russian)
- Стенина А. С., Патова Е. Н. Фитопланктон в водоемах дельты р. Печора и прилегающих территорий // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2010. Вып. 4. С. 28–35.
- Stenina A. S., Patova E. N. Phytoplankton in water bodies of the Pechora River delta and adjacent territories. Proc. Komi SC UB RAS, 2010, 4, pp. 28–35. (in Russian)
- Толстоброва А. Н., Корсакова О. П., Толстобров Д. С. Позднеледниково-голоценовая стратиграфия донных отложений из котловин малых изолированных озер Баренцевоморского побережья (Кольский регион) // Вестник геонаук. 2022. № 6 (330). С. 26–37. DOI: 10.19110/geov.2022.6.3
- Tolstobrova A. N., Korsakova O. P., Tolstobrov D. S. Late glacial-Holocene stratigraphy of bottom sediments from basins of small isolated lakes of the Barents Sea coast (Kola region). Vestnik of Geosciences, 2022, No. 6 (330), pp. 26–37. (in Russian)
- Шелехова Т. С., Лаврова Н. Б., Субетто Д. А. Реконструкция палеогеографических условий позднеледникового-голоцена в Центральной Карелии (на основе комплексного анализа озерных отложений озера Южное Хаугилампи) // Известия Русского географического общества. 2021. Т. 153. № 6. С. 73–89. <https://doi.org/10.31857/S0869607121060070>
- Shelekhova T. S., Lavrova N. B., Subetto D. A. Reconstruction of paleogeographic conditions of the late glacial-Holocene in Central Karelia (based on a comprehensive analysis of lake sediments of Lake Yuzhnoye Haugilampi). Bulletin of the Russian Geographical Society, 2021, V. 153, No. 6, pp. 73–89. (in Russian)
- Четвертичные оледенения на территории СССР / Под ред. А. А. Величко, Л. Л. Исаевой и М. А. Фаустовой. М.: Наука, 1987. 128 с.
- Quaternary glaciations on the territory of the USSR. Edited by A. A. Velichko, L. L. Isaeva and M. A. Faustova. Moscow: Nauka, 1987, 128 p. (in Russian)
- Юрцев Б. А., Толмачев А. И., Ребристая О. В. Флористическое разнообразие и районирование Арктики. Арктический флористический регион. Л.: Наука, 1978. С. 9–66.
- Yurtsev B. A., Tolmachev A. I., Rebristaya O. V. Floristic diversity and zoning of the Arctic. Arctic floristic region. Leningrad: Nauka, 1978, pp. 9–66. (in Russian)
- Andreev, A. A., Klimanov V. A. Quantitative Holocene climatic reconstruction from Arctic Russia. J. Paleolimnol., 2000. № 24. P. 81–91.
- Andreicheva L. N., Vorobyev N. N. Lithostratigraphic criteria of the Polar Moraine in Subarctic Regions of European Russia and tipomorphic features of garnets and zircon // Lithology and Mineral Resources. 2025. Vol. 60. No. 1. P. 77–89. DOI: 10.1134/S0024490224700809
- Astakhov V. I. Pleistocene glaciations of northern Russia — a modern view. Boreas. 2013. Vol. 42. P. 1–24.
- Donner J., Eronen M., Jungner H. The dating of the Holocene relative sea-level changes in Finnmark, North Norway. Norsk geografisk Tidsskrift. 1977. Vol. 31. P. 103–128.
- Golubeva Yu. V., Marchenko-Vagapova T. I. Lake sedimentation conditions in the lower part Seyda River (north of Komi Republic, Russia) according to palynological and diatom data // Limnology and Freshwater Biology. 2024. № 4. P. 368–373. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-368
- Kaakinen, A. P., Eronen, M. J. Holocene pollen stratigraphy indicating climatic and tree-line changes derived from a peat section at Ortino, in Pechora lowland, northern Russia. Holocene, 2000. № 10. P. 611–620.
- Kremenetski C. V., Sulerzhitsky L. D., Hantemirov R. Holocene History of the Northern Range Limits of Some Trees and Shrubs in Russia // Arctic and Alpine Research. 1998. Vol. 30. № 4. P. 317–333.
- Kullti S., Oksanen P., Väiliranta M. Holocene tree line, permafrost and climate dynamics in the Nenets Region, East-European Arctic. Canadian J. of Earth Sci., 2004. № 41. P. 1141–1158.
- Lapteva E. G., Korona O. M., Kosintsev P. A. Dynamocs of the vegetation of Central Yamal in the Holocene // Russian Journal of Ecology. 2024. № 55. P. 1–11. DOI: 10.1134/S1067413624010053
- Larsen E., Kjær K., Demidov I., Funder S., Grøsfjeld K., Houmark-Nielsen M., Jensen M., Linge H., Lyså A. Late Pleistocene glacial and lake history of Northwestern Russia. Boreas. 2006. V. 35. № 3. P. 394–424.
- Long A. J., Woodroffe S. A., Roberts D. H., Dawson S. Isolation basin, sea-level change and the Holocene history of the Greenland Ice Sheet // Quaternary Sci. Rev. 2011. Vol. 30. P. 3748–3768.
- Mangerud J., Svendsen J. I., Astakhov V. I. Age and extent of the Barents and Kara ice sheets in Northern Russia // Boreas, 1999. № 28(1). P. 46–80.
- Oksanen P., Kuhry P., Alekseeva R. N. Holocene development of the Rogovaya River peat plateau, European Russian Arctic. The Holocene, 2001. № 11. P. 25–40.
- Paus A., Svendsen J. I. Late Weichselian (Valdaian) and Holocene vegetation and environmental history of the northern Timan Ridge, European Arctic Russia. Quaternary Sci. Rev. 2003. (22), P. 2285–2302.
- Väiliranta M., Kaakinen A. P., Kuhry, P. Holocene climate and landscape evolution East of the Pechora delta, East-European Russian arctic. Quaternary Research. 2003. № 59. P. 335–344.
- Velichko A. A., Andreev A. A., Klimanov V. A. Climate and vegetation dynamics in the tundra and forest zone during the Late glacial and Holocene. Quaternary Int. 1997. № 41/42. P. 71–96.
- Zaretskaya N., Utkina A., Baranov D., Panin A., Trofimova S., Simakova A., Kurbanov R. Limited extension of the MIS 2 proglacial lake in the Severnaya Dvina valley, south-eastern margin of the last Scandinavian Ice Sheet. Journal of Quaternary Science. 2024. Vol. 39. 1. P. 82–101. <https://doi.org/10.1002/jqs.3570>

Поступила в редакцию / Received 19.03.2025

Роль галогенов и серы в апатите при оценке потенциальной рудоносности гранитоидов тигертышского комплекса (Кузнецкий Алатау)

Е. В. Наставко, Т. В. Лешуков, А. С. Слесарев, Г. А. Федосюк

Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

evnastavko@yandex.ru, tvleshukov@mail.ru, l-e-s-h-k-a-h-s1@mail.ru, germanfedosyuk1002@gmail.com

Проведено исследование содержаний галогенов (F и Cl) и серы в апатите из гранодиоритов и лейкогранитов тигертышского комплекса ($\gamma\text{C-O}_1\text{t}$), которое может указывать на потенциальную рудоносность гранитоидов. Апатиты гранодиоритов приурочены главным образом к зернам амфибола, реже располагаются в кварце и полевых шпатах, по составу соответствуют фторапатиту ($F = 2.45\text{--}2.76$ мас. %, $\text{Cl} = 0.02\text{--}0.03$ мас. %). В лейкогранитах апатит приурочен к полевым шпатам и биотиту, по составу отвечает гидроксил- и фторапатиту ($F = 1.50\text{--}1.80$ мас. %, $\text{Cl} = 0.33\text{--}0.52$ мас. %). В апатите из гранодиоритов содержание серы максимально в зернах, приуроченных к амфиболу, и составляет $0.05\text{--}0.11$ мас. %, тогда как в апатите из кварца и полевых шпатов ее не более 0.04 мас. %. Содержание серы в апатите лейкогранитов не зависит от причастности последнего к разным минералам и составляет $0.04\text{--}0.07$ мас. %. Исходя из содержаний F, Cl и S в апатитах гранитоидов тигертышского комплекса, можно предположить, что с гранодиоритами может быть связано золотосульфидно-кварцевое оруденение, с лейкогранитами – Cu-порфировое оруденение.

Ключевые слова: апатит, галогены, сера, гранитоиды, металлогения, Кузнецкий Алатау

The role of halogens and sulfur in apatite in assessing the potential ore content of granitoids of the Tigertysh complex (Kuznetsk Alatau)

E. V. Nastavko, T. V. Leshukov, A. S. Slesarev, G. A. Fedosyuk

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The study of the halogen (F and Cl) and sulfur contents in apatite from granodiorites and leucogranites of the Tigertysh complex ($\gamma\text{C-O}_1\text{t}$) was carried out, which may indicate the potential ore content of granitoids. Apatites of granodiorites are confined mainly to amphibole grains, less often located in quartz and feldspars, and correspond in composition to fluorapatite ($F = 2.45\text{--}2.76$ wt. %, $\text{Cl} = 0.02\text{--}0.03$ wt. %). In leucogranites, apatite is confined to feldspars and biotite, and corresponds in composition to hydroxyl- and fluorapatite ($F = 1.50\text{--}1.80$ wt. %, $\text{Cl} = 0.33\text{--}0.52$ wt. %). In apatite from granodiorites, the sulfur content is maximum in grains confined to amphibole and is $0.05\text{--}0.11$ wt. %, while in apatite from quartz and feldspars it is no more than 0.04 wt. %. The sulfur content in apatite from leucogranites does not depend on its confinement to different minerals and is $0.04\text{--}0.07$ wt. %. Based on the F, Cl and S contents in apatites of granitoids of the Tigertysh complex, it can be assumed that gold-sulfide-quartz mineralization may be associated with granodiorites, and Cu-porphyry mineralization with leucogranites.

Keywords: apatite, halogens, sulfur, granitoids, metallogeny, Kuznetsk Alatau

Введение

Наличие флюида и его состав оказывает существенное влияние на металлогеническую специфику и рудоносность габбродиорит-гранитовых и диорит-гранитовых комплексов (Холоднов, Бушляков, 2002; Belousova et al., 2002, O'Sullivan et al., 2020 и др.). Минералами — концентраторами флюидов в них являются слюда (биотит), амфибол и апатит.

В последние два десятилетия апатит привлекает к себе внимание исследователей благодаря широкому распространению в породах разного генезиса и состава, и одновременно он достаточно чувствителен к изменению среды и отражает рудную специфику пород, в состав которых входит (Холоднов, Бушляков, 2002; Chakhmouradian et al., 2017; O'Sullivan et al., 2020; и др.).

Уральскими исследователями проведена большая работа и сделан вывод о том, что F, Cl и S в составе апатита могут косвенно указывать на рудоносность содержащих его магматических пород (Коновалова и др.,

2013; Коровко и др., 2018; Холоднов, Бушляков, 2002; и др.). В монографии (Холоднов, Бушляков, 2002) приведены содержания F, Cl и S в апатите, слюде и амфиболе из магматических пород с разным типом оруденения, также представлены диаграммы, позволяющие выделить апатиты из пород с разной металлогенической специализацией. Cl/F-соотношение в составе апатита является индикатором флюидного режима в петро- и рудогенезе (Бочарников и др., 2012; Palma et al., 2019 и др.). В последние годы появились работы по исследованиям флюидного режима на основе содержаний F, Cl и S в апатитах за пределами Урала (Веснин, 2024; Шардакова и др., 2023).

Обобщение исследователями данных по объектам Урала позволило предложить новую классификационную диаграмму соотношений содержаний F, Cl и S в апатитах магматических пород (Коровко и др., 2018) для предварительных оценок рудоперспективности магматических комплексов.

Для цитирования: Наставко Е. В., Лешуков Т. В., Слесарев А. С., Федосюк Г. А. Роль галогенов и серы в апатите при оценке потенциальной рудоносности гранитоидов тигертышского комплекса (Кузнецкий Алатау) // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 32–39. DOI: 10.19110/geov.2025.4.3

For citation: Nastavko E. V., Leshukov T. V., Slesarev A. S., Fedosyuk G. A. The role of halogens and sulfur in apatite in assessing the potential ore content of granitoids of the Tigertysh complex (Kuznetsk Alatau). Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 32–39, doi: 10.19110/geov.2025.4.3



Содержание серы и галогенов флюидсодержащих минералов могут помочь в понимании рудной специфики гранитоидных интрузий.

В работе рассматривается содержание галогенов и серы в апатите как отражение рудогенерирующего потенциала гранитоидов тигертышского комплекса. Решение вопроса поведения галогенов и серы в апатитах может послужить дополнительным критерием оценки потенциальной рудоносности и промышленной значимости гранитоидов. Такая работа по апатитам магматитов Кузнецкого Алатау проводится впервые.

Краткая геологическая характеристика тигертышского комплекса и его обрамления

Палеозойские гранитоидные комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) формировались на различных стадиях развития каледонского аккреционно-коллизийного орогена. Смена геодинамических режимов их становления от островодужных до внутриматериковых обстановок обусловила гетерогенность гранитообразования. Источником гранитообразования рассматривается материал разной природы: субдуцируемая плита (слэб), ювенильная

континентальная кора каледонид и мантийные диапиры (плюмы) (Владимиров и др., 1999; Ярмолюк и др., 2011 и др.).

Тигертышский гранитный комплекс ($\gamma\epsilon-O_1t$) сложен Тигертышский, Улень-Туимский и Уйбатский полихронные плутоны в юго-восточной части Кузнецкого Алатау и Батеневском кряже ЦАСП, административно располагается на территории Кемеровской области и Республики Хакасия (рис. 1, а). Строение комплекса двухфазное. Первая (главная) фаза сложена диоритами, кварцевыми диоритами, кварцевыми сиенитами, биотит-роговообманковыми гранодиоритами и гранитами, часто имеющими порфировидную структуру. Вторая фаза представлена дополнительными интрузиями — мелкими штоками и дайкообразными телами лейкогранитов. К жильной серии относятся дайки аплитов и микрогранитов.

Петротипический Тигертышский массив площадью 500 км² расположен в междуречье Томь – Теренсуг – Большой Казыр (рис. 1, б), сложен центральной и южную части Тигертышского плутона, общая площадь которого около 2 000 км². Форма массива сложная, лополитообразная, обусловленная внедрением в межформационное пространство. Долины всех крупных рек представлены эффузивно-терригенно-карбонатными

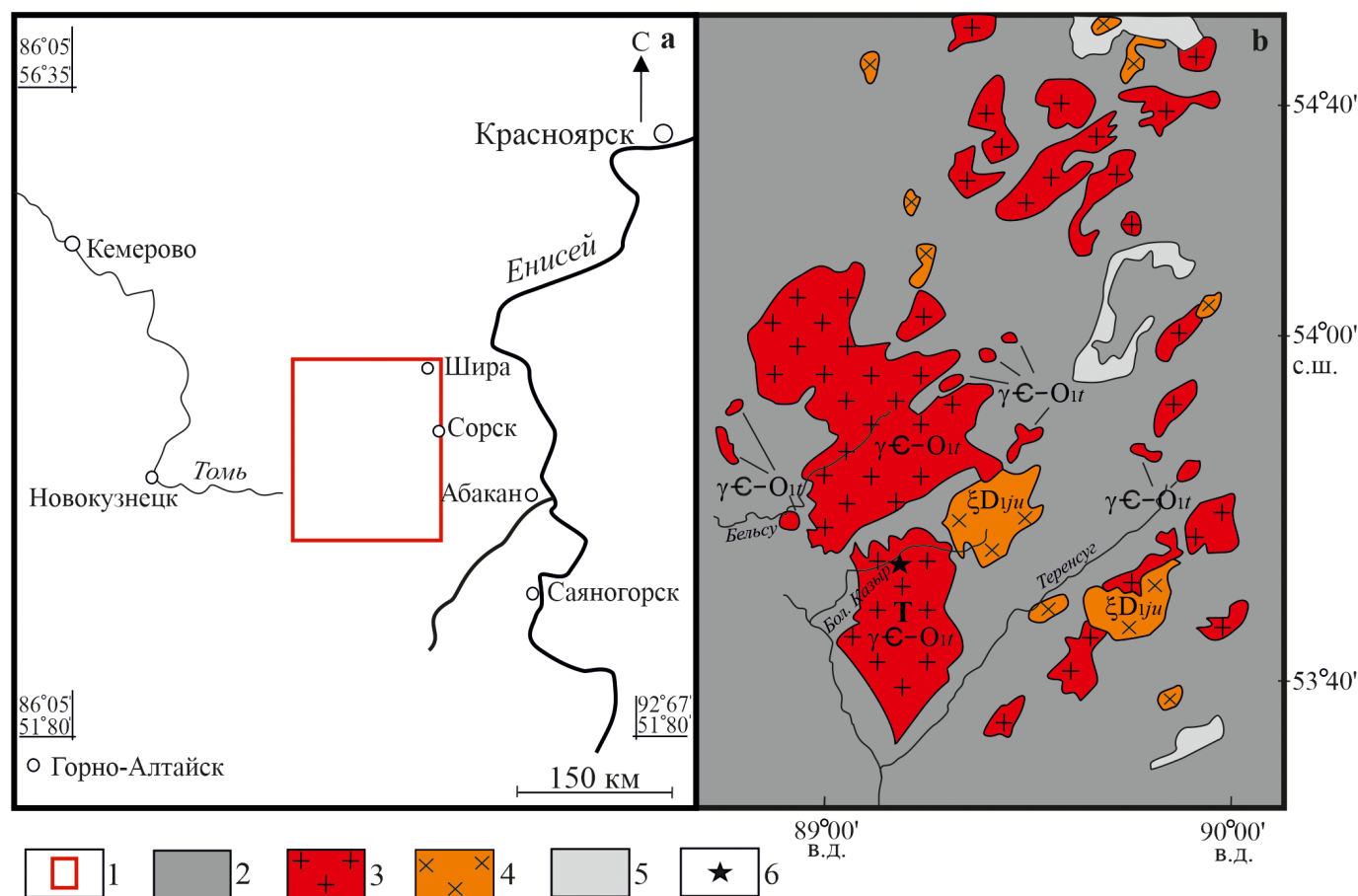


Рис. 1. Схема расположения района исследований (а); геологическая карта-схема района исследований (Геологическая..., 2007) (б): 1 — месторасположение объекта исследования; 2 — вулканогенные и терригенно-карбонатные образования (нерасчлененные) V- ϵ_1 ; 3 — тигертышский гранитный комплекс ($\gamma\epsilon-O_1t$); 4 — юлинский сиенит-граносиенитовый комплекс (ξD_1ju); 5 — вулканы бимодальной серии (D_1-D_2); 6 — место отбора проб; Т — Тигертышский массив ($\epsilon-O_1$)

Fig. 1. Location of the study area (а); geological schematic map of the research area (Geologicheskaya..., 2007) (б): 1 — location of the object of study; 2 — volcanogenic and terrigenous-carbonate formations (undivided) V- ϵ_1 ; 3 — Tigertysh granite complex ($\gamma\epsilon-O_1t$); 4 — Yulin syenite-granosyenite complex (ξD_1ju); 5 — volcanics of the bimodal series (D_1-D_2); 6 — sampling site; Т — Tigertysh massiv ($\epsilon-O_1$)

отложениями, а водораздельные пространства — интрузивными породами, прорывающими осадочные толщи. Основная часть интрузии (около 60–65 %) сложена породами первой фазы — биотитовыми, биотит-роговообманковыми гранитами и гранодиоритами, которые находятся в центральной части массива. Далее породы постепенно сменяются роговообманковыми кварцевыми диоритами и диоритами, которые слагают внешние зоны массива.

Граниты и гранодиориты данной фазы — розовато-серые средне- и крупнозернистые порфировидные породы с вкрапленниками микроклина размером до 4.0 см (до 15 % объема породы). Фемические минералы, амфибол и слюда, иногда образуют шпиропоподобные скопления, что придает породе такситовую текстуру. Составляют породы примерно из равного количества микроклина и плагиоклаза, которые суммарно составляют 60–70 %, кварца — 25–35 %, биотита и роговой обманки — 1–5 %; аксессуарных минералов — магнетита, титанита, апатита, циркона, иногда ортита.

