



Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Ноябрь
November
2025,
№ 11 (371)

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

Главный редактор А. М. Асхабов

Зам. главного редактора И. Н. Бурцев

Зам. главного редактора О. Б. Котова

Ответственный секретарь И. В. Козырева

Chief Editor A. M. Askhabov

Deputy Chief Editor I. N. Burtsev

Deputy Chief Editor O. B. Kotova

Executive Secretary I. V. Kozyreva

Редакционный совет

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

Технический редактор Г. Н. Каблис

Заведующий редакцией Т. А. Некучаева

Editorial Board

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

Technical Editor G. N. Kablis

Managing Editor T. A. Nekuchaeva

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

Предыдущее название:

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2024) — 0.462



geo.komisc.ru/vestnik

SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI
impact factor (2024) — 0.462

Содержание**Content****Научные статьи****Scientific articles**

S-граниты Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы: особенности состава, результаты U-Pb SHRIMP-RG и ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирования
В. Л. Андреичев, А. А. Соболева, Е. Г. Довжикова,
М. А. Кобл, Ю. Л. Ронкин, А. В. Травин 3

S-granites of the Izhma zone of the Pechora basin basement: features of composition, U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating results
V. L. Andreichev, A. A. Soboleva, E. G. Dovzhikova,
M. A. Coble, Yu. L. Ronkin, A. V. Travin 3

Золоторудное месторождение Тунанца в трубке взрыва (Кордильера-Дель-Кондор, юго-восток Эквадора) и вопросы классификации подобных объектов
Х. П. Медина, П. А. Игнатов 20

Tunantza breccia-pipe hosted gold deposit (Cordillera Del Condor, southeastern Ecuador) and issues of classification of similar deposits
J. P. Medina, P. A. Ignatov 20

Возможности литологического картирования на территории северного окончания восточного склона Полярного Урала с использованием данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2
Ю. Н. Иванова 26

Potential for lithological mapping at the northern end of the eastern slope of the Polar Urals using data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing satellite
J. N. Ivanova 26

Применение малоглубинной сейсморазведки на объектах Среднего Тимана
В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова,
Ю. Е. Езимова, А. В. Зелионко 33

Shallow seismic survey in the Middle Timan
V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova,
Yu. E. Ezimova, A. V. Zelionko 33

Каолинитовые глины как перспективное сырье для получения цеолитовых материалов
А. В. Понарядов, О. Б. Котова, И. А. Перовский 42

Kaolinite clays: a promising raw for the production of zeolite material
A. V. Ponaryadov, O. B. Kotova, I. A. Perovskiy 42

Цифровая систематизация миоспор девонского периода: разработка и опыт применения реляционной базы данных
Н. Н. Бабинова, О. П. Тельнова 47

Digital classification of Devonian miospores: development and application of a relational database
N. N. Babikova, O. P. Tel'nova 47

Хроника, события, факты**Chronicle, events, facts**

34-я Всероссийская научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента» 55

The 34th All-Russian Scientific Conference «Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-Northern Ural Segment» 55

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting

geo.komisc.ru/vestnik/authors



S-граниты Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы: особенности состава, результаты U-Pb SHRIMP-RG и ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирования

В. Л. Андреичев¹, А. А. Соболева¹, Е. Г. Довжикова², М. А. Кобл³, Ю. Л. Ронкин⁴, А. В. Травин⁵

¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия; izo@geo.komisc.ru

² Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

³ Стэнфордский университет, Стэнфорд, США

⁴ Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, Россия

⁵ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Граниты, вскрытые скважинами 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская в Ижемской зоне Тиманского мегаблока фундамента Печорской синеклизы по особенностям минерального и химического состава наиболее близки к гранитам S-типа. U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe и SHRIMP-RG)-исследование цирконов из этих гранитоидов не позволило корректно зафиксировать время образования пород, поскольку цирконы оказались либо унаследованными, либо высокодискордантными. ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование мусковитов из тех же образцов, в которых анализировались цирконы, дало возможность скорректировать возраст гранитов. ^{40}Ar - ^{39}Ar -возраст мусковита в гранитах скв. 1-Южная Болотная составил 548 ± 7 млн лет, а в скв. 1-Сосьянская – 565 ± 7 млн лет. Эти данные коррелируются с U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe и SHRIMP-RG)-результатами по цирконам из гранитоидов других зон фундамента Печорской синеклизы и свидетельствуют о масштабном проявлении гранитоидного магматизма в позднем венде при коллизионных процессах на завершающей фазе тиманского тектогенеза.