Вторая фаза комплекса Тигертышского массива представлена мелкозернистыми лейкократовыми гранитами, реже гранит-порфирами с микропегматитовой основной массой. Непосредственные контакты с вмещающими биотитовыми порфировидными гранитами наблюдались в мелких прожилках, где на контакте развита полоска пегматита до 1 см, а внутренняя часть представлена аплитом. Лейкограниты слагают штокообразные тела площадью от 10–15 до 120 км² в пределах массива Гольцовый, горы Молния и ряд мелких крутопадающих дайкообразных тел в верховьях рек Амзас, Караташ, на правом берегу р. Теренсуг среди гранодиоритов тигертышского комплекса (Государственная..., 2019).

Дайковые тела лейкогранитов, широко развитые в северо-восточной части Уйбатского плутона, ранее рассматривались в составе самостоятельного сорского комплекса, а также выделялись под названием «каркасная интрузия». Макроскопически лейкограниты представляют собой розовато-светло-серые массивные мелко-, тонкозернистые породы, состоят из альбит-олигокла-

за и микроклин-пертита (до 65 %), кварца (32–35 %) и хлоритизированного биотита (Врублевский и др., 2016).

Вопрос о возрасте тигертышских гранитоидов в настоящее время однозначно не решен. Породы комплекса прорывают все известные в регионе стратифицированные и интрузивные образования вплоть до среднего кембрия, исключая гранитоиды мартайгинского комплекса (Є₂). Верхний возрастной предел пород тигертышского комплекса определяется прорыванием дайками и мелкими штоками сиенитов раннесилурийского субвулканического комплекса (Государственная..., 2019). Возраст умеренно щелочных порфировидных гранитов Тигертышского массива северо-восточнее пос. Балыксу, полученный уран-свинцовым методом по цирконам (U-Pb-метод, SHRIMP), соответствует позднему кембрию — 494.9 ± 5.1 млн лет. Возраст кварцевых сиенитов Каразасского массива бассейна р. Бискамба датирован также поздним кембрием — 493.3 ± 7.8 млн лет. Умеренно щелочные лейкограниты второй фазы северной части массива г. Карлыган в верховьях р. Ниня датированы поздним кембрием — 494.7 ± 8.4 млн лет (Врублевский и др., 2016). Радиологические датировки тигертышских гранитоидов Улень-Туимского массива и Солгонского выступа Тигертышского плутона U-Pb-методом по цирконам составили 500–527 млн лет, K-Ar-методом по биотиту и амфиболу — 483–515 млн лет, что соответствует кембрию – раннему ордовика (Государственная..., 2019).

Исходя из полученных датировок и прорывания пород тигертышского комплекса дайками и мелкими штоками сиенитов раннесилурийского субвулканического комплекса возраст тигертышского комплекса принят как кембрий – ранний ордовик (Государственная..., 2019).

К породам тигертышского комплекса приурочено гидротермальное оруденение молибден-медно-порфировой и молибден-порфировой рудных формаций, связанных с гранитами, а также жильные проявления золотосульфидно-кварцевой рудной формации, которые относятся к гранодиоритам комплекса (Государственная..., 2019).

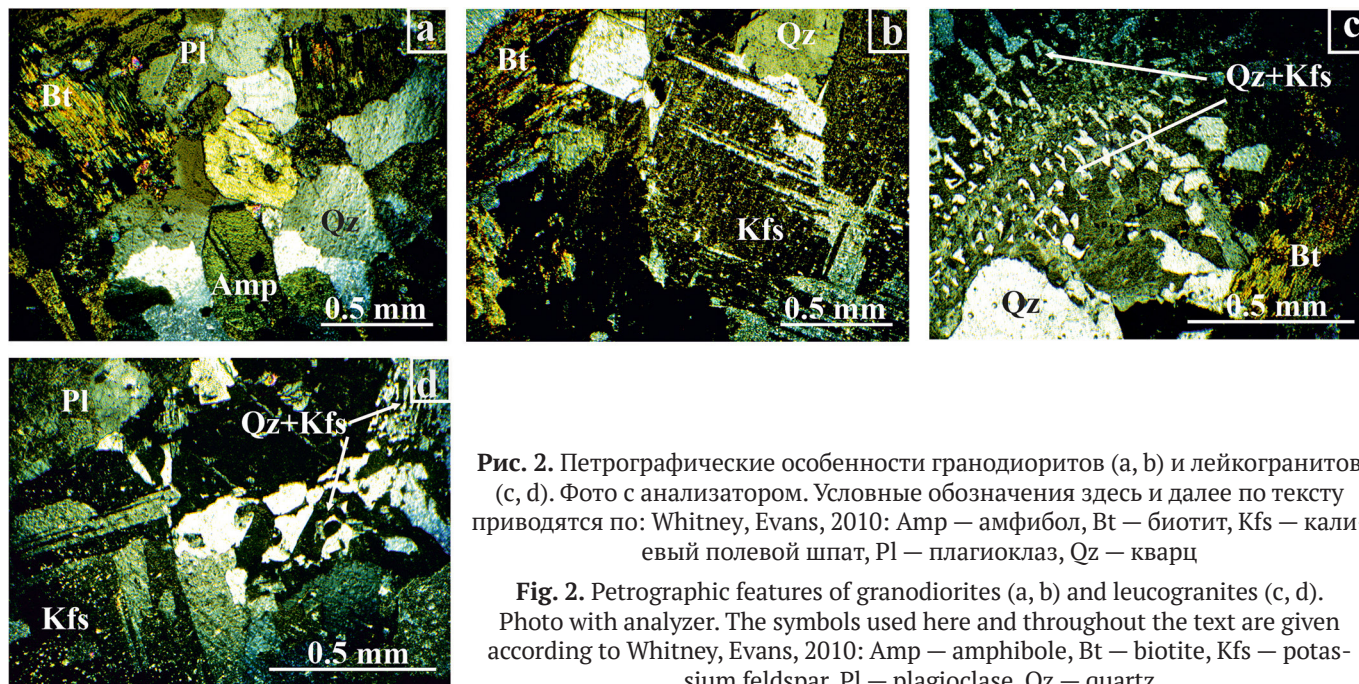


Рис. 2. Петрографические особенности гранодиоритов (а, б) и лейкогранитов (с, д). Фото с анализатором. Условные обозначения здесь и далее по тексту приводятся по: Whitney, Evans, 2010: Amp — амфибол, Bt — биотит, Kfs — калиевый полевошпат, Pl — плагиоклаз, Qz — кварц

Fig. 2. Petrographic features of granodiorites (a, b) and leucogranites (c, d). Photo with analyzer. The symbols used here and throughout the text are given according to Whitney, Evans, 2010: Amp — amphibole, Bt — biotite, Kfs — potassium feldspar, Pl — plagioclase, Qz — quartz



Объект и методы исследования

Отбор проб (гранодиоритов и лейкогранитов) осуществлялся в ходе полевых исследований в 2023 г. и произведен из коренных выходов пород, прослеживающихся по левому берегу р. Большой Казыр (рис. 1, б), где гранодиориты секутся единичными маломощными (до 10 см) дайками лейкогранитов. Общее количество образцов — 6, из них 3 — гранодиориты и 3 — лейкограниты.

Состав первично-магматического апатита, находящегося в виде включений в биотите, амфиболе и кварц-полевошпатовой основной массе, проанализирован в полированных шлифах гранитоидов комплекса. В гранодиоритах зерна апатита приурочены к амфиболу и кварц-полевошпатовой основной массе, в лейкогранитах — к лейсам биотита и полевым шпатам.

Размер зерен апатита гранодиоритов, относящихся к амфиболу, достигает 70–80 мкм, из кварц-полевошпатовой основной массы — 100 мкм. В лейкогранитах, наоборот, максимального размера в 100 мкм достигает апатит, приуроченный к лейсам биотита, тогда как размер апатита из полевых шпатов не превышает 60 мкм, преимущественно составляя 40 мкм.

В целом проанализирован состав 40 зерен, по 20 зерен в каждом типе пород.

Химический состав апатита изучался в полированных шлифах с углеродным напылением на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Tescan Vega 3 (Чехия) с приставкой рентгенофлуоресцентного энергодисперсионного анализа (ЭДС) Oxford Instruments (исследования выполнены в АНО «Развитие человеческого капитала» при ИОК «Техноград», Москва). Ускоряющее напряжение для СЭМ-съемки и анализа составило 20 кВ, предел обнаружения элементов 0.01 %.

Минералого-петрографическая характеристика гранодиоритов и лейкогранитов тигертышского комплекса

Гранодиориты первой фазы внедрения представляют собой слюдисто-роговообманковые равномерно-зернистые, чаще среднезернистые, реже крупнозернистые породы с массивной текстурой. По идиоморфизму зерен структура гипидиоморфнозернистая, гранитная. Текстура массивная; иногда за счет того, что фемические минералы (амфибол и слюда) слагают скопления, текстура отдельных фрагментов близка к такситовой. Основная часть породы сложена полевыми шпатами, амфиболом и кварцем, их сумма достигает 90–95 %. Плаггиоклаз составляет 35–40 %, амфибол — 25–35 %, кварц — до 15–20 %, калиевый полевой шпат — 5–10 %, слюда от 2–3 до 5 %, оставшиеся 2–5 % приходятся на акцессории, представленные цирконом, апатитом, титанитом, ильменитом и магнетитом.

Минералого-петрографические особенности породы показаны на рисунке 2.

Таблитчатые зерна плаггиоклаза, размер которых варьирует от 0.5 до 8 мм, идиоморфны относительно калиевого полевого шпата. Вторичные преобразования представлены сосюритизацией. По составу плаггиоклаз соответствует андезину, реже олигоклазу — An_{29-38} .

Амфибол представлен темно-зелеными, почти черными короткопризматическими зернами, размер которых достигает 5–6 мм. Состав амфибола из центральных частей зерен отвечает эдениту, краевых частей — магнезиальной роговой обманке и актинолиту.

Кварц представлен субизометричными ксеноморфными зернами размером до 2–3 мм.

Калиевый полевой шпат (микроклин) светло-розового цвета встречается в виде таблитчатых зерен

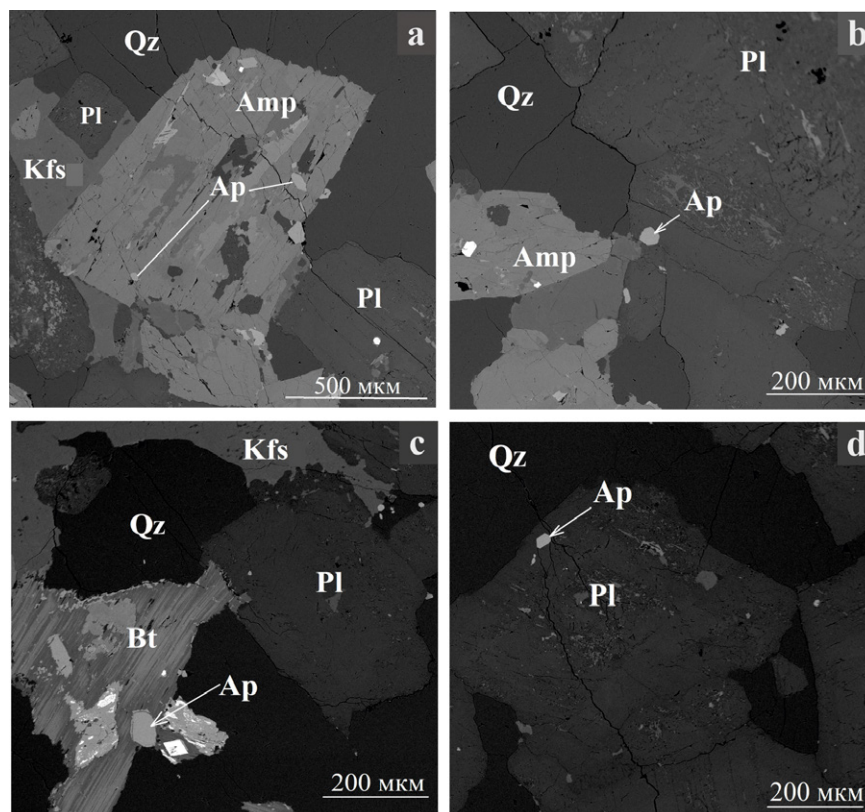


Рис. 3. BSE-изображение апатита в гранодиорите (а, б) и плаггиограните (с, д). Условные обозначения см. на рис. 2

Fig. 3. BSE image of apatite in granodiorite (a, b) and plagiogranite (c, d). See legend in Fig. 2



Таблица 1. Химический состав апатита гранитоидов тигертышского комплекса (мас. %)

Table 1. Chemical composition of apatite from granitoids of the tigertysh complex (wt. %)

№ образца Порода Sample No. Rock	Позиция апатита Position of apatite	P ₂ O ₅	CaO	SiO ₂	SO ₃	Cl	F	Сумма Total
А-1 гранодиорит granodiorite SiO ₂ 63.67 K ₂ O 2.24	Амф Amp	40.30	56.89	0.19	0.08	0.02	2.52	100.00
		39.92	57.17	0.23	0.06	0.02	2.60	100.00
		40.06	57.22	0.18	0.07	0.02	2.45	100.00
		40.11	56.98	0.22	0.08	0.03	2.58	100.00
		39.98	57.12	0.24	0.07	0.03	2.56	100.00
		40.12	56.88	0.26	0.06	0.03	2.65	100.00
	Кв-Пш Qz-Fsp	39.94	57.32	0.18	0.04	0.03	2.49	100.00
		40.12	57.08	0.22	0.01	0.02	2.55	100.00
		40.18	56.95	0.25	0.01	0.02	2.59	100.00
А-2 гранодиорит granodiorite SiO ₂ 63.88 K ₂ O 2.37	Амф Amp	39.89	57.11	0.26	0.06	0.03	2.65	100.00
		39.89	57.23	0.20	0.05	0.03	2.60	100.00
		40.02	57.00	0.20	0.05	0.03	2.70	100.00
	Кв-Пш Qz-Fsp	40.20	56.76	0.24	0.02	0.02	2.76	100.00
		40.01	57.07	0.19	0.02	0.02	2.69	100.00
А-3 гранодиорит granodiorite SiO ₂ 63.72 K ₂ O 2.29	Амф Amp	39.58	57.45	0.23	0.07	0.02	2.65	100.00
		39.95	56.98	0.21	0.11	0.03	2.72	100.00
		39.90	57.02	0.25	0.08	0.02	2.73	100.00
		40.03	57.13	0.18	0.06	0.02	2.58	100.00
	Кв-Пш Qz-Fsp	39.79	57.21	0.18	0.04	0.03	2.75	100.00
		39.85	57.23	0.24	0.01	0.02	2.65	100.00
А-4 лейкогранит leucogranite SiO ₂ 73.68 K ₂ O 4.12	Бт Bt	40.66	57.02	0.23	0.06	0.41	1.62	100.00
		40.38	56.95	0.22	0.05	0.52	1.88	100.00
		40.56	57.02	0.24	0.06	0.44	1.68	100.00
		40.37	57.07	0.22	0.07	0.47	1.80	100.00
		40.46	57.06	0.15	0.06	0.46	1.81	100.00
	Пш Fsp	39.97	57.77	0.21	0.05	0.35	1.65	100.00
		40.01	57.76	0.13	0.06	0.37	1.67	100.00
		40.37	57.48	0.09	0.06	0.38	1.62	100.00
		40.34	57.63	0.15	0.05	0.33	1.50	100.00
А-5 лейкогранит leucogranite SiO ₂ 74.47 K ₂ O 4.25	Бт Bt	40.52	57.19	0.18	0.05	0.40	1.66	100.00
		39.99	57.68	0.16	0.07	0.42	1.68	100.00
	Пш Fsp	41.58	56.25	0.18	0.06	0.39	1.54	100.00
		40.77	57.11	0.21	0.05	0.36	1.50	100.00
		40.65	57.22	0.21	0.06	0.35	1.51	100.00
		40.48	57.27	0.25	0.05	0.38	1.57	100.00
А-6 лейкогранит leucogranite SiO ₂ 73.97 K ₂ O 4.26	Бт Bt	39.97	57.69	0.19	0.05	0.41	1.69	100.00
		40.05	57.58	0.15	0.06	0.44	1.72	100.00
	Пш Fsp	40.50	57.40	0.07	0.04	0.38	1.61	100.00
		40.49	57.32	0.13	0.05	0.39	1.62	100.00
		40.88	56.98	0.14	0.05	0.36	1.59	100.00

размером 1–2 мм, редко встречаются вкрапленники размером 6–7 мм. Под микроскопом устанавливается микроклиновидная решетка (рис. 2, а, б). В виде примеси в микроклине всегда встречается BaO в количестве 0.54–1.68 мас. %.

Лейсты биотита черного цвета достигают 2 мм, к ним приурочены включения титанита и рудных минералов. Плеохроирует биотит от светло-желтого до оливково-зеленого цвета.

Зерна апатита встречаются в виде включений преимущественно в амфиболе (рис. 3, а), реже в кварце, калиевом полевошпате и плагиоклазе (рис. 3, б). Максимальный размер зерен составляет 70–75 мкм.

Лейкограниты второй фазы внедрения — светлые, розовато-серые породы, структура которых изменяется от тонко- до мелкозернистой, по взаимоотно-

шению зерен гранитная, местами пегматитовая, текстура массивная. Минеральный состав (%): кварц (35–40), калиевый полевой шпат (30–35), плагиоклаз (25–35), и хлоритизированный биотит (1–2). Акцессорные минералы суммарно составляют около 5 % и представлены апатитом, титанитом, магнетитом и цирконом.

Кварц выполняет интерстиции, размер зерен составляет 0.2–1.0 мм.

Калиевый полевой шпат (микроклин) представлен светло-бежевыми таблитчатыми зернами, размер которых варьирует от 0.1 до 1 мм. Под микроскопом у калиевого полевого шпата устанавливается микроклиновидная решетка (рис. 2, с, d). Минерал ксеноморфен относительно зерен плагиоклаза, часто образует графические сростания с кварцем (рис. 2, с и d), иногда встречается микроклин-пертит. В виде примеси в микро-



Рис. 4. Тройная диаграмма F-Cl-OH-апатитов.
Условные обозначения: 1 — апатит из гранодиоритов,
2 — апатит из лейкогранитов

Fig. 4. Ternary diagram F-Cl-OH of apatites.
Legend: 1 — apatite from granodiorites, 2 — apatite from leucogranites

клине присутствует BaO в количестве 0.20–1.20 мас. %.

Плагиоклаз встречается в виде идиоморфных таблитчатых зерен размером 0.1–1.0 мм. На контакте с биотитом ксеноморфен. Вторичные преобразования, так же как и в гранодиоритах, представлены соссорицизацией.

Лейсты черного биотита достигают размера 0.2–0.5 мм, к ним приурочены включения циркона и апатита. Плеохроирует биотит от светло-желтого до оливково-зеленого.

Апатит встречается в биотите (рис. 3, с) и в полевых шпатах, главным образом в плагиоклазе (рис. 3, d). Максимальный размер зерен минерала составляет 90–100 мкм.

Обсуждение результатов

Сводный химический состав апатита по 40 определениям приведен в таблице 1.

Для апатита гранитоидов тигертышского комплекса характерно общее резкое преобладание F над Cl и S (таблица 2). При этом состав апатитов из разных типов пород существенно отличается. Также установлено, что в зависимости от приуроченности к разным минералам состав апатита даже из одной породы отличается, главным образом по содержанию серы и хлора.

Апатит гранодиоритов. Апатит из данного типа пород по своему составу соответствует фторапатиту (табл. 2, рис. 4). Содержание фтора в нем варьирует от 2.49 до 2.73 мас. %, хлор не превышает 0.03 мас. %. Основное отличие апатита, приуроченного к амфиболу, от апатита в кварц-полевошпатовой основной массе заключается в более высоких содержаниях серы в первом (0.05–0.11 мас. %) против 0.01–0.04 мас. % во втором.

Апатит лейкогранитов. Содержание фтора в апатите составляет 1.50–1.88 мас. %, хлора — 0.33–0.52 мас. %. Апатит по своему составу соответствует фторапатиту и гидроксилapatиту (табл. 2, рис. 4), при этом фторапатит приурочен исключительно к биотиту, тогда как гидроксилapatит встречается и в биотите, и в полевых шпатах. Апатит из данного вида пород содержит заметно более высокие содержания хлора по сравнению с апатитом из гранодиоритов.

Из примесей в апатите тигертышского комплекса отмечается постоянное присутствие двуокиси кремния (0.07–0.26 мас. %) и серы (0.01–0.11 мас. %). Примесь S в апатите обусловлена изоморфизмом аниона $(\text{PO}_4)^{3-}$ и компенсирующей его заряд группы анионов $(\text{SO}_4)^{2-}$ и $(\text{SiO}_4)^{4-}$ по гетеровалентной схеме изоморфизма $\text{S}^{6+} + \text{Si}^{4+} = 2\text{P}^{5+}$ (Peng et al., 1997).