Ключевые слова: Печорская синеклиза, Ижемская зона, фундамент, граниты, циркон, U-Pb SHRIMP-RG-возраст, мусковит, ^{40}Ar - ^{39}Ar -возраст мусковита

S-granites of the Izhma zone of the Pechora basin basement: features of composition, U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating results

V. L. Andreichev¹, A. A. Soboleva¹, E. G. Dovzhikova², M. A. Coble³, Yu. L. Ronkin⁴, A. V. Travin⁵

¹ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

² Ukhta State Technical University, Ukhta, Russia

³ Stanford University, Stanford, USA

⁴ A. N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Yekaterinburg, Russia

⁵ V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

Granites recovered by boreholes 1-Yuzhnaya Bolotnaya and 1-Sosyanskaya in the Izhma zone of the Timan megablock of the Pechora basin basement are most similar in their mineral and chemical composition to S-type granites. U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe and SHRIMP-RG) zircon studies of these granitoids have not allowed for a correct determination of the rock formation time, as the zircons are either inherited or highly discordant. The granite age has been revised by the ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of muscovite from the same samples. The ^{40}Ar - ^{39}Ar age of muscovite in granites of the 1-Yuzhnaya Bolotnaya borehole is 548 ± 7 Ma and in the 1-Sosyanskaya borehole is 565 ± 7 Ma. These data correlate with U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe and SHRIMP-RG) ages on zircons from granites of other zones of Pechora basin basement and confirms the large-scale intrusion of granitoids in the Late Vendian during collision processes at the final stage of Timanian tectogenesis.

Keywords: Pechora basin, Izhma zone, basement, granite, zircon, U-Pb SHRIMP-RG age, muscovite, ^{40}Ar - ^{39}Ar age of muscovite

Введение

Геохронологические исследования структурно-вещественных комплексов верхнедокембрийского фундамента Печорской синеклизы были начаты в 70-е годы прошлого столетия, основывались преимущественно на K-Ar-методе, а их результаты публиковались по мере накопления возрастных данных (Акимова, 1980;

Фишман и др., 1981; Gee et al., 2000; Андреичев, Литвиненко, 2007). Преобладающая часть изотопных датировок по магматическим породам, преимущественно гранитоидам, приходилась на интервал 600–500 млн лет, что и давало основание считать их возраст венд-кембрийским. Дальнейшие работы были связаны с $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -датированием единичных зерен

Для цитирования: Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Кобл М. А., Ронкин Ю. Л., Травин А. В. S-граниты Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы: особенности состава, результаты U-Pb SHRIMP-RG и ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирования // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 3–19. DOI: 10.19110/geov.2025.11.1

For citation: Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Coble M. A., Ronkin Yu. L., Travin A. V. S-granites of the Izhma zone of the Pechora basin basement: features of composition, U-Pb and ^{40}Ar - ^{39}Ar dating results. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 3–19, doi: 10.19110/geov.2025.11.1

циркона из гранитов и диоритов методом ступенчатого испарения свинца (Gee et al., 2000). Полученные возрастные значения образуют узкий диапазон 567–551 млн лет, отвечающий границе раннего–позднего венда, которой в шкале геологического времени отводится интервал 570–555 млн лет (Стратиграфический кодекс..., 2019). Полученные в это же время Rb-Sr изохронным методом оценки возраста (Андреичев, Литвиненко, 2000) не всегда коррелировались с цирконовыми датировками, поэтому корректировка возраста гранитоидного магматизма возможна при получении дополнительных аргументов. Для этого необходим U-Pb-анализ цирконов, поскольку при их датировании только по отношению радиогенных изотопов свинца отсутствует контроль конкордантности. Кроме того, из-за низких содержаний радиогенного ^{207}Pb в относительно молодых (< 1 млрд лет) цирконах потенциально более надежны $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрасты (Борисова и др., 1995). На основании этих предположений в последнее десятилетие были предприняты локальные U-Pb-исследования цирконов из имеющегося в нашем распоряжении кернового материала.