На классификационных диаграммах состава апатита, позволяющих определить потенциальную рудоносность пород (рис. 5), апатит гранодиоритов и лейкогранитов также отчетливо разделился на две груп-

Таблица 2. Средний состав и вариации содержаний в апатите галогенов и серы (мас. %)
Table 2. Average composition and variations of halogen and sulfur contents in apatite (wt. %)

Элемент Element	Гранодиориты Granodiorite		Лейкограниты Leucogranite	
	Приуроченность зерен апатита / Confinement of apatite grains			
	Кв-Пш /Qz-Fsp (7)	Амф /Amp (13)	Пш / Fsp (11)	Бт / Bt (9)
S _O 3	$\frac{0.01 - 0.04}{0.02}$	$\frac{0.05 - 0.11}{0.07}$	$\frac{0.04 - 0.06}{0.05}$	$\frac{0.05 - 0.07}{0.06}$
Cl	$\frac{0.02 - 0.03}{0.02}$	$\frac{0.02 - 0.03}{0.03}$	$\frac{0.33 - 0.39}{0.37}$	$\frac{0.40 - 0.52}{0.44}$
F	$\frac{2.49 - 2.76}{2.64}$	$\frac{2.45 - 2.73}{2.61}$	$\frac{1.50 - 1.67}{1.58}$	$\frac{1.62 - 1.88}{1.73}$

Формулы апатита рассчитаны методом по зарядам / The formulas are calculated using the charge method:

1. $\text{Ca}_{5.12-5.17}(\text{P}_{2.82-2.86}\text{Si}_{0.02})_{\Sigma 2.84-2.88}(\text{F}_{0.68-0.75}\text{OH}_{0.25-0.32})_{\Sigma 1.00}$ — фторапатит
2. $\text{Ca}_{5.11-5.15}(\text{P}_{2.83-2.86}\text{Si}_{0.02}\text{S}_{0.01})_{\Sigma 2.85-2.89}(\text{F}_{0.67-0.75}\text{OH}_{0.25-0.33})_{\Sigma 1.00}$ — фторапатит
3. $\text{Ca}_{5.04-5.16}(\text{P}_{2.82-2.94}\text{Si}_{0.01-0.02})_{\Sigma 2.84-2.96}(\text{OH}_{0.49-0.54}\text{F}_{0.41-0.46}\text{Cl}_{0.05-0.06})_{\Sigma 1.00}$ — гидроксилapatит
4. $\text{Ca}_{5.10-5.16}(\text{P}_{2.82-2.88}\text{Si}_{0.01-0.02})_{\Sigma 2.84-2.90}(\text{F}_{0.44-0.51}\text{OH}_{0.43-0.50}\text{Cl}_{0.06-0.08})_{\Sigma 1.00}$ — фторапатит и гидроксилapatит

Примечание. Формулы апатита из гранодиоритов: 1 — из кварца и полевых шпатов, 2 — из амфибола; из лейкогранитов: 3 — из полевых шпатов, 4 — из биотита.

Note. Formulas of apatite from granodiorites: 1 — from quartz and feldspars; 2 — from amphibole; from leucogranites: 3 — from feldspars, 4 — from biotite.

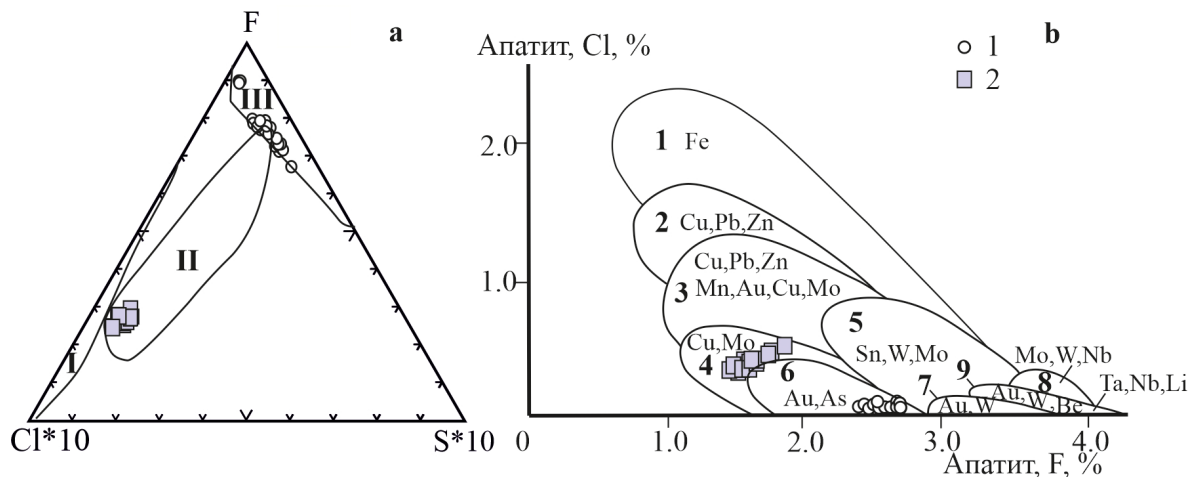


Рис. 5. Диаграммы состава апатитов, позволяющие определить потенциальную рудоносность пород. Позиции полей для диаграммы F – Cl – S (a) приведены по данным: Коровко и др., 2018, для диаграммы F – Cl (b) по данным: Холоднов, Бушляков, 2002. Условные обозначения: 1 — апатит из гранодиоритов, 2 — апатит из лейкогранитов. Поля пород, специализированных на оруденение: I — титаномagnetитовое и скарново-magnetитовое; II — медно-порфировое; III — золотосульфидно-кварцевое и золоторедкометалльное

Fig. 5. Apatite composition diagrams allowing to determine the potential ore content of rocks. The positions of the fields for the F – Cl – S diagram (a) are given according to Korovko et al., 2018, for the F–Cl diagram (b) according to Kholodnov, Bushlyakov, 2002. Legend: 1 — apatite from granodiorites, 2 — apatite from leucogranites. Fields of rocks specialized in mineralization: I — titanomagnetite and skarn-magnetite; II — copper-porphyry; III — gold-sulfide-quartz and gold-rare metal

пы. На диаграмме соотношений F – Cl – S (рис. 5, a) точки состава апатита из гранодиоритов лежат в поле пород продуктивных на золотосульфидно-кварцевое оруденение, диаграмма F – Cl (рис. 5, b) также это подтверждает.

Точки состава апатита из лейкогранитов на обеих диаграммах (рис. 5, a и b) располагаются в поле пород продуктивных на медно-порфировое оруденение.

Известно, что кристаллизующийся интрузив выделяет гидротермальные флюиды, однако высокая степень окисления фракционирующей магмы может притормозить кристаллизацию сульфидов (Richards, 2003). Сера в апатите замещает P в валентности +6, поэтому высокое содержание S указывает на более высокую фугитивность кислорода (Wang et al., 2022). Это подтверждается экспериментальными данными, в которых концентрация SO_3 в апатите увеличивается с ростом фугитивности кислорода (Peng et al., 1997).

Выводы

В результате проведенных исследований установлено наличие нескольких типов апатита в гранитоидах разных фаз внедрения тигертышского комплекса. Апатиты гранодиоритов первой фазы внедрения по составу соответствуют фторапатиту ($F = 2.45–2.76$ мас. %, $Cl = 0.02–0.03$ мас. %, $S = 0.01–0.11$ мас. %). В лейкогранитах второй фазы апатит отвечает гидроксил- и фторапатиту ($F = 1.50–1.80$ мас. %, $Cl = 0.33–0.52$ мас. %, $S = 0.04–0.07$ мас. %). Содержание галогенов и серы указывает на потенциальную рудоносность гранитоидов разных фаз внедрения тигертышского комплекса. С гранодиоритами может быть связано золотосульфидно-кварцевое, а с лейкогранитами — Cu-порфировое оруденение.

Находки жильных проявлений золотосульфидно-кварцевой рудной формации, приуроченные к гранодиоритам, и молибден-медно-порфировой и молиб-

ден-порфировой рудных формаций, связанные с лейкогранитами тигертышского комплекса, подтверждают результаты проведенных исследований.

Литература / References

- Бочарникова Т. Д., Холоднов В. В., Шагалов В. Е. Галогены в апатите как отражение флюидного режима в петро- и рудогенезе Магнитогорского рудно-магматического комплекса (Южный Урал) // Вестник Уральского отделения Российского минералогического общества. 2012. № 9. С. 28–33.
- Bocharnikova T. D., Kholodnov V. V., Shagalov V. E. Halogens in apatite as a reflection of the fluid regime in the petro- and oreogenesis of the Magnitogorsk ore-magmatic complex (Southern Urals). Bulletin of the Ural Branch of the Russian Mineralogical Society, 2012, No. 9, pp. 28–33. (in Russian)
- Веснин В. С., Неволько П. А., Светлицкая Т. В., Фоминых П. М., Бондарчук Д. В. Состав апатита как инструмент оценки рудоносности порфировых систем (на примере Шахтаминского Мо-порфирового и Быстринского Cu-Au-Fe-порфирово-скарнового месторождений, Восточное Забайкалье, Россия) // Геология рудных месторождений. 2024. Т. 66. № 1. С. 113–132. DOI: 10.31857/S0016777024010068
- Vesnina V. S., Nevolko P. A., Svetlitskaya T. V., Fominykh P. M., Bondarchuk D. V. Apatite composition as a tool for assessing the ore content of porphyry systems (using the Shakhhtama Mo-porphyry and Bystrinsky Cu-Au-Fe-porphyry-skarn deposits, Eastern Transbaikalia, Russia as an example). Geology of ore deposits, 2024, V. 66, No. 1, pp. 113–132. (in Russian)
- Владимиров А. Г., Гибшер А. С., Изох А. Э., Руднев С. Н. Раннепалеозойские гранитоидные батолиты Центральной Азии: масштабы, источники и геодинамические условия формирования // Доклады Академии наук. 1999. Т. 369. № 6. С. 795–798.



- Vladimirov A. G., Gibsher A. S., Izokh A. E., Rudnev S. N. Early Paleozoic granitoid batholiths of Central Asia: scales, sources, and geodynamic conditions of formation. *Doklady Earth Sciences*, 1999, V. 369, No. 6, pp. 795–798. (in Russian)
- Врублевский В. В., Котельников А. Д., Руднев С. Н., Крупчатников В. И. Эволюция палеозойского гранитоидного магматизма Кузнецкого Алатау: новые геохимические и U-Pb (SHRIMP-II) изотопные данные // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 2. С. 287–311. DOI: 10.15372/GiG20160202
- Vrublevsky V. V., Kotelnikov A. D., Rudnev S. N., Krupchatnikov V. I. Evolution of Paleozoic granitoid magmatism in the Kuznetsk Alatau: new geochemical and U-Pb (SHRIMP-II) isotopic data. *Geology and Geophysics*, 2016, V. 57, No. 2, pp. 287–311. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Серия Алтае-Саянская. Лист № 45 — Новокузнецк. Объяснительная записка. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 665 с.
- State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1 : 1 000 000. The third generation. The Altai-Sayan series. Sheet № 45 — Novokuznetsk. Explanatory note. Saint Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2007, 665 p. (In Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Издание второе. Серия Минусинская. Лист N-45-XXIV (Балыкса). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2019. 187 с.
- State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1 : 200 000. Second edition. The Minusinskaya series. Sheet № 45-XXIV (Balyksa). Explanatory note. Moscow: Moscow branch of VSEGEI, 2019, 187 p. (in Russian)
- Коновалова Е. В., Холоднов В. В., Прибавкин С. В., Замятин Д. А. Элементы-минерализаторы (сера и галогены) в апатитах Шарташского гранитного массива и Березовского золоторудного месторождения // Литосфера. 2013. № 6. С. 65–72.
- Konovalova E. V., Kholodnov V. V., Podladkin S. V., Zamyatin D. A. Mineralizing elements (sulfur and halogens) in apatites of the Shartash granite massif and the Berezovsky gold deposit. *Lithosphere*, 2013, No. 6, pp. 65–72. (in Russian)
- Коровко А. В., Холоднов В. В., Прибавкин С. В., Коновалова Е. В., Михеева А. В. Галогены и сера в гидроксилсодержащих минералах Восточно-Верхотурского диорит-гранодиоритового массива с минерализацией в виде самородной меди (Средний Урал) // Труды Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого. 2018. № 165. С. 189–193.
- Korovko A. V., Kholodnov V. V., Podladkin S. V., Konovalova E. V., Mikheeva A. V. Halogens and sulfur in hydroxyl-containing minerals of the Vostochno-Verkhotursky diorite-granodiorite massif with mineralization in the form of native copper (Middle Urals). *Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry named after Academician A. N. Zavaritsky*. 2018, No. 165, pp. 189–193. (in Russian)
- Холоднов В. В., Бушляков И. Н. Галогены в эндогенном рудообразовании. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 390 с.
- Kholodnov V. V., Bushlyakov I. N. Halogens in endogenous ore formation. *Yekaterinburg: UB RAS*, 2002, 390 p. (in Russian)
- Шардакова Г. Ю., Коровко А. В., Антонишин Н. А. Условия образования и преобразования, особенности флюидного режима рудно-магматической системы Южно-Сарышаганской гранитной интрузии (Западное Прибалхашье) // Литосфера. 2023. Т. 23. № 5. С. 887–909. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-5-887-909
- Shardakova G. Yu., Korobko A. V., Antonishin N. A. Conditions of formation and transformation, features of the fluid regime of the ore-magmatic system of the South Saryshagan granite intrusion (Western Balkhash region). *Lithosphere*, 2023, V. 23, No. 5, pp. 887–909. (In Russian)
- Ярмолук В. В., Ковач В. П., Коваленко В. И., Сальникова Е. Б., Козловский А. М., Котов А. Б., Яковлева С. З., Федосеенко А. М. Состав, источники и механизмы формирования континентальной коры Озерной зоны каледонид Центральной Азии: I. Геологические и геохронологические данные // Петрология. 2011. Т. 19. № 1. С. 56–79.
- Yarmolyuk V. V., Kovach V. P., Kovalenko V. I., Salnikova E. B., Kozlovsky A. M., Kotov A. B., Yakovleva S. Z., Fedoseenko A. M. Composition, sources and mechanisms of formation of the continental crust of the Caledonian Lake zone of Central Asia: I. Geological and geochronological data. *Petrology*, 2011, V. 19, No. 1, pp. 56–79. (in Russian)
- Belousova E. A., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Fisher N. I. Apatite as an indicator mineral for mineral exploration: Trace-element compositions and their relationship to host rock type // *Journal of Geochemical Exploration*, 2002. Vol. 76. № 1. P. 45–69.
- Chakhmouradian A. R., Reguir E. P., Yang P., Zaitsev A. N., Couëslan C., Xu C., Kynicky J., Mumin A. H. Apatite in carbonatitic rocks: Compositional variation, zoning, element partitioning and petrogenetic significance. *Lithos*, 2017, Vol. 274–275. P. 188–213. DOI: 10.1016/j.lithos.2016.12.037.
- Palma G., Barra F., Reich M., Valencia V., Simon A. C., Vervoort J., Leisen M., Romero R. Halogens, trace element concentrations, and Sr-Nd isotopes in apatite from iron oxide-apatite (IOA) deposits in the Chilean iron belt: Evidence for magmatic and hydrothermal stages of mineralization // *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019. Vol. 246. P. 515–540. DOI: 10.1016/j.gca.2018.12.019.
- O'Sullivan G., Chew D., Kenny G., Henrichs I., Mulligan D. The trace element composition of apatite and its application to detrital provenance studies // *Earth-Science Reviews*, 2020. Vol. 201. P. 103044. DOI: 10.1016/j.earsci-rev.2019.103044.
- Peng G., Luhr J. F., McGee J. J. Factors controlling sulfur concentrations in volcanic apatite // *American Mineralogist*, 1997. Vol. 82. P. 1210–1224.
- Richards J. P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation // *Economic Geology*, 2003. Vol. 98. № 8. P. 1515–1533. DOI: 10.2113/gsecongeo.98.8.1515.
- Wang Y. M., Yang X. Y., Kang X. N., Tang C., Sun J. D., Cao J. Y. Geochemical and mineralogical studies of zircon, apatite, and chlorite in the giant Dexing porphyry Cu-Mo-Au deposit, South China: Implications for mineralization and hydrothermal processes // *Journal of Geochemical Exploration*, 2022. Vol. 240. P. 107042. DOI: 10.1016/j.gexplo.2022.107042
- Whitney D. L., Evans B. W. Abbreviations for names of rock-forming minerals // *American Mineralogist*, 2010. Vol. 95. № 1. P. 185–187. DOI:10.2138/am.2010.3371



Погребение мастера-ювелира на Кокпомъягском могильнике вымской культуры (археологический и археоминералогический аспекты)

Э. А. Савельева¹, В. И. Силаев², В. Н. Филиппов², А. Ф. Хазов²

¹Институт истории, языка и литературы ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
eleonorasav@yandex.ru

²Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия
silae@geo.komisc.ru

Проведенные археоминералогические исследования изделий из цветного и благородного металлов в погребениях № 59 и 115 Кокпомъягского могильника позволили выявить наряду с привозными украшениями из высокопробного серебра отремонтированные изделия на основе оловосеребряного сплава. В рассматриваемом в данной статье погребении № 86 Кокпомъягского могильника обнаружены не только изделия из высокопробного серебра, но и каплевидные слитки серебра, которые могли использоваться как сырье для изготовления серебряных изделий, что подтверждается находками фрагментов простых по технологии изготовления серебряных украшений. Погребальный инвентарь позволяет высказать предположение о принадлежности погребения мастеру-ремесленнику, освоившему навыки серебрения и занимавшему высокий социальный статус в обществе.

Ключевые слова: археология, минералогия, Кокпомъягский могильник, погребение № 86, серебряные, медные, бронзовые, железные предметы

Burial of a Master Jeweler in the Kokpomyag ground of the Vym culture (archaeological and archaeomineralogical aspects)

E. A. Savelyeva¹, V. I. Silaev², V. N. Filippov², A. F. Khazov²

¹Institute of History, Language and Literature FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

²Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

The archaeomineralogical studies of items made of non-ferrous and precious metals in burials No. 59 and 115 of the Kokpomyag burial ground allowed us to identify, along with imported jewelry made of high-grade silver, repaired items based on a tin-silver alloy. In burial No. 86 of the Kokpomyag burial ground, considered in this article, not only high-grade silver items, but also silver balls were found that could have been used as raw material for the manufacture of silver items, which is confirmed by the finds of fragments of silver jewelry made with simple technology. The burial inventory allows assuming that the burial belonged to a master craftsman, who mastered simple silversmithing skills and occupied a high social status in society.

Keywords: archeology, mineralogy, Kokpomyag burial ground, burial No. 86, silver, copper, bronze iron objects

Введение

Благодаря проводимым в настоящее время Институтом языка, литературы и истории и Институтом геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН междисциплинарным археоминералогическим исследованиям получены убедительные свидетельства развития у вычегодских пермян в XIII в. собственного бронзолитейного производства и женского литейного ремесла (Астахова, Савельева, 2022). Вторым важнейшим открытием истории населения бассейна Вычегды в эпоху Средневековья стало обнаружение на Кокпомъягском могильнике привозных серебряных изделий со следами ремонта серебряно-оловянными сплавами, что указывает на владение местными бронзолитейщиками навыками серебрения (Савельева и др., 2024; Силаев и др., 2024). В этой связи особый интерес представляет погребение № 86 на Кокпомъягском могильнике, в котором найдены ювелирные украшения из цветных металлов и серебра, а также впервые обнаружены каплевидные

слитки серебра, ранее не встречавшиеся на памятниках вымской культуры, которые, вероятно, являлись сырьем для изготовления или ремонта серебряных изделий.

Общая характеристика погребения

Кокпомъягский могильник относится к вымской археологической культуре перми вычегодской, датируемой XI–XIV вв. (Савельева, 1987). Он расположен на левом берегу р. Выми, напротив с. Шошка Княжпогостского района Республики Коми, в 700 м к югу от д. Кокпом, в 400 м от долины реки, на боровой террасе высотой 12 м. Погребение № 86 имеет стандартные размеры (225 × 95 × 64 см), расположено в яме с закругленными углами, на дне которой сохранились остатки горелого сруба прямоугольной формы из досок длиной 2 м, шириной 65–78 см. Внутри сруба обнаружены кальцинированные кости. Погребение муж-

Для цитирования: Савельева Э. А., Силаев В. И., Филиппов В. Н., Хазов А. Ф. Погребение мастера-ювелира на Кокпомъягском могильнике вымской культуры (археологический и археоминералогический аспекты) // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 40–50. DOI: 10.19110/geov.2025.4.4

For citation: Savelyeva E. A., Silaev V. I., Filippov V. N., Khazov A. F. Burial of a Master Jeweler in the Kokpomyag ground of the Vym culture (archaeological and archaeomineralogical aspects). Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 40–50, doi: 10.19110/geov.2025.4.4



ское, совершенно по обряду трупосожжения. Предметы погребального инвентаря представлены изделиями из цветных металлов, серебра и железа.

Среди изделий из цветных металлов выделяются медные крестовидная поясная накладка и грушевидный бубенчик-привеска от шумящей подвески (рис. 1, № 4, 10); латунный шаровидный бубенчик с линейной прорезью и поперечным валиком (рис. 1, № 2); бронзовые грушевидный бубенчик-привеска от шумящей подвески и обломок оплавленной ф-образной трубчатой пронизки (рис. 1, № 6, 7). Все эти предметы, кроме крестовидной поясной накладки, являются продуктом литья по восковой модели и носят следы воздействия высоких температур. К серебряным изделиям, обнаруженным в погребении, относятся пластинчатый перстень с прямоугольным щитком, орнаментированный узором в виде двух переплетенных петель с заостренными окончаниями в виде косога креста, вписанных в рамку прямоугольной формы с гравировкой на боковых гранях в виде трапеции, разбитой на три треугольника с точечками (тип 2 по: Руденко, 2015); фрагмент полого полусферического изделия с припаянным колечком из тонкой проволоки, который был предположительно частью одной из половинок полой двусоставной бусины (рис. 1, № 1, 11). Особый интерес представляют каплевидные слитки серебра весом 1.2–2.4 г (рис. 1, № 3). К сопровождающему инвентарю относятся также железное поясное кольцо, обломок железного предмета и два железных наконечника стрелы — ромбовидный черешковый и четырехгранный бронебойный боевой (рис. 1, № 5, 8, 9, 12).

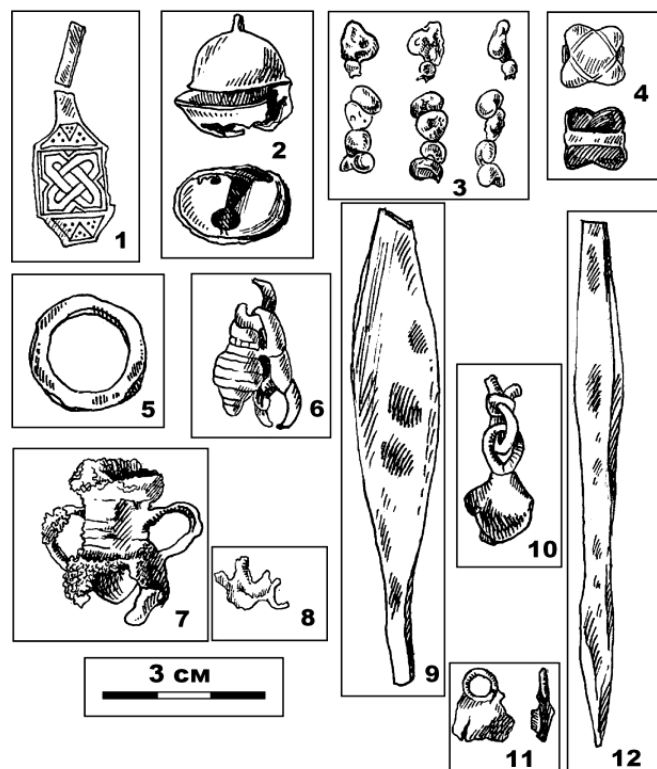


Рис. 1. Предметы инвентаря в погребении № 86 Кокпомьягского могильника. Рисунки Д. В. Осиповой. Пояснения — в тексте

Fig. 1. Inventory items in burial No. 86 of the Kokpomayag burial ground. Drawings by D. V. Osipova. Explanations are above in the text

В ходе исследований была применена аналитическая сканирующая электронная микроскопия (JSM-6400 Jeol) и рентгеновская дифрактометрия (DX2700BH). В качестве эталонов использовались соответствующие металлы, погрешность измерений не превышала 0.01 мас. %.

Материалы и методы

Исследованию были подвергнуты 11 предметов, а именно два медных, один латунный, два бронзовых, три серебряных и три железных. Все металлические фазы по рентгеноструктурным данным — кристаллические.

Крестовидная поясная накладка. Представляет собой прямоугольный предмет с вогнутыми сторонами размером $12.3 \times 12 \times 5$ мм (рис. 2). По химическому со-



Рис. 2. Внешний вид медной крестовидной подвески
Fig. 2. External appearance of a copper cross pendant

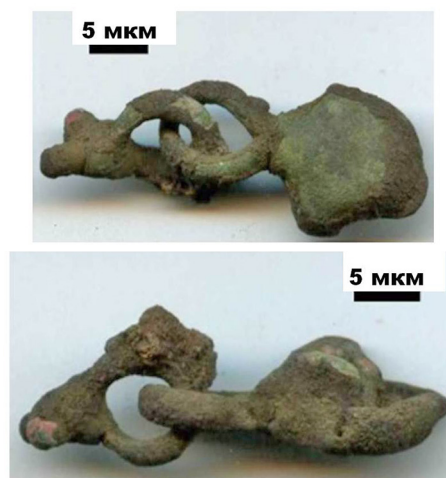


Рис. 3. Внешний вид медного грушевидного бубенчика-привески

Fig. 3. External appearance of a copper pear-shaped bell-pendant



Рис. 4. Внешний вид латунного шаровидного бубенчика
Fig. 4. External appearance of a brass spherical or bell-shaped pendant from a noisy pendant

Таблица 1. Химический состав грушевидного бубенчика-привески от шумящей подвески, мас. %:
1–10 — основная масса, 11–17 — микровключения в основной массе

Table 1. Chemical composition of a pear-shaped bell-pendant from a noisy pendant, wt. %:
1–10 — main mass, 11–17 — microinclusions in the main mass

№ п/п	Cu	Sn	Pb	Fe	Ca	Sb	S	Формулы / Formulas
1	97.28	1.2	1.15	0.37	н. о.	н. о.	н. о.	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Pb})_{0.01}$
2	95.25	2.49	0.74	0.25	»	1.27	»	$\text{Cu}_{0.97}\text{Sn}_{0.01}\text{Sb}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Pb})_{0.01}$
3	96.99	1.91	н. о.	0.3	»	0.8	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0.01}$
4	98.4	0.53	»	0.53	»	н. о.	»	$\text{Cu}_{0.99}(\text{Fe}, \text{Sn})_{0.01}$
5	96.59	2.01	»	0.33	»	1.07	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0.01}$
6	96.34	0.27	»	2.3	»	1.09	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0.01}$
7	96.91	0.45	»	0.45	»	0.82	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0.01}$
8	97.21	1.52	»	0.45	»	0.82	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0.01}$
9	96.47	1.74	0.91	0.88	»	н. о.	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}\text{Fe}_{0.01}$
10	96.58	1.93	н. о.	0.45	»	1.04	»	$\text{Cu}_{0.98}\text{Sn}_{0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0.01}$
Среднее / Average СКО / MSD	96.8 0.8	1.41 0.76	0.28 0.46	0.63 0.61	0	0.69 0.5	0	
11	3.99	н. о.	93.21	н. о.	н. о.	н. о.	2.8	$\text{Pb}_{0.75}\text{Cu}_{0.1}\text{S}_{0.15}$
12	3.46	»	96.54	»	»	»	н. о.	$\text{Pb}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}$
13	2.99	»	97.01	»	»	»	»	$\text{Pb}_{0.91}\text{Cu}_{0.09}$
14	3.54	»	96.46	»	»	»	»	$\text{Pb}_{0.89}\text{Cu}_{0.11}$
15	3.66	»	96.34	»	»	»	»	$\text{Pb}_{0.89}\text{Cu}_{0.11}$
16	4.01	»	94.83	»	1.16	»	»	$\text{Pb}_{0.83}\text{Cu}_{0.11}\text{Ca}_{0.06}$
17	9.17	»	89.41	»	1.42	»	»	$\text{Pb}_{0.7}\text{Cu}_{0.3}$
Среднее / Average СКО / MSD	4.4 2.13	0	94.83 2.73	0	0.37 0.63	0	0.4 1.06	

Примечание: н. о. — не обнаружено; СКО — среднее квадратичное отклонение (здесь и далее в табл.)

Note: н. о. — not detected; MSD — mean square deviation (here and further in the table)

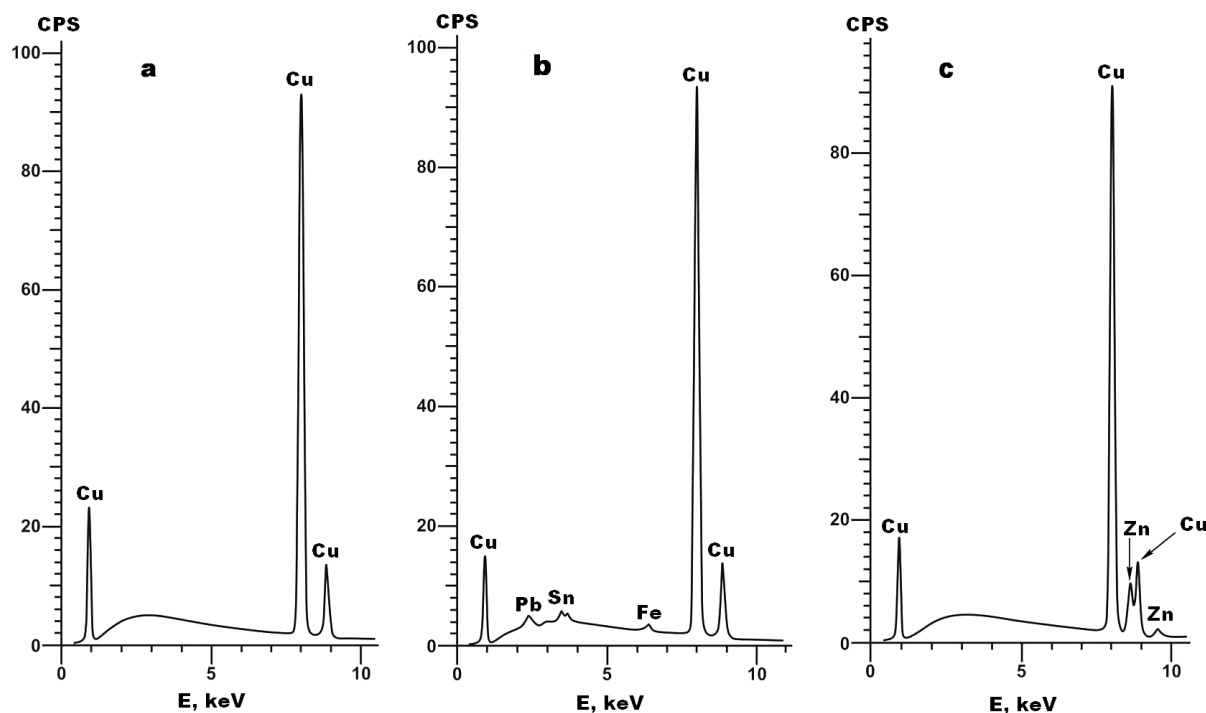


Рис. 5. ЭД-спектры, полученные от медных и латунных предметов: крестовидной поясной подвески (а), грушевидного бубенчика-привески (б) и шаровидного бубенчика (с)

Fig. 5. ED spectra obtained from copper and brass objects: a cross-shaped belt pendant (a), a pear-shaped bell-pendant (b) and a spherical or bell-shaped bell-pendant (c)



ставу — медная, без регистрируемых примесей (рис. 5, а), на поверхности выявлена пленка окисления, сложенная купритом — CuO .

Грушевидный бубенчик-привеска от шумящей подвески размером $24.5 \times 14 \times 13$ мм (рис. 3). По составу может быть определена как оловосодержащая медь (табл. 1, рис. 5, б), поскольку в настоящее время к бронзам относят сплавы с содержанием Sn более 3 мас. %. Основная масса в бубенчике имеет состав $\text{Cu}_{0.97-0.99}\text{Sn}_{0-0.01}(\text{Fe}, \text{Sb})_{0-0.01}$. Выявлены редкие микровключения медно-свинцовой фазы размером до 10 мкм состава $\text{Pb}_{0.7-0.91}\text{Cu}_{0.09-0.3}\text{S}_{0-0.15}$.

Шаровидный бубенчик с линейной прорезью и поперечным валиком. Предмет размером 17×18 мм с ушком (рис. 3). По составу — латунь с содержанием Zn 5–13 мас. % (табл. 2, рис. 5, с) и формулой $\text{Cu}_{0.87-0.95}\text{Zn}_{0.05-0.13}$. Это точно соответствует археологическим средневековым латуням, которые получали сплавлением меди с галмеем (ZnCO_3 и $\text{ZnSiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) в закрытых сосудах при температуре до 1000°C .

Оплавленная ф-образная трубчатая пронизка. Предмет размером $26 \times 31 \times 14$ мм (рис. 6) сложен олово-медным сплавом, варьирующим по составу от низкооловянистых — $\text{Cu}_{0.94-0.96}\text{Sn}_{0.04-0.06}$ — до умеренно оловянистых — $\text{Cu}_{0.91-0.92}\text{Sn}_{0.08-0.09}$ и высокооловянистых — $\text{Cu}_{0.77-0.79}\text{Sn}_{0.21-0.23}$ бронз (табл. 3, рис. 8). Спорадически в основной бронзовой массе выявляются микровключения размером до 5 мкм, сложенные медно-свинцовой фазой состава $\text{Pb}_{0.39-0.77}\text{Cu}_{0.2-0.52}\text{Sn}_{0.03-0.09}$.

Выявленные разновидности средневековой бронзы вполне сопоставимы с современными ее промышленными типами: низкооловянистая соответствует современной литейной деформируемой бронзе, умеренно оловянистая — современной колокольной бронзе, а высокооловянистая — современной белой оловянистой бронзе. Обнаружение в основной массе средневековой бронзы свинцовых микровключений дает воз-

можность оценить температуры плавления. По современным технологиям (Корчмит, Егоров, 2004) известно, что в застывших относительно низкотемпературных ($950-1000^\circ\text{C}$) свинецсодержащих бронзах микровключения свинцовой фазы встречаются чаще, локализуясь в интерстициях матричной фазы, достигая размера 10–20 мкм. В высокотемпературных ($1100-1250^\circ\text{C}$) бронзах свинцовые микровключения редки, большей частью локализуются внутри зерен матричной фазы и по размеру редко превышают 5 мкм. На этом основании бронзы в исследованной пронизке можно отнести к высокотемпературным.

Оловобронзовый грушевидный бубенчик-привеска от шумящей подвески. Украшение размером $34 \times 18 \times 9$ мм (рис. 7), по составу преимущественно бронзовое (табл. 4). Выявлены низкооловянистая — $\text{Cu}_{0.94-0.96}\text{Sn}_{0.04-0.06}$, умеренно оловянистая — $\text{Cu}_{0.91-0.93}\text{Sn}_{0.07-0.09}$ и высокооловянистая — $\text{Cu}_{0.73-0.8}\text{Sn}_{0.2-0.27}$ бронзы. Кроме того, в матричной фазе высокооловянистой бронзы обнаружены редкие микровыведения медистого олова состава $\text{Sn}_{0.51-0.74}\text{Cu}_{0.29-0.49}\text{As}_{0-0.03}$. Очевидно, что эти включения образовались за счет отливки расплава избыточного олова, застывшего в ходе медленного остывания при температуре не выше $250-300^\circ\text{C}$.

Пластинчатый серебряный перстень, орнаментированный узором, вписанным в рамку прямоугольной формы. Размеры украшения — $50 \times 17 \times 5$ мм (рис. 9).

Таблица 2. Химический состав шаровидного бубенчика, мас. %

Table 2. Chemical composition of spherical or bell-shaped pendant bell, wt. %

№ п/п	Cu	Zn	Sn	Pb	Формулы Formulas
1	93.27	6.73	н. о.	н. о.	$\text{Cu}_{0.93}\text{Zn}_{0.07}$
2	91.45	8.55	»	»	$\text{Cu}_{0.92}\text{Zn}_{0.08}$
3	92.73	7.27	»	»	$\text{Cu}_{0.93}\text{Zn}_{0.07}$
4	87.14	12.86	»	»	$\text{Cu}_{0.87}\text{Zn}_{0.13}$
5	92.74	7.26	»	»	$\text{Cu}_{0.93}\text{Zn}_{0.07}$
6	94.5	5.5	»	»	$\text{Cu}_{0.95}\text{Zn}_{0.05}$
7	93.82	5.39	»	0.79	$\text{Cu}_{0.94}\text{Zn}_{0.06}$
8	87.63	12.36	»	н. о.	$\text{Cu}_{0.88}\text{Zn}_{0.12}$
9	90.02	9.98	»	»	$\text{Cu}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}$
10	87.39	12.61	»	»	$\text{Cu}_{0.88}\text{Zn}_{0.12}$
11	88.78	11.22	»	»	$\text{Cu}_{0.89}\text{Zn}_{0.11}$
12	86.11	13.24	0.65	»	$\text{Cu}_{0.87}\text{Zn}_{0.13}$
Среднее Average	90.46	9.41	0.05	0.07	
СКО MSD	2.97	2.98	0.19	0.23	



Рис. 6. Внешний вид бронзовой оплавленной ф-образной трубчатой пронизки

Fig. 6. External appearance of the bronze melted ϕ -shaped tubular penetration



Рис. 7. Внешний вид олово-бронзового грушевидного бубенчика-привески

Fig. 7. External appearance of a tin-bronze pear-shaped pendant bell

Таблица 3. Химический состав оплавленной ф-образной трубчатой пронизки, мас. %: бронзы низкооловянистая (1–3), умеренно оловянистая (4–7), высокооловянистая (8–11), микровключения в бронзах (12, 13)

Table 3. Chemical composition of melted ф-shaped tubular beads, wt. %: low-tin bronze (1–3), moderate-tin bronze (4–7), high-tin bronze (8–11), microinclusions in bronzes (12, 13)

№ п/п	Cu	Sn	Pb	Формула Formula
1	90.99	9.01	н. о.	$\text{Cu}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}$
2	92.17	7.83	»	$\text{Cu}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}$
3	92.18	7.82	»	$\text{Cu}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}$
Среднее Average	91.78	8.22	0	
CKO MSD	0.68	0.68		
4	85.91	14.09	н. о.	$\text{Cu}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$
5	85.53	14.47	»	$\text{Cu}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$
6	84.35	15.65	»	$\text{Cu}_{0.91}\text{Sn}_{0.09}$
7	83.89	16.11	»	$\text{Cu}_{0.91}\text{Sn}_{0.09}$
Среднее Average	84.89	15.07	0	
CKO MSD	0.93	0.96		
8	64.53	35.47	н. о.	$\text{Cu}_{0.77}\text{Sn}_{0.23}$
9	66.39	33.61	»	$\text{Cu}_{0.79}\text{Sn}_{0.21}$
10	65.48	34.52	»	$\text{Cu}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}$
11	66.39	33.61	»	$\text{Cu}_{0.79}\text{Sn}_{0.21}$
Среднее Average	65.7	34.3	0	
CKO MSD	0.89	0.89		
12	27.01	8.16	64.83	$\text{Pb}_{0.39}\text{Cu}_{0.52}\text{Sn}_{0.09}$
13	7.14	1.94	90.92	$\text{Pb}_{0.77}\text{Cu}_{0.2}\text{Sn}_{0.03}$
Среднее Average	17.08	5.05	77.88	
CKO MSD	14.05	4.4	18.45	

По составу перстень практически без примесей (рис. 13, а; табл. 5) — $\text{Ag}_{0.99-1}\text{Cu}_{0-0.01}$, проба оценивается в 995–1000 %. Судя по пробе, серебро в перстне высокотемпературное, температура его плавления превышала 950 °С (Гаврилин, 2000).

Фрагмент серебряного полусферического украшения с припаянным колечком размером 12 × 11 × 1 мм (рис. 10). По составу малопримесное (рис. 13, б; табл. 6) — $\text{Ag}_{0.91-0.97}\text{Cu}_{0.02-0.05}\text{S}_{0-0.06}$, проба составляет 963–986 %. Судя по этим данным, серебро в этом украшении тоже высокотемпературное — выше 950 °С.

Каплевидные слитки высокопробного серебра. Размеры слитков — (6–17) × (6–7) × 5 мм, размер капель в слитках — 5–3 мм (рис. 11). По составу — почти беспримесное серебро (рис. 13, а; табл. 7) — $\text{Ag}_{0.94-1}\text{Cu}_{0-0.03}\text{S}_{0-0.01}$, проба лежит в пределах 967–1000 %. Температура плавления превышала 950 °С.

Ромбовидный черешковый наконечник стрелы размером 90 × 17 × 3 мм (рис. 12). По составу практически

Таблица 4. Химический состав грушевидного бубенчика-привески, мас. %: бронза низкооловянистая (1–4), умеренно оловянистая (5–8), высокооловянистая (9–12), олово медистое (13–15)

Table 4. Chemical composition of the melted pear-shaped bell-pendant, wt. %: low-in bronze (1–4), moderate-tin bronze (5–8), high-tin bronze (9–12) copper-tin (13–15)

№ п/п	Cu	Sn	As	Формула Formula
1	92.32	7.68	н. о.	$\text{Cu}_{0.96}\text{Sn}_{0.04}$
2	90.02	9.98	»	$\text{Cu}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}$
3	89.19	10.81	»	$\text{Cu}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}$
4	89.24	10.76	»	$\text{Cu}_{0.94}\text{Sn}_{0.06}$
Среднее Average	90.19	9.81	0	
CKO MSD	1.46	1.47		
5	86.35	13.65	н. о.	$\text{Cu}_{0.92}\text{Sn}_{0.08}$
6	88.22	11.78	»	$\text{Cu}_{0.93}\text{Sn}_{0.07}$
7	84.64	15.36	»	$\text{Cu}_{0.91}\text{Sn}_{0.09}$
8	86.97	13.03	»	$\text{Cu}_{0.93}\text{Sn}_{0.07}$
Среднее Average	86.55	13.46	0	
CKO MSD	1.49	1.49		
9	60.65	39.35	н. о.	$\text{Cu}_{0.74}\text{Sn}_{0.26}$
10	59.33	40.67	»	$\text{Cu}_{0.73}\text{Sn}_{0.27}$
11	67.92	32.08	»	$\text{Cu}_{0.8}\text{Sn}_{0.2}$
12	66.0	34.0	»	$\text{Cu}_{0.78}\text{Sn}_{0.22}$
Среднее Average	63.47	36.52	0	
CKO MSD	4.13	4.14		
13	74.87	25.13	н. о.	$\text{Sn}_{0.61}\text{Cu}_{0.39}$
14	67.35	32.65	»	$\text{Sn}_{0.51}\text{Cu}_{0.49}$
15	83.75	14.05	2.2	$\text{Sn}_{0.74}\text{Cu}_{0.23}\text{As}_{0.03}$
Среднее Average	75.32	23.94	0.73	
CKO MSD	8.21	9.36	1.27	

беспримесное железо (рис. 13, с; табл. 8) — $\text{Fe}_{0.99-1}\text{P}_{0-0.01}$. На скульптурированной поверхности в ямках наблюдаются буроцветные выделения гетита — $(\text{Fe}_{0.99-1}\text{Al}_{0-0.01}\text{Mn}_{0-0.01})\text{O}(\text{OH})$.

Обломок железного предмета. Матрица по составу беспримесная, но с микровключениями двух типов металлических сплавов (табл. 8): 1) никелево-железо-цинково-медного — $\text{Cu}_{0.38-0.45}\text{Zn}_{0.24}\text{Fe}_{0.17-0.25}\text{Ni}_{0.1-0.19}$; 2) цинково-медно-железо-никелевого — $\text{Ni}_{0.37-0.77}\text{Fe}_{0.2-0.3}\text{Cu}_{0.02-0.26}\text{Zn}_{0.01-0.17}$. На поверхности обломка зафиксирована микропленка гетита (табл. 9).

Результаты и обсуждение

В результате проведенных исследований в погребении № 86 Кокпомъягского могильника установлена своеобразная коллекция медных, латунных, бронзовых, серебряных и железных предметов. Медные укра-

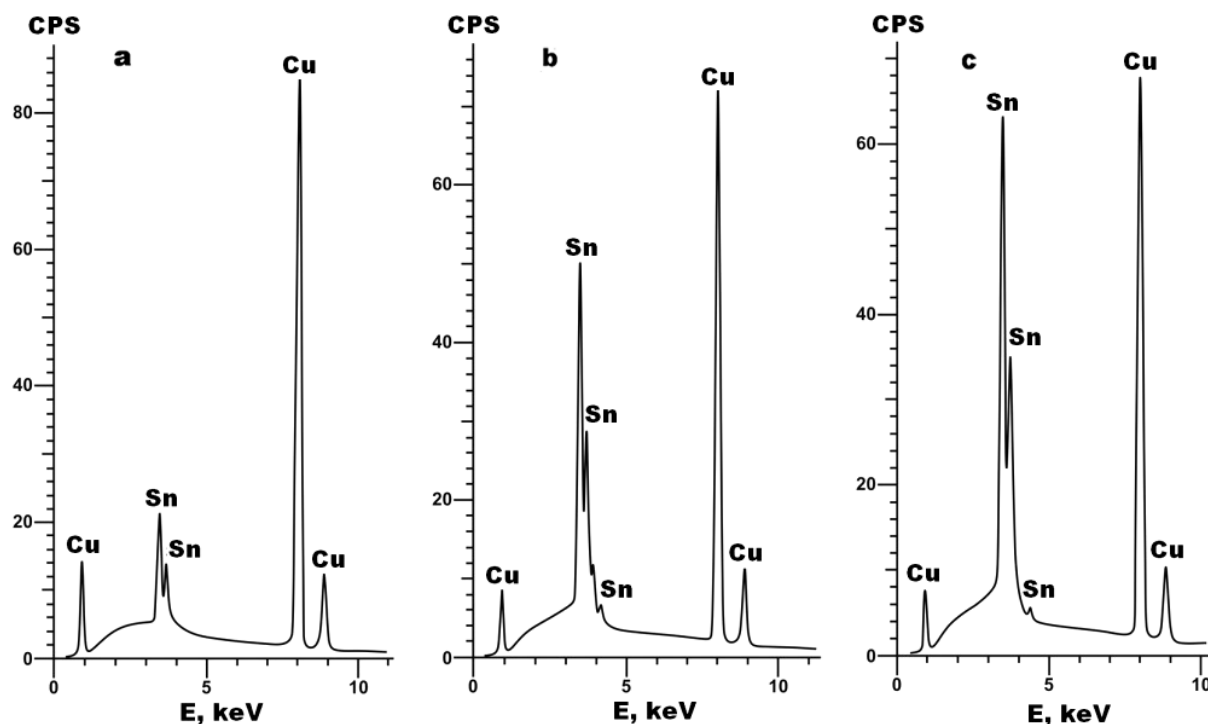


Рис. 8. ЭД-спектры, полученные от археологических бронз: низкооловянистой (а), умеренно оловянистой (б), высокооловянистой (с)

Fig. 8. ED spectra obtained from archaeological bronzes: low-tin (a), moderate-tin (b), high-tin (c)

Таблица 5. Химический состав пластинчатого перстня, мас. %

Table 5. Chemical composition of the plate ring, wt. %

№ п/п	Ag	Cu	Формулы Formulas
1	100	н. о.	Ag
2	100	»	Ag
3	100	»	Ag
4	99.47	0.53	Ag _{0.99} Cu _{0.01}
5	100	н. о.	Ag
6	100	»	Ag
7	100	»	Ag
8	99.51	0.49	Ag _{0.99} Cu _{0.01}
9	100	н. о.	Ag
Среднее Average	99.89	0.11	
СКО MSD	0.22	0.23	

шения характеризуются незначительными примесями Sn, Fe, Sb, содержат микровключения медно-свинцовой фазы, на поверхности покрыты микропленкой окисления из куприта CuO. Латунный предмет соответствует по составу аналогичным археологическим находкам, которые получали сплавлением металлической меди с галмеем (карбонатной и силикатной цинковой рудой). Но по сравнению с латунью в грушевидном бубенчике из погребения № 59 исследованный предмет характеризуется гораздо более чистым и более цинкистым составом. В бронзовых украшениях выявлены три типа практически беспримесных бронз (рис. 14): низкооловянистая Cu_{0.94–0.96}Sn_{0.04–0.06}, умеренно оловянистая Cu_{0.91–0.93}Sn_{0.07–0.09}, высокооловя-

Таблица 6. Химический состав полусферического украшения с припаянным колечком, мас. %

Table 6. Chemical composition of hemispherical decoration with a soldered ring, wt. %

№ п/п	Ag	Cu	S	Формулы Formulas
1	96.28	1.58	2.14	Ag _{0.91} Cu _{0.03} S _{0.06}
2	97.24	1.3	1.46	Ag _{0.93} Cu _{0.02} S _{0.05}
3	98.63	1.37	н. о.	Ag _{0.98} Cu _{0.02}
4	97.68	2.32	»	Ag _{0.96} Cu _{0.04}
5	97.23	2.77	»	Ag _{0.95} Cu _{0.05}
6	98.05	1.95	»	Ag _{0.97} Cu _{0.03}
Среднее Average	97.51	1.88	0.6	
СКО MSD	0.8	0.58	0.95	

нистая Cu_{0.73–0.8}Sn_{0.2–0.27} — с микровключениями оловосвинцовой фазы (рис. 15). Все выявленные типы археологических бронз сопоставимы с современными промышленными типами бронз: соответственно с литейной деформируемой, колокольной и белой оловянистой. Судя по размеру микровключений они выплавлялись при температуре выше 1100 °C.

Сопоставление данных по медным, латунным и бронзовым предметам в погребениях Кокпомыгского могильника (Силаев и др., 2024; Савельева и др. 2024) показывает, что рассматриваемое погребение отличается особо качественным составом цветнометаллических сплавов и наиболее высокой температурой их получения.

Шаровидный бубенчик с линейной прорезью и поперечным валиком имеет аналогии в древностях Новгорода, где они найдены в слоях со второй поло-



Рис. 9. Пластинчатый перстень, орнаментированный узором, вписанным в рамку прямоугольной формы

Fig. 9. Plate ring, decorated with a pattern inscribed in a rectangular frame



Рис. 11. Каплевидные слитки высокопробного серебра

Fig. 11. Teardrop shaped bars of high-grade silver



Рис. 10. Фрагмент серебряного полусферического украшения с припаянным колечком

Fig. 10. Fragment of a silver hemispherical decoration with a soldered ring



Рис. 12. Ромбовидный наконечник стрелы

Fig. 12. Diamond-shaped arrow head

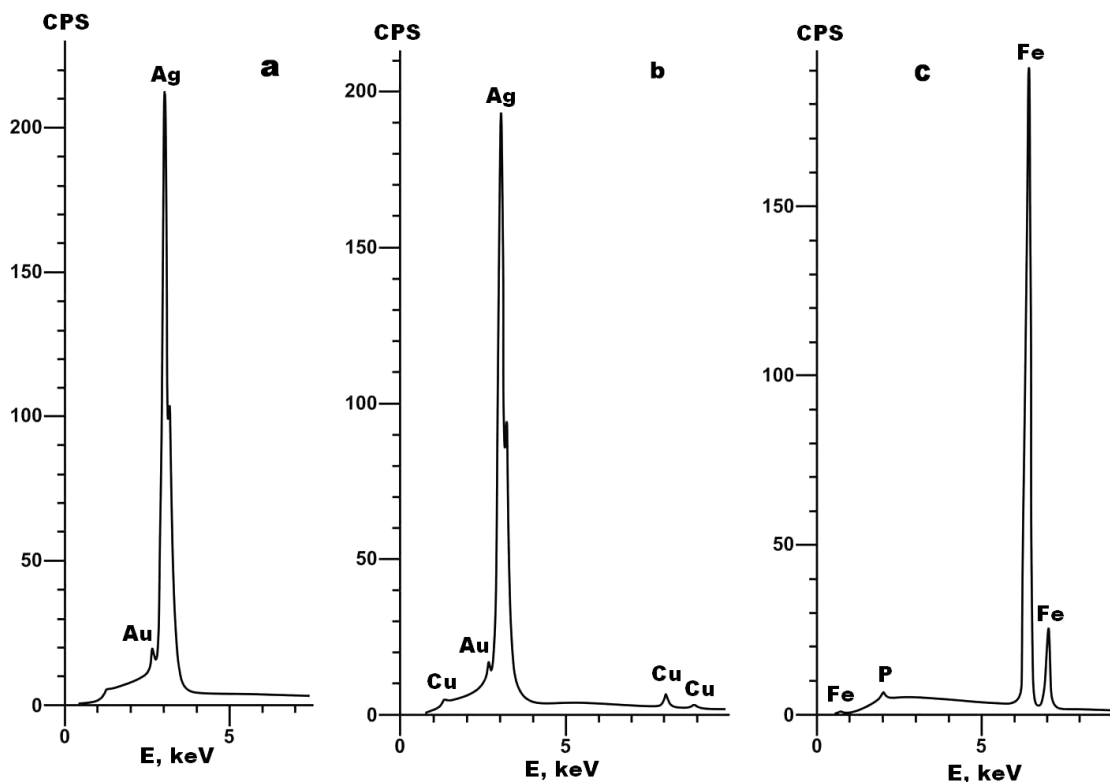


Рис. 13. ЭД-спектры, полученные от серебряных (а, б) и железных (с) предметов

Fig. 13. ED spectra obtained from silver (a, b) and iron (c) objects



Таблица 7. Химический состав каплевидных слитков серебра, мас. %

Table 7. Chemical composition of teardrop-shaped silver ingots, wt. %

№ п/п	Ag	Cu	S	Формулы Formulas
1	99.34	0.66	н. о.	$Ag_{0.99}Cu_{0.01}$
2	98.57	0.96	0.47	$Ag_{0.97}Cu_{0.02}S_{0.01}$
3	97.99	0.6	1.41	$Ag_{0.98}Cu_{0.02}$
4	99.04	0.96	н. о.	$Ag_{0.98}Cu_{0.02}$
5	96.67	3.33	»	$Ag_{0.94}Cu_{0.06}$
6	100	н. о.	»	Ag
7	98.79	1.21	»	$Ag_{0.98}Cu_{0.02}$
8	98.09	1.91	»	$Ag_{0.97}Cu_{0.03}$
Среднее Average	98.56	1.2	0.24	
СКО MSD	1.01	1.02	0.5	

вины XIII в. до конца XIV в. (Седова, 1981). По Ю. М. Лесману, древнейшие из них датируются 1224 г. – серединой 1260-х годов, верхняя хронологическая граница не определяется (Лесман, 1988). Ф-образные трубчатые пронизки являются типичными украшениями для родановской и вымской культур (Оборин, 1979), но встречаются и за пределами Прикамья и Вычегодского бассейна — на средневековых памятниках Карелии (Кочкуркина, 1972), на финно-угорских памятниках Северо-Западной Руси, в Костромском Поволжье (Рябинин, 1997), в Зауралье (Арне, 2005), где датируются XI–XIII вв. На памятниках вымской культуры они входят в хронологическую группу предметов XIII в. (Савельева, 1987). Бронзовые крестовидные накладки являются характерными украшениями средневекового финно-угорского населения Приобья (Чернецов, 1957; Викторова, 1973), на вымских могильниках они датируются также XIII в. (Савельева, 1987).

Исследованные серебряные предметы — пластинчатый перстень, полусферическое украшение и каплевидные слитки — характеризуются тождественным со-

Таблица 8. Химический состав ромбовидного черешкового наконечника стрелы (1–4), обломка железного предмета (5–19) и микровключений в обломке (20–26), мас. %

Table 8. Chemical composition of diamond-shaped petoline tip of arrow head (1–4), a fragment of an iron object (5–19) and microinclusions in a fragment (20–26), wt. %

№ п/п	Fe	Ni	Cu	Zn	Si	P	Формулы / Formulas
1	99.74	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.26	Fe
2	99.73	»	»	»	»	0.27	Fe
3	99.76	»	»	»	»	0.24	Fe
4	99.69	»	»	»	»	0.31	$Fe_{0.99}P_{0.01}$
Среднее / Average СКО / MSD	99.73 0.03	0	0	0	0	0.27 0.03	
5	99.29	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	0.71	Fe
6	99.38	»	»	»	»	0.62	Fe
7	98.97	»	»	»	0.22	0.81	Fe
8	99.24	»	»	»	н. о.	0.76	Fe
9	99.68	»	»	»	»	0.32	Fe
10	99.45	»	»	»	»	0.55	Fe
11	99.5	»	»	»	»	0.5	Fe
12	99.49	»	»	»	»	0.51	Fe
13	99.65	»	»	»	»	0.34	Fe
14	99.55	»	»	»	»	0.45	Fe
15	99.55	»	»	»	»	0.45	Fe
16	99.54	»	»	»	»	0.46	Fe
17	99.69	»	»	»	»	0.31	Fe
18	99.63	»	»	»	»	0.37	Fe
19	99.71	»	»	»	»	0.29	Fe
Среднее / Average СКО / MSD	99.49 0.2	0	0	0	0.01 0.06	0.5 0.17	
20	22.69	12.82	38.81	25.68	н. о.	н. о.	$Cu_{0.38}Fe_{0.25}Ni_{0.13}Zn_{0.24}$
21	17.46	18.59	38.96	24.99	»	»	$Cu_{0.38}Fe_{0.19}Ni_{0.19}Zn_{0.24}$
22	15.44	9.34	46.19	29.03	»	»	$Cu_{0.45}Fe_{0.17}Ni_{0.1}Zn_{0.24}$
23	18.08	36.38	27.5	18.04	»	»	$Cu_{0.38}Fe_{0.25}Ni_{0.13}Zn_{0.24}$
24	36.85	59.42	2.69	1.04	»	»	$Ni_{0.37}Fe_{0.2}Cu_{0.26}Zn_{0.17}$
25	28.57	68.3	2.43	0.7	»	»	$Ni_{0.58}Fe_{0.5}Cu_{0.02}Zn_{0.01}$
26	13.97	76.78	5.82	3.43	»	»	$Ni_{0.77}Fe_{0.3}Cu_{0.02}Zn_{0.01}$
Среднее / Average СКО / MSD	21.87 8.24	40.23 27.93	23.2 19.12	14.7 12.6	0	0	

Таблица 9. Химический состав поверхностной пленки окисления на наконечнике стрелы (1–7) и обломке железного предмета (8), мас. %

Table 9. Chemical composition of the surface oxidation film on the arrowhead (1–7) and a fragment of an iron object (8), wt. %

№ п/п	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MnO	P ₂ O ₅	Формулы / Formulas
1	98.96	0.64	0.4	н. о.	(Fe _{0.98} Al _{0.01} Mn _{0.01})O(OH)
2	99.24	0.76	н. о.	«	(Fe _{0.99} Al _{0.01})O(OH)
3	100	н. о.	«	«	FeO(OH)
4	98.92	0.73	«	«	(Fe _{0.98} Al _{0.02})O(OH)
5	100	н. о.	«	«	FeO(OH)
6	99.16	0.84	«	«	(Fe _{0.98} Al _{0.02})O(OH)
7	100	н. о.	«	«	FeO(OH)
Среднее / Average	99.47	0.42	0.06	0	
СКО / MSD	0.51	0.4	0.15		
8	98.79	«	«	1.21	FeO(OH)

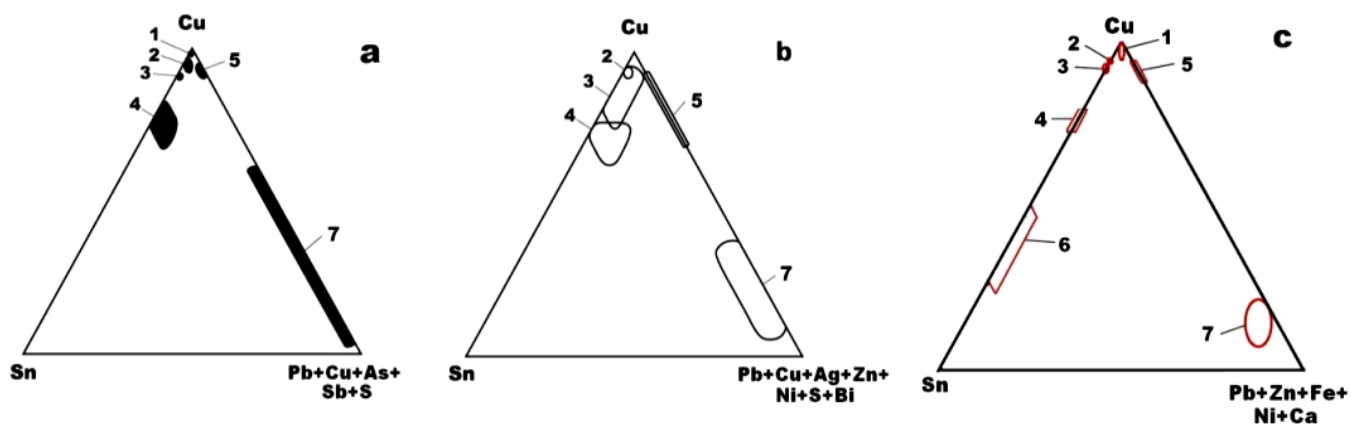


Рис. 14. Сводная диаграмма химического состава медных, латунных и бронзовых предметов из погребений № 59 (а), 115 (b) и 86 (с) на территории Кокпомьягского могильника. Предметы: 1 — медные; 2–4 — бронзовые, соответственно низко-, умеренно и высоко-оловянистые; 5 — латунные; 6 — медисто-оловянные. 7 — микровключения в предметах

Fig. 14. Summary diagram of the chemical composition of copper, brass and bronze objects from burial No. 59 (a), 115 (b) and 86 (c) on the territory of the Kokpomiyag burial ground. Objects: 1 — copper; 2–4 — bronze, respectively low-, moderate and high-tin; 5 — brass; 6 — copper-tin. 7 — microinclusions in objects

ставом и внутренним строением. Они имеют практически беспримесный или малопримесный состав — $Ag_{0.91-1}Cu_{0-0.05}Sb_{0-0.01}$ и пробу соответственно 963–986 и 967–1000 ‰. Такое серебро можно получить лишь в высокотемпературных условиях при 950 °C и выше.

Серебряный пластинчатый перстень с прямоугольным орнаментированным щитком по узору похож на рисунки на эмали, нанесенные на предметы Древней Руси домонгольского периода IX–XIII вв. Аналогии выявлены также на памятниках Пермского Предуралья (Брюхова, Подосенова, 2015), в Тобольском Прииртышье (Адамов, 2022), хотя между ними и Кокпомьягским могильником имеются некоторые отличия. В настоящее время пермскими археологами такие предметы датируются XIII–XIV вв., а на вымских могильниках они отнесены ко второй половине XIII в. (Савельева, 1987). На основе приведенных аналогий погребение № 86 может быть датировано второй половиной XIII в.

Итак, анализ изученного погребального инвентаря, часть которого может быть определена как сырье для переплавки, позволяет высказать предположение о принадлежности погребения № 86 ювелиру-литейщику, не только занимавшемуся бронзолитейным про-

изводством, но и овладевшему навыками серебрения. О появлении в рассматриваемый период мастеров, занимавшихся серебрением, свидетельствуют и найденные в других погребениях на Кокпомьягском могильнике серебряные изделия местного производства. К ним относятся широкосрединный перстень без декора (погребение № 69); привеска, имитирующая бубенчик, где дужка выполнена из медной проволоки, а тулово из серебра (погребение № 177); серебряные пластинки, определяемые как держатели подвесок (погребения № 74, 115).

Заключение

В целом полученные данные свидетельствуют о том, что в погребении № 86 был захоронен литейщик, отличающийся высоким мастерством. На это указывают и широкий ассортимент металлургических изделий, узкий диапазон вариации их состава по всем группам украшений, явное владение высокотемпературными металлургическими технологиями. Такие мастера-умельцы в эпоху Средневековья на территории Пермского Предуралья занимали высокий социальный статус, наделялись магическими свойствами (Белавин,

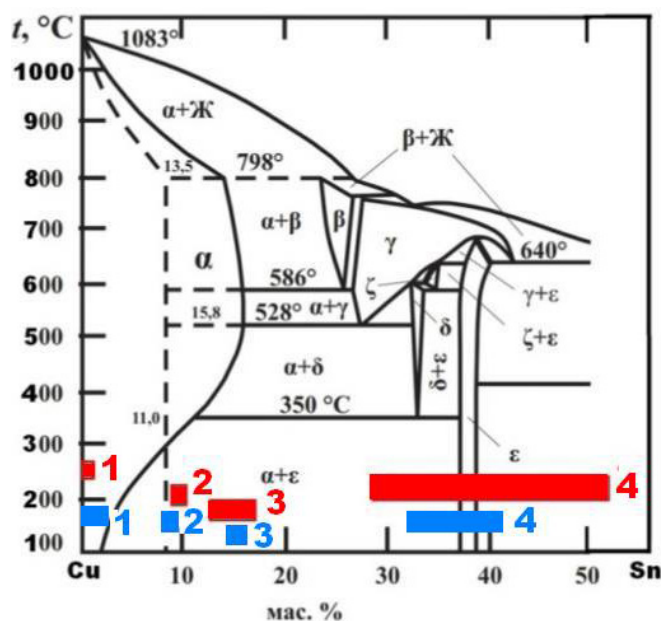


Рис. 15. Фазовая диаграмма системы сплавов Cu–Sn по: Riederer, 1984. Красными и синими отрезками показаны диапазоны варьирования металлов и сплавов в продуктах могильников соответственно № 115 и 86. Металлы и сплавы: 1 — медь; 2–4 — бронзы соответственно низко-, умеренно и высокооловянистые

Fig 15. Phase diagram of the Cu–Sn alloy system according to: Riederer, 1984. The red and blue segments show the ranges of variation of metals and alloys in the products of burial grounds No. 115 and 86, respectively. Metals and alloys: 1 — copper; 2–4 — bronzes, respectively low-, moderate-, and high-tin

2001). Есть основания предполагать принадлежность литейщика в исследованном погребении также к социальной верхушке местного населения, что подтверждается богатым погребальным инвентарем, включающим два железных наконечника стрелы, один из которых боевой.

Авторы выражают благодарность Ю. А. Подосеновой, с. н. с. Института гуманитарных исследований Пермского ФИЦ УрО РАН, за консультации по технологии изготовления изделий из цветного металла и серебра. Рисунок предметов погребального инвентаря в погребении № 86 выполнен Д. В. Осиповой.

Исследования проводились по двум госбюджетным темам: 1) № ГР 122040600009-2 (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) — «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий»; 2) № ГР 121042600199-5 (ИЯЛИ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) — «Особенности формирования населения севера европейской части России в эпоху камня, раннего металла и средневековья по данным археологии».

Литература / References

Адамов А. А. Серебряные перстни XII–XIV вв. из Тобольского Прииртышья. Екатеринбург: УрО РАН, 2022. 136 с.
Adamov A. A. Silver rings of the 12th–14th centuries from the Tobolsk Irtysh region. Yekaterinburg: UB RAS, 2022, 136 p. (in Russian)

Арне Т. Й. Барсов городок. Западносибирский могильник железного века. Екатеринбург; Surgut: Уральский рабочий, 2005. 182 с.

Arne T. I. Barsov town. West Siberian burial ground of the Iron Age. Yekaterinburg. Surgut: Uralsky rabochy, 2005, 182 p. (in Russian)

Астахова И. С., Савельева Э. А. Бронзолитейное производство вычегодских пермлян (по материалам нижневычегодского Чежтыягского могильника) // Вестник геонаук. 2022. № 4. С. 38–50. DOI: 10.19110/geov.2022.4.2
Astakhova I. S., Savelyeva E. A. Bronze casting production of the Vychehda Permians (based on the materials of the Lower Vychehda Chezhtyag burial ground). Vestnik of Geosciences, 2022, No. 4, pp. 38–50. (in Russian)

Белавин А. М. Ремесленные центры Пермского Предуралья в системе средневековой торговли // Древние ремесленники Приуралья: Материалы Всероссийской научной конференции. Ижевск: Удмуртский институт истории, языка и литературы, 2001. С. 139–159.

Belavin A. M. Craft centers of the Perm Cis-Urals in the system of medieval trade. Ancient artisans of the Urals: Proceedings of the All-Russian scientific conference. Izhevsk: Udmurt Institute of History, Language and Literature, 2001, pp. 139–159. (in Russian)

Брюхова Н. Г., Подосенова Ю. А. Перстни «булгарского» типа из материалов Плотниковского могильника родановской археологической культуры: техника изготовления // Известия Самарского НЦ РАН. 2015. Т. 17, № 3. С. 304–311.

Bryukhova N. G., Podosenova Yu. A. Rings of the «Bulgar» type from the materials of the Plotnikovsky burial ground of the Rodanov archaeological culture: manufacturing technique. Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2015, V. 17, No. 3, pp. 304–311. (in Russian)

Викторова В. Д. Ликинский могильник X–XIII вв. // Вопросы археологии Урала. Свердловск, 1973. Вып. 12. С. 133–168.

Viktorova V. D. Likinsky burial ground of the 10th–13th centuries. Issues of archeology of the Urals. Sverdlovsk, 1973, 12, pp. 133–168. (in Russian)

Гаврилин И. В. Плавление и кристаллизация металлов и сплавов. Владимир: Владимирский госуниверситет, 2000. 260 с.

Gavrilin I. V. Melting and Crystallization of Metals and Alloys. Vladimir: Vladimir State University, 2000, 260 p. (in Russian)

Кочкуркина С. И. Древняя корела. Л.: Наука, 1982. 222 с.
Kochkurkina S. I. Ancient Korela. Leningrad: Nauka, 1982, 222 p. (in Russian)

Кортчмит А. В., Егоров Ю. П. Влияние температуры заливки на распределение свинцовых включений в многокомпонентной свинцово-оловянистой бронзе // Известия Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 6. С. 105–108.

Kortchmit A. V., Egorov Yu. P. Effect of pouring temperature on the distribution of lead inclusions in multi-component lead-tin bronze. Bulletin of Tomsk Polytechnic University, 2004, V. 307, No. 6, pp. 105–108. (in Russian)

Лесман Ю. М. Хронология ювелирных изделий Новгорода (X–XIV) // Материалы по археологии Новгорода – 1988. М.: Наука, 1990. С. 29–98.



- Lesman Yu. M. Chronology of Novgorod Jewelry (10th–14th Centuries). Materials on the Archaeology of Novgorod 1988. Moscow: Nauka, 1990, pp. 29–98. (in Russian)
- Руденко К. А. Булгарское серебро. Казань: Заман, 2015. 528 с.
- Rudenko K. A. Bulgar silver. Kazan: Zaman, 2015, 528 p. (in Russian)
- Рябинин Е. А. Финно-угорские племена в составе Древней Руси. СПб., 1997. 260 с.
- Ryabinin E. A. Finno-Ugric tribes as part of Ancient Russia. St. Petersburg, 1997, 260 p. (in Russian)
- Савельева Э. А. Вымские могильники XI–XIV вв. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 200 с.
- Savelyeva E. A. Vym burial grounds of the 11th–14th centuries. Leningrad: Leningrad State University Press, 1987, 200 p. (in Russian)
- Савельева Э. А., Силаев В. И., Филиппов В. Н., Хазов А. Ф. Цветные и благородные металлы в погребении № 115 Кокпомьягского могильника вымской культуры: археологический и археолого-минералогический аспекты // Известия Коми НЦ УрО РАН. Серия «История и филология». 2024. № 1. С. 22–34. DOI 10.19110/1994-5655-2024-1-22-34
- Savelyeva E. A., Silaev V. I., Filippov V. N., Khazov A. F. Non-ferrous and precious metals in burial No. 115 of the Kokpomyag burial ground of the Vym culture: archaeological and archaeological-mineralogical aspects. Proc. Komi SC UB RAS. Series «History and Philology», 2024, No. 1, pp. 22–34. (in Russian)
- Седова М. В. Ювелирные изделия Древнего Новгорода. М.: Наука, 1981. 195 с.
- Sedova M. V. Jewelry of Ancient Novgorod. Moscow: Nauka, 1981, 195 p. (in Russian)
- Силаев В. И., Савельева Э. А., Филиппов В. Н., Хазов А. Ф. Минералого-геохимический анализ металлических украшений погребения № 59 Кокпомьягского могильника вымской культуры перми вычегодской // Вестник геонаук. 2024. № 4. С. 3–20. DOI: 10.19110/geov.2024.4.1
- Silaev V. I., Savelyeva E. A., Filippov V. N., Khazov A. F. Mineralogical and geochemical analysis of metal decorations of burial No. 59 of the Kokpomyag burial ground of the Vym culture of the Vychegda Permian. Vestnik of Geosciences, 2024, No. 4, pp. 3–20. (in Russian)
- Чернецов В. Н. Нижнее Приобье в I тыс. н.э. // МИА. № 58; Культура древних племен Приуралья и Западной Сибири. М.: АН СССР, М. 1957. 252 с.
- Chernetsov V. N. Lower Ob region in the 1st millennium AD. MIA, No. 58; Culture of the ancient tribes of the Urals and Western Siberia. Moscow: USSR AS, 1957, 252 p. (in Russian)
- Riederer J. Metallanalysen omischer Bronsen // Toreutek und figurliche Bronzen romischer Zeit, Akten der 6. Tagung uber antike Bronzen, Berlin, 1980. Berlin. 1984. P. 220–225.

Поступила в редакцию / Received 05.03.2025



Из опыта преподавания. XVII. Бордюры и предельные группы Кюри.

Ю. Л. Войтеховский

Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

Российское минералогическое общество, Санкт-Петербург, Россия

vojtechovskij@herzen.spb.ru

При замыкании конечного линейного орнамента в кольцо трансляция вдоль прямой переходит во вращение вокруг оси симметрии конечного порядка. На бесконечном кольце возникает естественная аналогия групп симметрии кристаллографических бордюров и предельных групп симметрии Кюри с одной осью ∞ . Но первых семь, а вторых пять. Еще две выделены в статье из предельных групп ∞/m вращающегося и ∞/mm покоящегося цилиндров. Тем самым достигнуто взаимно однозначное соответствие. Пример рекомендован для рассмотрения в университетском курсе кристаллографии по темам «Группы симметрии бордюров» и «Предельные группы Кюри».

Ключевые слова: группы симметрии бордюров, предельные группы Кюри

From teaching experience. XVII. Borders and Curie's limit groups

Yu. L. Voytekhoysky

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

Russian Mineralogical Society, Saint Petersburg, Russia

When closing a finite linear ornament into a ring, translation along a straight line turns into rotation around a finite-order symmetry axis. A natural analogy between the symmetry groups of crystallographic borders and Curie's limit symmetry groups with one ∞ axis arises on an endless ring. But the former are seven and the latter are five. Another two are isolated in the paper from the limit groups ∞/m of rotating and ∞/mm of common cylinders. Thereby a mutually unambiguous correspondence has been achieved. The example is recommended for consideration in the university course of crystallography on the topics «Symmetry groups of borders» and «Curie's limit groups».

Keywords: symmetry groups of borders, Curie's limit groups

Введение

Однажды во время лекции о кристаллографических бордюрах, т. е. линейных односторонних ритмично упорядоченных орнаментах (Шубников, 1940), нами было отмечено, что наши прабабушки, замыкая ритмические узоры на платях, рубахах, фуражках и тюбетейках, всякий раз превращали трансляции в поворотные оси. Математический формализм позволяет замкнуть кристаллографический бордюр в «бесконечно удаленной точке» (это непросто представить), тем самым создав ось ∞ бесконечного порядка, ведь на бесконечном кольце умещается бесконечно много конечных (даже как угодно больших) повторяющихся фрагментов орнамента. Но каждый изучавший кристаллографию должен ощутить здесь некую опасность. С бесконечностями всегда так...

В кристаллографию ось ∞ ввел П. Кюри для описания физических сред, полей и свойств кристаллов. Идея родилась в пору его работы в минералогической лаборатории Сорбонны и открытия пьезоэлектричества в 1880 г. (Шпольский, 1956), но систематически изложена в статьях 1883–1884 гг., много раз переизданных (Curie, 1894, 1908; Кюри, 1966а, 1966б, 1966в).

С точки зрения симметрии бордюров и предельных групп Кюри по семь — замечательное совпадение! Но среди последних лишь пять с одной осью ∞ , а две сферические к нашему случаю не относятся. Тогда где еще 2 группы? Или 2 бордюра при замыкании исчезают? Обсуждению этой коллизии и посвящена статья.

Иерархия бордюров и предельных групп Кюри

К иерархиям бордюров и групп Кюри сделаем несколько пояснений. В предложенных ранее обозначениях бордюров (Войтеховский, 2020, 2021) буквами обозначены (рис. 1, слева): продольная плоскость Р, поперечная П, центр инверсии С (эквивалентен ортогональной бордюру оси L_2), трансляция Т и скользящее отражение T^* (композиция Т и отражения в Р на половине трансляции). Их полный перечень в символе упрощает сравнение бордюров. При этом Т вкладывается в T^* , а T^* — в РТ (рис. 1, справа).

Многие отдавали должное П. Кюри в связи с предельными группами симметрии, но большей частью ввиду их приложений к физическим объектам и являе-

Для цитирования: Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. XVII. Бордюры и предельные группы Кюри // Вестник геонаук. 2025. 4(364). С. 51–56. DOI: 10.19110/geov.2025.4.5

For citation: Voytekhoysky Yu. L. From teaching experience. XVII. Borders and Curie's limit groups. Vestnik of Geosciences, 2025, 4(364), pp. 51–56, doi: 10.19110/geov.2025.4.5

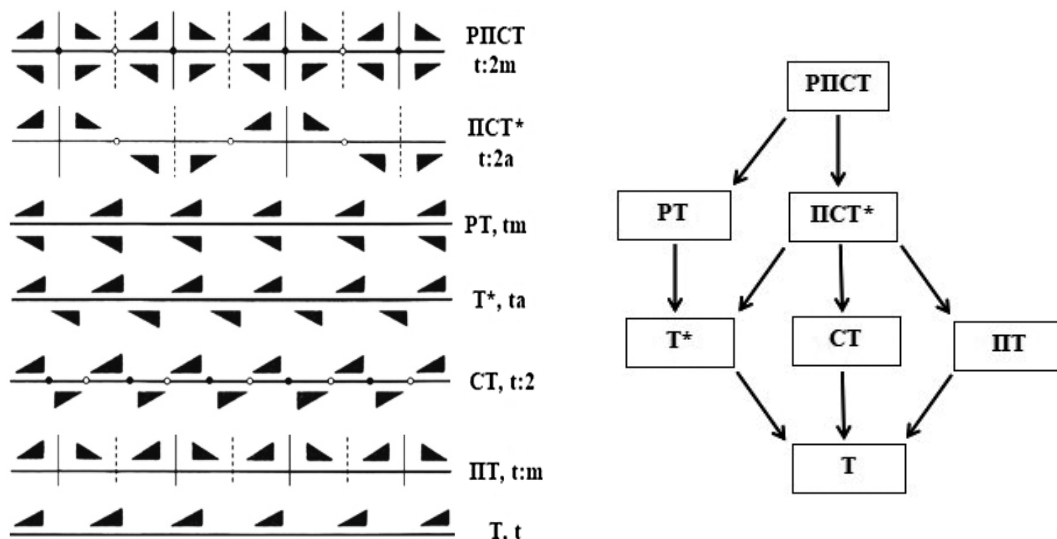


Рис. 1. Бордюры (слева) и их иерархия по группам симметрии (справа). Обозначения по: Войтеховский, 2020, 2021 и Шубников, 1940

Fig. 1. Borders (on the left) and their hierarchy by symmetry groups (on the right). Designations by: Voytekhovsky, 2020, 2021 and Shubnikov, 1940

ниям (Иоффе, 1956; Копчик, Рез, 1981), а также принципу диссимметрии (Шубников, 1961; Шафрановский, 1964, 1966; Chalmers, 1970; Ismael, 1997; Castellani, Ismael, 2016). Геометрический аспект с акцентом на симметрии конусов, цилиндров, сфер и их природных прототипов обсуждается кристаллографами (Шубников, 1956, с. 592; 1972, с. 34; Шафрановский, 1957). Вложения предельных групп обсуждаются редко, это весьма специфическая тема. И в монографии (Вайнштейн, 1979,

с. 107) допущена неточность. Группа $\infty 2$ вкладывается не только в ∞ , но и в ∞/m (рис. 2, дано штрихами). Кристаллографические примеры: $(222 \rightarrow 422) \rightarrow 4/mmm$, $32 \rightarrow (6m2^1 \rightarrow 6/mmm)$, $622 \rightarrow 6/mmm$. В скобках: в 1-м случае — подгруппы скрученного, во 2-м — покоящегося цилиндров. Студентам бывает трудно понять, как вращающиеся конусы и цилиндры вкладываются в неподвижные. Следует указывать, что последние допускают вращение в обе стороны.

Оси вращения конусов обычно показывают ориентированными (Вайнштейн, 1979, с. 100). Это лишнее, ведь конусы уже запрещают переворачивающиеся элементы симметрии, разрешая лишь продольные плоскости в группе ∞mm (рис. 2). Ориентировки осей нужны при замене конусов на цилиндры, что сделано далее при рисовании на них замкнутых бордюров. Обратная замена цилиндров на конусы, склеенные основаниями, применена в работе (Франк-Каменецкий и др., 1984, с. 19). В обозначениях предельных групп имеет место разброд. А. В. Шубников не экономил на указаниях взаимного расположения элементов симметрии: ∞ , ∞m , $\infty : m$, $\infty : 2$, $m \infty : m$, ∞ / ∞ , $\infty / \infty m$ (Шубников, 1956, с. 592; 1972, с. 34). Позднее стали прибегать к сокращениям и/или модификациям символов (в т. ч. на рис. 2).

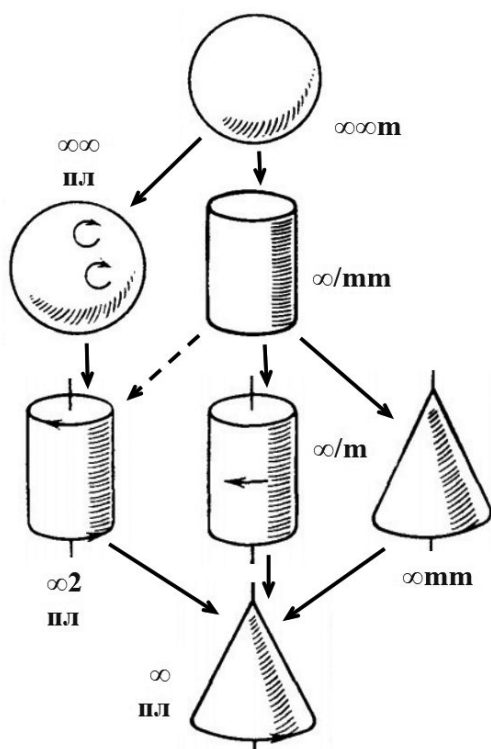


Рис. 2. Иерархия предельных групп симметрии Кюри (Вайнштейн, 1979). Буквы «пл» указывают на энантиоморфные (правые и левые) разновидности

Fig. 2. Hierarchy of limit symmetry groups of Curie (Weinstein, 1979). The letters «пл» indicate enantiomorphic (right and left) varieties

Группы симметрии замкнутых бордюров

На рис. 3 показаны замкнутые бордюры на цилиндрах с числом повторяющихся фрагментов $n = 1-4$. Перечислим порождаемые ими кристаллографические точечные группы симметрии (т. г. с., в скобках — для $n = 6$), найдем формулы симметрии для любого n и совершим переход $n \rightarrow \infty$, понимая под ∞ как угодно большое n .

РПСТ: $mm2$, mmm , $6m2$, $4/mmm$, $(6/mmm)$...; $2nm2$ (ложная инверсия — см. далее) для нечетных и n/mmm

¹ Здесь и далее инверсионные оси подчеркнуты — это проще при наборе, чем черта сверху.



для четных n ; переход: ∞/m (нечетные n) и ∞/mmm (четные n) — покоящийся цилиндр;

ПСТ*: $2/m$, $42m$, $3m$...; nm (ложная инверсия) для нечетных и $2n2m$ (истинная инверсия — см. далее) для четных n ; переход: ∞m (?);

РТ: m , $2/m$, 6 , $4/m$, $(6/m)$...; $2n$ (ложная инверсия) для нечетных и n/m для четных n ; переход: ∞/m — вращающийся цилиндр;

Т*: 1 , 4 , 3 ...; n (ложная инверсия) для нечетных и $2n$ (истинная инверсия) для четных n ; переход: ∞ (?);

СТ: 2 , 222 , 32 , 422 , (622) ...; $n2$ для нечетных и $n22$ для четных n ; переход: $\infty 2$ (нечетные n) и $\infty 22$ (четные n) — скрученный цилиндр;

ПТ: m , $mm2$, $3m$, $4mm$, $(6mm)$...; nm для нечетных и nm для четных n ; переход: ∞m (нечетные n) и ∞mm (четные n) — покоящийся конус;

Т: 1 , 2 , 3 , 4 , (6) ...; n ; переход: ∞ — вращающийся конус.

Пропавшие бордюры

Итак, пропавшими оказались замкнутые бордюры Т* и ПСТ* со скользящими отражениями, превратившимися в инверсии. (При этом инверсии С бордюров на рис. 1 превратились в оси 2, перпендикулярные осям ∞ замкнутых бордюров на рис. 3.) Это им не нашлось эквивалентов в схеме предельных групп Кюри (рис. 2). И трудно сразу предложить геометрические формы и/или движения, промежуточные (по вложению) между вращающимся конусом и цилиндром для Т*, скрученным и обычным цилиндрами для ПСТ* (рис. 2 и 3).

К характеристике именно этих бордюров относятся инверсионные оси, названные выше ложными и истинными. Фраза «инверсионная ось n -го порядка» имеет смысл для любого n и подразумевает поворот фигуры на угол $360/n$ с последующим отражением в лежащей на оси точке, истинным центром инверсии не являющейся. Но легко увидеть и прочесть объяснение в учебниках кристаллографии для $n = 1-4$ и 6 , что инверсионная ось нечетного порядка — композиция простой оси того же порядка и истинного центра инверсии: $2n+1 = L_{2n+1} + C$ ($1 = C$, $3 = 3 + C$); инверсионная ось четного порядка вида $4n+2$ — композиция простой оси в два раза меньшего нечетного порядка и перпендикулярной плоскости $4n+2 = L_{2n+1} + m$ ($2 = 1 + m = m$, $6 = 3 + m$). Те и другие — ложные. Лишь инверсионные оси четного порядка вида $4n$ истинные, т. е. не выражаемые через обычные элементы симметрии, известные до открытия О. Браве оси 4 на тетраэдре. Именно истинные инверсионные оси составляют специфику замкнутых бордюров Т* и ПСТ*. В схеме предельных групп Кюри (рис. 2) все оси ∞ обычные. Но куда могут быть вложены инверсионные оси ∞ ? Почти очевидно,

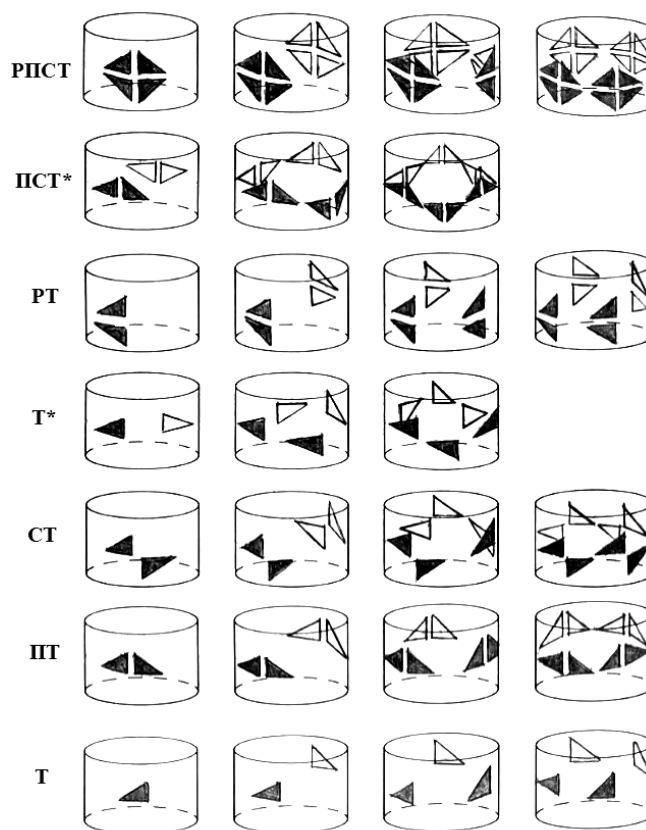


Рис. 3. Замкнутые бордюры. Пояснения в тексте

Fig. 3. Closed borders. See text

что только в группы ∞/m вращающегося и ∞/mmm покоящегося цилиндров.

В приведенном списке бордюров есть 27 кристаллографических т. г. с. (без 5 кубических). Это естественно, ведь среди порождающих операций симметрии — все разрешенные для конечных фигур. Но 4 т. г. с. получены дважды: 2 (Т, СТ), m (ПТ, РТ), $mm2$ (ПТ, РПСТ), $2/m$ (РТ, ПСТ*). Их элементы симметрии по-разному ориентированы относительно осей ∞ конуса и цилиндра. Так как $n = 1, 2, 3, \dots$, в приведенном списке содержатся вообще все (кроме кубических) т. г. с. По-видимому, их вывод через замкнутые бордюры никем ранее не выполнялся⁵.

Ось бесконечного порядка

Присмотримся к оси ∞ . По аналогии с осями L_n конечных порядков следует полагать, что при повороте

² Для нечетных n в символе ∞/m две m означают поперечную (к оси ∞) и продольные (эквивалентные между собой) плоскости симметрии. Для четных n в символе ∞/mmm указаны поперечная и два сорта продольных плоскостей. Так, в тетрагональной призме ($4/mmm$) две из них ортогональны граням, еще две — диагональные.

³ Аналогично предыдущему в отношении осей 2, ортогональных оси ∞ .

⁴ Аналогично предыдущему в отношении плоскостей, проходящих вдоль оси ∞ .

⁵ И. Гессель (1830) при выводе т. г. с. конечных фигур шел другим путем, О. Браве (1849) и А. В. Гадолин (1867) ограничились выводом 32 т. г. с. кристаллов. При этом О. Браве пропустил т. г. с. 4, на что указал П. Кюри: «Помимо отсутствия гармонии, к которому должно было привести это упущение, Браве забыл об одном типе симметрии, в котором нет ни центра симметрии, ни плоскости симметрии, но в котором имеется плоскость перемежающейся симметрии» (Кюри, 1966б, с. 92). Имея в виду эту ошибку предшественника, в своих построениях он клал в основу плоскости двух типов, оси симметрии и центры инверсии. Предельные и конечные группы симметрии без плоскостей он называл «лишенными симметрии»: вращающиеся сфера и конус, скрученный цилиндр (там же, с. 83, 87, 89). В его формулах порядок оси дан в общем виде (q). Поэтому *ab ovo* в них заложен результат И. Гесселя.

на 360° фигура (в т. ч. бесконечная — среда или поле) совмещается с собой ∞ (бесконечно много) раз при повороте на бесконечно малый угол $360/\infty$. В этом рассуждении, тиражируемом в университетских курсах, не все гладко. Ведь ∞ — не число, его нельзя получить арифметически, потому и $360/\infty$ — не число. Оба сопоставляются представлению уже потому, что не рожают убедительную интуицию числа. Конусы, цилиндры и сферы у П. Кюри — символы гладкости. Суть не столько в этих формах, подобранных для иллюстрации, сколько в группах присущих им элементов симметрии, характеризующих известные физические (потенциально бесконечные и бесформенные) поля, среды и свойства.

Вот еще один способ понимания. «Конус подобен n -гональной пирамиде средних сингоний» (Шафрановский, 1973). В той же мере цилиндр подобен n -гональной призме. При $n \rightarrow \infty$ пирамиды и призмы (с оговорками, заставляющими грани дружно убывать по площади) стремятся к конусу и цилиндру, n -гранные фуллерены с икосаэдрической симметрией — к сфере. А вот похожее рассуждение. «Из дискретных элементов симметрии можно получить элементы непрерывной (предельной) симметрии групп Кюри. Из оси симметрии n -го порядка можно получить ось бесконечно-го порядка, устремляя n к бесконечности. Образом точки при таком преобразовании является окружность и поворот осуществляется на бесконечно малый угол. Второе непрерывное преобразование — это трансляция на бесконечно малое расстояние, получаемое из обычной конечной трансляции с помощью того же предельного перехода. Образом точки при таком преобразовании является прямая линия» (Франк-Каменецкий и др., 1984, с. 14). Впрочем, повод к такому представлению дал сам П. Кюри, обсуждая соотношение плоскостей «непрерывной» и «переключающейся» симметрии (т. е. плоскости скользящего отражения) в бесконечных системах: «Мы имеем плоскость непрерывной трансляционной симметрии, если трансляция τ бесконечно мала» (Кюри, 1966б, с. 79).

Выражение «стремиться к бесконечности» туманно. Нельзя стремиться к чему-то столь плохо определенному, «что больше любого наперед заданного числа». Тогда почему нам кажется понятным символ $360/\infty$, обычно принимаемый за 0? Следует различать два нуля: один — арифметический, другой — неощутимый в его малости антипод необъятной огромности (Генон, 2013). Иначе говоря, есть два взаимно обратных стремления: $n \rightarrow \infty$ и $360/n \rightarrow 0$. Но если мы легко перешагиваем исчезающе малый зазор между $360/n$ и 0, то перешагнуть неубывающую бездну между растущим n и ∞ нельзя⁶. Это выглядит парадоксом, но в смысле Г. Кантора (по числу точек) эти континуумы на числовой оси равномошны.

Наконец, неограниченно увеличивая порядок оси симметрии n , мы циклично переходим от нечетного числа к четному и наоборот, в этом смысле топчась на месте. Выше показано, что в этом кроется важный мо-

мент — разные формулы симметрии для нечетных и четных n даже в одном типе замкнутого бордюра, и более того, рождение истинной инверсии при четных n , кратных 4.

Геометрическая интерпретация

На рис. 4 дана геометрическая интерпретация т. г. с. замкнутых бордюров, включающая известную схему предельных групп Кюри. Полосы, параллельные образующим цилиндра, двучетные (условно «+» и «-») с краем и без края (сплошная и точечная линии соответственно). Еще лучше представлять «+» и «-» как черный и белый цвета. Тогда при $n \rightarrow \infty$ полосы, становясь все тоньше, дадут системы прямых линий (образующих цилиндров), тем не менее сохраняющих их т. г. с. В прямоугольных рамках — соподчиненные бордюры, соответствующие предельным группам Кюри ∞/m вращающегося и $\infty/m\tau$ покоящегося цилиндров (рис. 2).

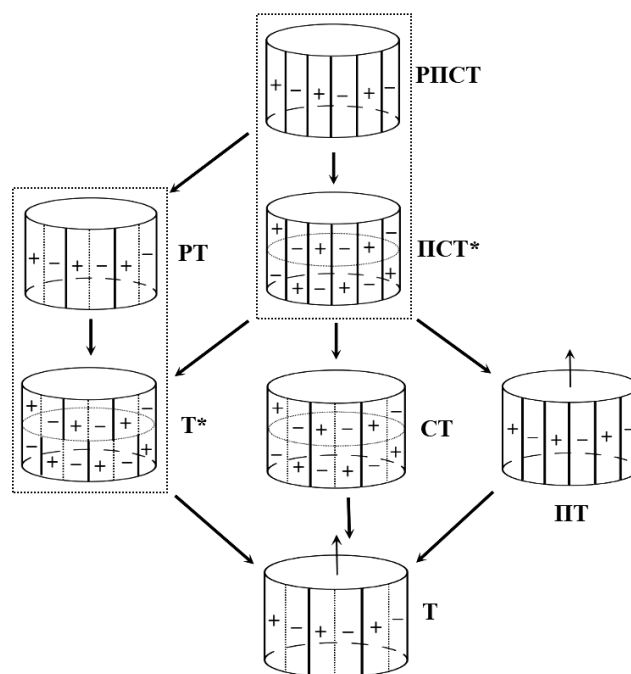


Рис. 4. Геометрическая интерпретация замкнутых бордюров. Пояснения в тексте

Fig. 4. Geometric interpretation of closed borders. See text

Заключение

Поясним еще раз, почему в системе Кюри оказалось 5, а не 7 предельных групп с одной «осью изотропии» ∞ . В статье Кюри (1966а, с. 58) дана классификация из 10 «систем повторяемости», 3 из них — с осями ∞ : сфера, цилиндр и «усеченный» (?) конус. Вращений не указано, но для конуса (и только для него) дан физический прототип — электрическое поле. В другой статье Кюри (1966б, с. 88) предложена более детальная классификация из 24 «конечных систем повторяемости и симметрии». В «сферическом» типе выделены вращающаяся⁷ и покоящаяся⁸ сферы, в типе «с двусто-

⁶ Подходящую метафору подсказывает изящная литература: «Нельзя вернуться из вечности, ибо от бесконечности ее отделяет бездна, через которую никому не дано перепрыгнуть то туда, то сюда по своему хотению» (Г. Майринк. Ангел западного окна. М.: Эксмо, 2024. С. 443).

⁷ «Сфера, наполненная жидкостью, обладающей способностью вращать плоскость поляризации» (Кюри, 1966б, с. 83).

⁸ «Например, сферическая поверхность» (Кюри, 1966б, с. 83).



ронной осью изотропии» — скрученный⁹ и покоящийся¹⁰ цилиндры, в типе «с осью изотропии и противоположной ей» — вращающийся цилиндр¹¹, вращающийся¹² и покоящийся¹³ конусы.

В обеих работах для систем с осями конечных порядков рассмотрены варианты с нечетными и четными n , получены все 32 т. г. с. конечных фигур — без учета инверсионных осей последний результат не мог быть получен. Но, переходя к пределу при $n \rightarrow \infty$ (суть именно в этом!), Кюри совместил их с обычными осями симметрии¹⁴. По нашему мнению, ось $L_\infty = L_n$ при $n \rightarrow \infty$ можно понимать в том смысле, что n как угодно велико, но сохраняет специфику (нечетное или четное, в последнем случае — кратно ли 4). В этой ситуации имеет место взаимно однозначное соответствие т. г. с. замкнутых бордюров и предельных групп Кюри, что логично. Мы не видим рациональности в игнорировании двух замкнутых бордюров с истинными инверсионными осями.

Исчерпана ли тема? Присмотримся к понятию гладкости. Столь осязаемое для сферы, цилиндра и конуса, оно скрывает математический омут. Гладкость функции характеризуется числом ее непрерывных производных (своего рода аналоги физической шероховатости). Чтобы быть гладкой, надо прежде быть непрерывной, хотя не обязательно равномерно непрерывной. Не углубляясь в нюансы определений, предположим, что уточнения этих понятий для полей, сред и свойств еще откроют путь к детализации предельных групп Кюри.

Возможное возражение состоит и в том, что ко всем предельным группам сам П. Кюри и последователи подобрали физические прототипы. Есть ли таковые для двух «инверсионных» замкнутых бордюров (предельных групп)? Мы пока затрудняемся их указать. Но возможность их геометрической интерпретации в единой системе с известными предельными группами (рис. 4) обнадеживает. Может быть, найдутся

и физические прототипы, и тогда окажется, что известные предельные группы симметрии — лишь первое приближение к описанию реальности. «В заключение отметим, что идеи Пьера Кюри в области учения о симметрии нельзя считать до конца оформленными. Это сделают будущие поколения» (Шубников, 1956, с. 602).

Автор благодарит рецензентов за рекомендации, способствовавшие лучшему изложению результатов.

Литература / References

- Вайнштейн Б. К. Современная кристаллография. Т. 1. Симметрия кристаллов. Методы структурной кристаллографии. М.: Наука, 1979. 384 с.
- Weinstein B. K. Modern crystallography. V. 1. Symmetry of crystals. Methods of structural crystallography. Moscow: Nauka, 1979, 384 p. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. VI. Симметрия бордюров // Вестник геонаук. 2020. № 8(308). С. 28–31. DOI: 10.19110/geov.2020.8.4
- Voytekhsy Yu. L. From teaching experience. VI. Symmetry of borders. Vestnik of Geosciences, 2020, No. 8(308), pp. 28–31. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из опыта преподавания. VII. Соподчинение групп симметрии и кристаллографический критерий гармонии // Вестник геонаук. 2021. № 2(314). С. 19–22. DOI: 10.19110/geov.2021.2.4
- Voytekhsy Yu. L. From teaching experience. VII. Subordination of symmetry groups and crystallographic criterion of harmony. Vestnik of Geosciences, 2021, 2(314), pp. 19–22. (in Russian)
- Генон Р. Наука чисел. СПб.: Владимир Даль, 2013. 270 с.
- Guénon R. The science of numbers. Saint Petersburg: Vladimir Dal, 2013, 270 p. (in Russian)
- Иоффе А. Ф. Пьер Кюри // Успехи физ. наук. 1956. Т. 58, вып. 4. С. 571–579.
- Ioffe A. F. Pierre Curie. Successes of Physics, 1956, V. 58, 4, pp. 571–579. (in Russian)
- Копчик В. А., Рез И. С. Работы Пьера Кюри в области кристаллофизики. К 100-летию обнаружения пьезоэлектрического эффекта // Успехи физ. наук. 1981. Т. 134, вып. 1. С. 149–152.
- Koptsik V. A., Rez I. S. The works of Pierre Curie in the field of crystallophysics. In memory of the 100th anniversary of the discovery of the piezoelectric effect. Successes of Physics, 1981, 134, No. 1, pp. 149–152. (in Russian)
- Кюри П. О вопросах упорядоченности: повторяемость // Избр. труды. М.; Л.: Наука, 1966а. С. 48–65.
- Curie P. On issues of orderliness: repeatability. Selected works. Moscow, Leningrad: Nauka, 1966, pp. 48–65. (in Russian)
- Кюри П. О симметрии // Избр. труды. М.; Л.: Наука, 1966б. С. 66–94.
- Curie P. About symmetry. Selected works. Moscow, Leningrad: Nauka, 1966, pp. 66–94. (in Russian)
- Кюри П. О симметрии в физических явлениях: симметрия электрического и магнитного полей // Избр. труды. М., Л.: Наука, 1966в. С. 95–113.
- Curie P. On the symmetry in physical phenomena: symmetry of electric and magnetic fields. Selected works. Moscow, Leningrad: Nauka, 1966, pp. 95–113. (in Russian)
- Франк-Каменецкий В. А., Дубов П. Л., Шафрановский И. И. Классическая симметрия. Л.: Изд. ЛГУ, 1984. 88 с.
- Frank-Kamenetsky V. A., Dubov P. L., Shafranovsky I. I.

⁹ «Прямой круглый цилиндр, наполненный жидкостью, обладающей вращательной способностью. Система двух одинаковых цилиндров, оси изотропии которых расположены на продолжении друг друга, вращающихся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью вокруг их общей оси» (Кюри, 1966б, с. 87). Граница двух цилиндров обычно подразумевается (рис. 2). На рис. 4 она показана.

¹⁰ «Прямой круглый цилиндр» (Кюри, 1966б, с. 87).

¹¹ «Магнитное поле. Прямой круглый цилиндр, вращающийся с некоторой скоростью вокруг своей оси изотропии» (Кюри, 1966б, с. 89). «Цилиндрический магнит вместе с окружающим его магнитным полем» (Шубников, 1956, с. 593).

¹² «Круглый прямой конус, вращающийся с некоторой скоростью вокруг своей оси» (Кюри, 1966б, с. 89).

¹³ «Электрическое поле. Прямой круглый конус» (Кюри, 1966б, с. 89). «Электрический аналог магнита — вольт столб, или цилиндрический диэлектрик, поляризованный вдоль своей оси» (Шубников, 1956, с. 593).

¹⁴ О том же в изотропной среде: «...каждая точка нашей среды является ее центром симметрии, в котором пересекается бесконечное множество осей бесконечного порядка (простых и зеркальных), направленных во все стороны пространства...» (Шубников, 1961, с. 22). И тогда нельзя ли из предельной группы покоящейся сферы выделить группы с простыми и инверсионными осями? Ведь она, по сути, есть суперпозиция всевозможных покоящихся цилиндров с осями ∞ , пересекающимися в общей точке.

- Classical symmetry. Leningrad: Leningrad State University, 1984, 88 p. (in Russian).
- Шафрановский И. И. Пьер Кюри — кристаллограф // Тр. Ин-та истории естествознания и техники АН СССР. 1957. Т. 19. С. 84–94.
- Shafranovsky I. I. Pierre Curie — crystallographer. Proc. Inst. of History of Natur. Sci. and Technol. of USSR Acad. Sci., 1957, V. 19, pp. 84–94. (in Russian).
- Шафрановский И. И. К вопросу об уточнении универсального принципа симметрии Кюри // Зап. ВМО. 1964. № 4. С. 460–463.
- Shafranovsky I. I. On the question of clarifying the universal Curie's principle of symmetry. Proc. Rus. Miner. Soc., 1964, No. 4, pp. 460–463. (in Russian).
- Шафрановский И. И. Несколько слов по поводу русского перевода трудов П. Кюри // Зап. ВМО. 1966. № 6. С. 771–772.
- Shafranovsky I. I. A few words about the Russian translation of the P. Curie's works. Proc. Rus. Miner. Soc., 1966, No. 6, pp. 771–772. (in Russian).
- Шафрановский И. И. Статистический закон Федорова-Грота и некоторые связанные с ним обобщающие аналогии // Зап. ВМО. 1973. № 1. С. 87–88.
- Shafranovsky I. I. The statistical law of Fedorov–Groth and some related generalizing analogies. Proc. Rus. Miner. Soc., 1973, No. 1, pp. 87–88. (in Russian).
- Шпольский Э. В. Жизнь и деятельность Пьера Кюри. 1859–1906 // Успехи физ. наук. 1956. Т. 58, вып. 4. С. 581–598.
- Shpolsky E. V. The life and work of Pierre Curie. 1859–1906. Successes of Physics, 1956, T. 58, V. 4, pp. 581–598. (in Russian).
- Шубников А. В. Симметрия. М., Л.: Изд. АН СССР, 1940. 176 с.
- Shubnikov A. V. Symmetry. Moscow, Leningrad: USSR AS, 1940, 176 p. (in Russian).
- Шубников А. В. О работах Пьера Кюри в области симметрии // Успехи физ. наук. 1956. Т. 59, вып. 4. С. 591–602.
- Shubnikov A. V. On Pierre Curie's work in the field of symmetry. Successes of Physics, 1956, T. 59, V. 4, pp. 591–602. (in Russian).
- Шубников А. В. Проблема диссимметрии материальных объектов. М.: Изд. АН СССР, 1961. 56 с.
- Shubnikov A. V. The problem of dissymmetry of material objects. Moscow, USSR AS, 1961, 56 p. (in Russian).
- Шубников А. В. У истоков кристаллографии. М.: Наука, 1972. 52 с.
- Shubnikov A. V. At the origins of crystallography. Moscow: Nauka, 1972, 52 p. (in Russian).
- Castellani E., Ismael J. Which Curie's principle? Philosophy of Science, Preprint, 2016, 14 p.
- Chalmers A. F. Curie's principle. The British J. for the Philosophy of Science, 1970, 21, P. 133–148.
- Curie P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique. J. Phys. Theor. Appl., 1894, 3 (1), P. 393–415. doi.org/10.1051/jphysap:018940030039300.
- Curie P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Oeuvres de P. Curie. Paris, 1908, P. 118–141.
- Ismael J. Curie's principle. Synthese, 1997, 110, P. 167–190.

Поступила в редакцию / Received 05.09.2024



Выдающийся геолог, минералог и геммолог

К 95-летию со дня рождения В. В. Буканова (1930–2018)

Outstanding geologist, mineralogist and gemologist

Marking the 95th anniversary of the birth of V. V. Bukanov (1930–2018)

April 1 marked the 95th anniversary of the birth of the outstanding geologist, specialist in the field of mineralogy of piezo-optical and gemstone raw material deposits, honorary member of the Russian Society of Gemologists, Candidate of geological and mineralogical sciences, Vladimir Valentinovich Bukanov.

V. V. Bukanov worked at the Institute of Geology of the Komi branch of the USSR Academy of Sciences from 1963 to 1973, heading the Laboratory of Mineralogy and Panning. He was one of the first to organize large-scale mineralogical research at the institute on a modern, advanced theoretical basis (ontogeny of minerals) using modern techniques and research methods. He was awarded the badges «Excellent Exploration» and «Honorary Subsoil Prospector». Author of more than 100 scientific and popular works.

Владимир Валентинович Буканов (1.04.1930. — 29.01.2018) родился в Перми. В 1954 г. окончил геолого-географический факультет Пермского государственного университета. До 1958 г. работал геологом, начальником партии, старшим геологом в Полярно-Уральской экспедиции 10-го ГУ Министерства радиотехнической промышленности, где занимался поисками и разведкой хрусталеносных месторождений. С 1958 по 1961 г. обучался в аспирантуре на кафедре минералогии Ленинградского горного института под руководством профессора Д. П. Григорьева, затем работал в Забайкальском комплексном научно-исследовательском институте Сибирского отделения АН СССР младшим научным сотрудником и занимался минералогией редкометалльных месторождений Восточного Забайкалья. В 1962 г. в Институте геологии Сибирского отделения АН СССР (г. Новосибирск) защитил кандидатскую диссертацию на тему «Минералогия месторождений Неройской хрусталеносной полосы на Приполярном Урале».

В 1963 г. Владимир Валентинович перешел на работу в Институт геологии Коми филиала АН СССР на должность заведующего лабораторией минералогии и шлихового анализа. Был членом ученого совета института.

За время работы в Институте геологии В. В. Буканов провел большую работу по оснащению лаборатории минералогии научным оборудованием. Был ответственным исполнителем и руководителем исследований минералогии и генезиса месторождений горного хрусталя на Приполярном Урале. Им были детально изучены почти все крупные месторождения горного хрусталя. Детально исследованы морфология и важнейшие свойства кристаллов кварца, а также сопутствующих им минералов. Разработана генетическая



классификация хрусталеносных месторождений, радиационная минералогия на примере кварца. Установлены новые генетические типы вольфрамовых и титановых рудопроявлений в связи с месторождениями горного хрусталя. Впервые для месторождений пьезооптического кварца произведено расчленение хрусталеносных гнезд на два типа, отличающихся своей промышленной ценностью, и выяснены их поисковые признаки; установлена природа цитриновой окраски кварца и выявлены новые типы кристаллосырья — радиационный цитрин и радиационно-устойчивый в отношении окрашивания оптический кварц. Были описаны впервые встреченные в хрусталеносных гнездах ванадинит и высокометаморфизованный антраксолит.

В. В. Букановым было написано около ста научных и научно-популярных работ, в том числе 1 монография.

Владимир Валентинович награжден Почетной грамотой Совета Министров Коми АССР, имеет звания «Отличник разведки», «Почётный разведчик недр», является лауреатом Премии Совета Министров СССР, почетным членом Общества геммологов России.

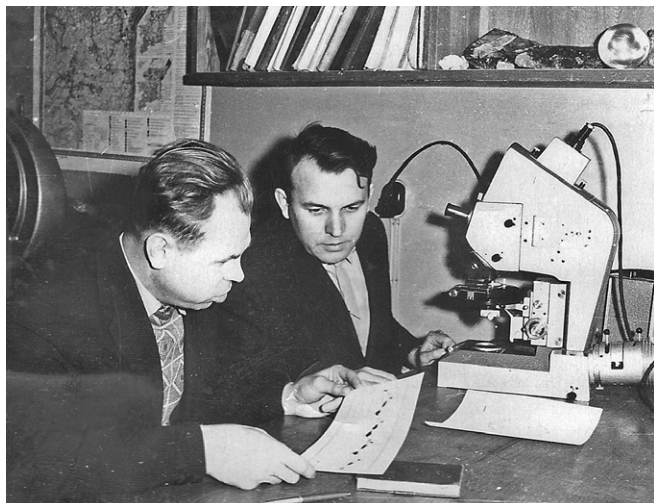
После ухода из Института геологии В. В. Буканов не терял с ним научных и дружеских связей. В 80-х гг. при его поддержке в институте прошла компания оформления документов по первооткрывательству проявлений цветных камней, было реализовано предложение Н. П. Юшкина о переоценке Амдерминского месторождения флюорита. В ходе этой переоценки был установлен промышленный масштаб запасов оптического сырья на этом месторождении и была доказана возможность получения из амдерминского флюорита

качественной оптической керамики. Много было сделано Владимиром Валентиновичем и для пополнения минералогических коллекций Геологического музея Института геологии.

С 1973 г. В. В. Буканов — главный геолог Комплексной разведочно-добычной экспедиции № 121 в Ленинграде, а с 1977 г. — главный геолог ПО «Северкварц-самоцветы» Министерства геологии СССР. Под его руководством проводились геолого-разведочные работы на пьезооптическое сырьё и цветные камни: на Кольском полуострове и в Карелии (амазонит, гранат, аметистовые щётки и коллекционные минералы); в Архангельской области (рисунчатый кремнь, агат и флюорит); на Полярном Урале (рубин, нефрит и жадеит); на Приполярном Урале (кварцевое сырьё); на севере Красноярского края (хризолит и флюорит); на Чукотке (сердолик), в Якутии (мамонтова кость), оценивались перспективы жемчугоносности рек Северо-Запада и Дальнего Востока. На Западной Памире в Таджикистане В. В. Буканов принимал участие в разведке месторождений шпинели и лазурита, в Армении — агата, аметиста и бирюзы.



Полевой отряд. В центре сидят В. А. Буканова, Р. Г. Тимонина, В. В. Буканов. 1966 г.

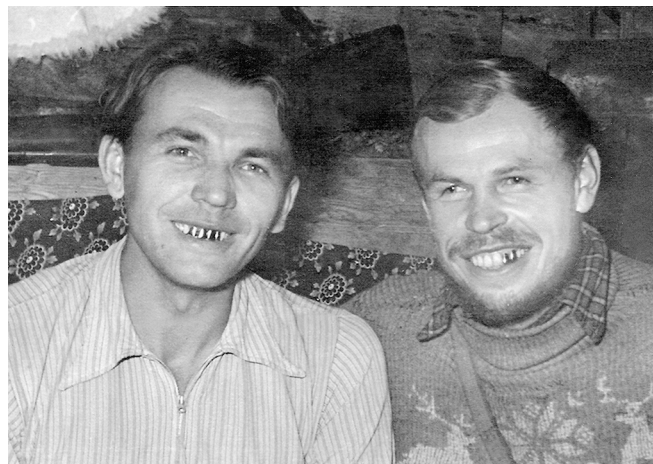


Б. А. Голдин и В. В. Буканов за работой

В 90-е годы, после ухода из СПО «Северкварц-самоцветы», В. В. Буканов организовал Геммологический центр. На базе центра устраивались выставки цветных камней, было налажено производство ювелирных изделий. Изданы крупные иллюстрированные справочники по цветному и коллекционному камню на русском и английском языках.

д. г.-м. н. О. Котова

В публикации использованы материалы книги М. В. Фишмана «Люди науки»



Студенты Пермского госуниверситета Владимир Буканов и Борис Голдин в экспедиции. Начало 50-х гг.

Из статьи В. В. Буканова (*Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*. 2005. № 5): «После окончания аспирантуры в Ленинградском горном институте в 1961 г. я получил приглашение на работу в Забайкальский комплексный научно-исследовательский институт СО АН СССР с задачей создания в нем минералогической лаборатории. Однако уже в следующем году было принято решение об исключении упомянутого института из системы АН СССР, что изменило мои планы. На конференции в Иркутске я встретился со своим одноклассником [ели кашу из одного котелка] Борисом Голдиным и через него познакомился с директором Института геологии Коми филиала АН СССР М. В. Фишманом, который предложил мне принять участие в конкурсе на заведующего лабораторией минералогии и шлихового анализа в своём институте. Поскольку темой моей диссертации была минералогия одного из районов Приполярноуральской хрусталеносной провинции, я без колебаний согласился».



Аспирант В. Буканов со своим научным руководителем профессором Д. П. Григорьевым (справа), конец 50-х гг.



Взгляд сквозь годы

Выставка полевых и экспедиционных фотографий М. Б. Тарбаева (1983–2020 гг.)

A look through the years

Exhibition of field and expedition photographs by M. B. Tarbaev (1983–2020)

The exhibition, held at the Institute of Geology in honor of the Geologist's Day, features archival photographs from M. B. Tarbaev's collection, spanning different periods of his career. The most captivating images capture the author's fieldwork, expedition trips, and participation in field trips and seminars — moments filled with discovery, collaboration, and scientific exchange.

These photographs reflect the essence of a geologist's work: the study of geological formations, vital encounters with colleagues, and active involvement in conferences and seminars.

В экспозиции, приуроченной ко Дню геолога, которая состоялась в Институте геологии, представлены фотографии из архива М. Б. Тарбаева, относящиеся к разным периодам. Наиболее интересные, насыщенные событиями, встречами и открытиями относятся к периодам полевых работ автора, участию в работе экспедиционных поездок, полевых экскурсий и семинаров. Эти периоды связаны с работой по изучению геологических объектов, множеством встреч, участием в совещаниях и семинарах, без которых невозможна работа геолога.

Полевые работы подчас сопровождалась настоящими приключениями. Приходилось неделями ждать вертолетные рейсы, вездеходы ломались, тонули в реках и болотах. Ненастная погода на долгое время не давала возможности нормальной работы. Ветер срывал палатки и ломал антенны. Радиостанции выходили из строя и лишали общения с «Большой землей». Эти трудности добавляли изюминку в полевую жизнь и являлись источником многочисленных рассказов.

Представленная выставка делится на несколько периодов. Первый охватывает с 1983 по 1994 год — участие в работе полевых отрядов Института геологии. Автору посчастливилось работать со многими коллегами — сотрудниками как Института геологии, так и других производственных, академических, образовательных и отраслевых организаций. География работ охватывала значительные площади республики от



Уральских гор до ее южных областей. Работы в основном были направлены на изучение золоторудных объектов и включали исследования как россыпной, так и коренной минерализации.

Весьма плодотворным был опыт работы сводных отрядов, в которых наряду с геологами Института геологии принимали участие сотрудники других организаций — ЦНИГРИ, Института геологии и геохимии УрО РАН, ГП «Полярноуралгеология». В 1994 году в результате работы такого сводного отряда Института





геологии Коми НЦ УрО РАН геологом В. С. Озеровым было обнаружено проявление коренного золота Чудное.

В экспозиции отражен опыт международного сотрудничества с Университетом Барселоны и участие в полевых экспедиционных маршрутах на территории Испании с доцентом Барселонского университета Х. К. Мелгорехо. Полевыми экспедиционными маршрутами удалось посетить наиболее интересные современные и древние горнорудные объекты Северной и Западной Испании.



Второй период связан с переходом автора на работу в систему управления недропользованием на территории Республики Коми и охватывает период с 1994 по 2024 год. Чиновничья работа не дает практики полноценной работы полевым геологом, но дает возможность широкого видения геолого-разведочных работ в целом в регионе и знакомства с разными объектами недропользования. В этот период наряду с уже работающими производствами начались активное освоение Среднетиманского бокситового рудника, подготовка запасов угля под открытую разработку карьерным способом и добыча на Юнъягинском карьере, ра-



боты по подготовке запасов на месторождении золота Чудное, открытие и начало разработки россыпного золота на Тимане. Организационная практика предусматривала посещение объектов недропользования, ознакомление с состоянием работ и их результатами. Такая работа осуществлялась в рамках экспедиционных выездов в составе сводных комиссий по рассмотрению тех или иных геологических объектов, на которых уже велись работы, или же перспективных и планируемых к постановке геолого-разведочных и горнорудных работ. Применялась практика полевых семинаров на участках работ по обмену опытом и выработке наиболее перспективных направлений работ. Такие совещания-семинары проводились на базе Ичетью, на участке Хальмерью (восточный склон Урала), на месторождении Желанное и р. Вангыр (Приполярный Урал).

В 2004–2006 годах в рамках межправительственного взаимодействия между Республикой Коми и провинцией Лапландия (Финляндия) активно осуществлялось сотрудничество Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Коми и Геологической службы Финляндии, включающее создание предпосылок для организации специализированного туризма, направленного на посещение интересных памятников природы и объектов недропользования; изучение опыта Финляндии в части создания благоприятного общественного мнения в области недропользования путем организации специализированных музеев, культурных центров, праздников.

В рамках этого сотрудничества была совершена совместная экспедиция в лапландскую тундру с целью изучения опыта добычи золота на севере Финляндии и условий организации добычи золота, а также участия в соревнованиях по промывке золота лотком, которые проводятся в деревне Танкаваара на севере Лапландии.

к. г.-м. н. М. Тарбаев

Редакторы издательства:
О. В. Габова, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка:
Р. А. Шуктомов

Выпуска из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.05.2025. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 7.5. Тираж 140. Заказ 1245. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес редакции: 167982, Республика Коми, Сыктывкар, Первомайская, 54. Тел.: (8212) 24-51-60. Эл. почта: vestnik@geo.komisc.ru
На обложке использованы фото Г. Каблиса, И. Голубевой, А. Журавлева, А. Шмырова, Н. Инкиной.