Краткие сведения по геологии Печорской синеклизы и постановка проблемы

Печорская синеклиза (термин впервые введен академиком А. П. Павловым в 1903 г. применительно к Печорской низменности) располагается между Тиманом и Предуральским краевым прогибом (рис. 1). В ее геологическом строении участвуют осадочно-метаморфические и магматические породы верхнедокембрийского фундамента, повсеместно перекрытые неморфизованными осадочными и вулканогенными образованиями фанерозойского платформенного чехла мощностью 1–7 км, поэтому все сведения о породах фундамента основаны на геофизических данных и результатах бурения скважин разных категорий глубиной до 5 км (Белякова и др., 2008). В строении фундамента по вещественному составу и характеру магматизма выделяются с юго-запада на северо-восток Ижемская, Печорская и Большеземельская зоны. Две последние объединяются в Большеземельский мегаблок, а Ижемская зона с примыкающим с юго-запада Тиманом — в Тиманский мегаблок (Дедеев и др., 1974; Белякова, 1983; Дедеев, Запорожцева, 1985; Белякова и др., 2008). Вместе они образуют Печорскую (Тимано-Печорскую) плиту. Границей между мегаблоками служит Припечорская разломная зона, состоящая из Чаркаю-Пылемецкого и Илыч-Чикшинского глубинных разломов, простирающихся в северо-западном направлении от Урала до Печороморской впадины (Костюченко, 1994; Оловянишников и др., 1996). Разломы, не выраженные на поверхности, зафиксированы по положительной магнитной аномалии, именуемой Припечорской (Гафаров, 1970).

Общее строение верхнедокембрийского фундамента Печорской синеклизы, характер магматизма позволяют интерпретировать Тиманский мегаблок как область отложений пассивной окраины Восточно-Европейского континента на погружающемся карельском кристаллическом фундаменте (Пучков, 1975; Гецен, 1991). Увеличение глубокководности осадков наблюдается в северо-восточном направлении от Тимана

к Припечорской зоне разломов (Пучков, 1975), вдоль которой функционировали зона субдукции и связанная с ней островодужная система, занимавшая территорию Печорской зоны (Белякова, Степаненко, 1991; Белякова, Довжикова, 2006; Белякова и др., 2008). Предполагается, что в пределах Большеземельского мегаблока существовал позднерифейско-вендский океанический бассейн, называемый Печорским (Пучков, 2005).

Среди магматических пород фундамента Печорской синеклизы существенное место отводится гранитоидам. Они вскрыты в 26 скважинах во всех зонах (Белякова и др., 2008), но U-Pb-датирование цирконов в режиме вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на ионных микрозондах SHRIMP проводилось по тем скважинам, для которых имелся в наличии керн. Установленные конкордантные возрасты цирконов показаны на рис. 1, а сведения о результатах датирования приведены в ряде статей: скв. 1-Южная Болотная и 54-Седуха (Андреичев и др., 2014б); скв. 1-Чаркаю, 1-Южная Чаркаю, 1-Восточная Чаркаю (Андреичев и др., 2017а); скв. 1-Малая Пера, 1-Южный Джьер, 1-Нижняя Омра, 1-Прилукская (Андреичев и др., 2024); скв. 1-Изкось-гора (Соболева, Андреичев, 2025); скв. 1-Новая (Андреичев и др., 2023а); скв. 26-Восточная Харьяга, 2-Веяк (Андреичев и др., 2023б). Полученные результаты свидетельствуют о двух эпизодах гранитоидного магматизма, связанных с субдукционными и коллизионными процессами, которые привели в конце венда к образованию орогена Тиманид. Основная масса возрастов приходится на интервал 564–536 млн лет, который, по всей видимости, соответствует финальной стадии закрытия океана, которой предшествовал субдукционный(?) этап 607–602 млн лет.

Самый древний возраст, равный 1056 ± 18 млн лет, зафиксирован в скв. 1-Южная Болотная, с которой и начались локальные U-Pb-исследования цирконов из гранитоидов фундамента Печорской синеклизы (Андреичев и др., 2014б). Результаты датирования ядер в 12 зернах охватывают интервал 2776–1008 млн лет, минимальный возраст по трем зернам составил 1056 ± 18 млн лет. В данной ситуации было логично предположить, что этот возраст соответствует времени формирования гранитов, а цирконы с более древними возрастными унаследованы из осадочного протолита. Это предположение имело принципиальное значение, поскольку в геологии Тимано-Печорской плиты до сих пор остается неизвестным время заложения Тиманской пассивной континентальной окраины, которое в разных интерпретациях изменяется от раннего рифея до венда. Равным образом эта неопределенность относится и к возрасту прорываемых гранитами метаосадочных пород фундамента. Возраст цирконов из гранитов скв. 1-Южная Болотная давал основание считать временем заложения по крайней мере средний рифей. Однако это предположение не нашло подтверждения при датировании цирконов из гранитоидов других скважин, а при определении возраста детритовых цирконов из метаосадочных пород Северного (Андреичев и др., 2014а; 2017б; 2018) и Среднего Тимана (Удортатина и др., 2017; Соболева и др., 2019; Брусницына и др., 2021) были получены миллиардные датировки. То есть обломочные породы, отлагавшиеся на Тиманской пассивной окраине, не могли быть сформированы рань-

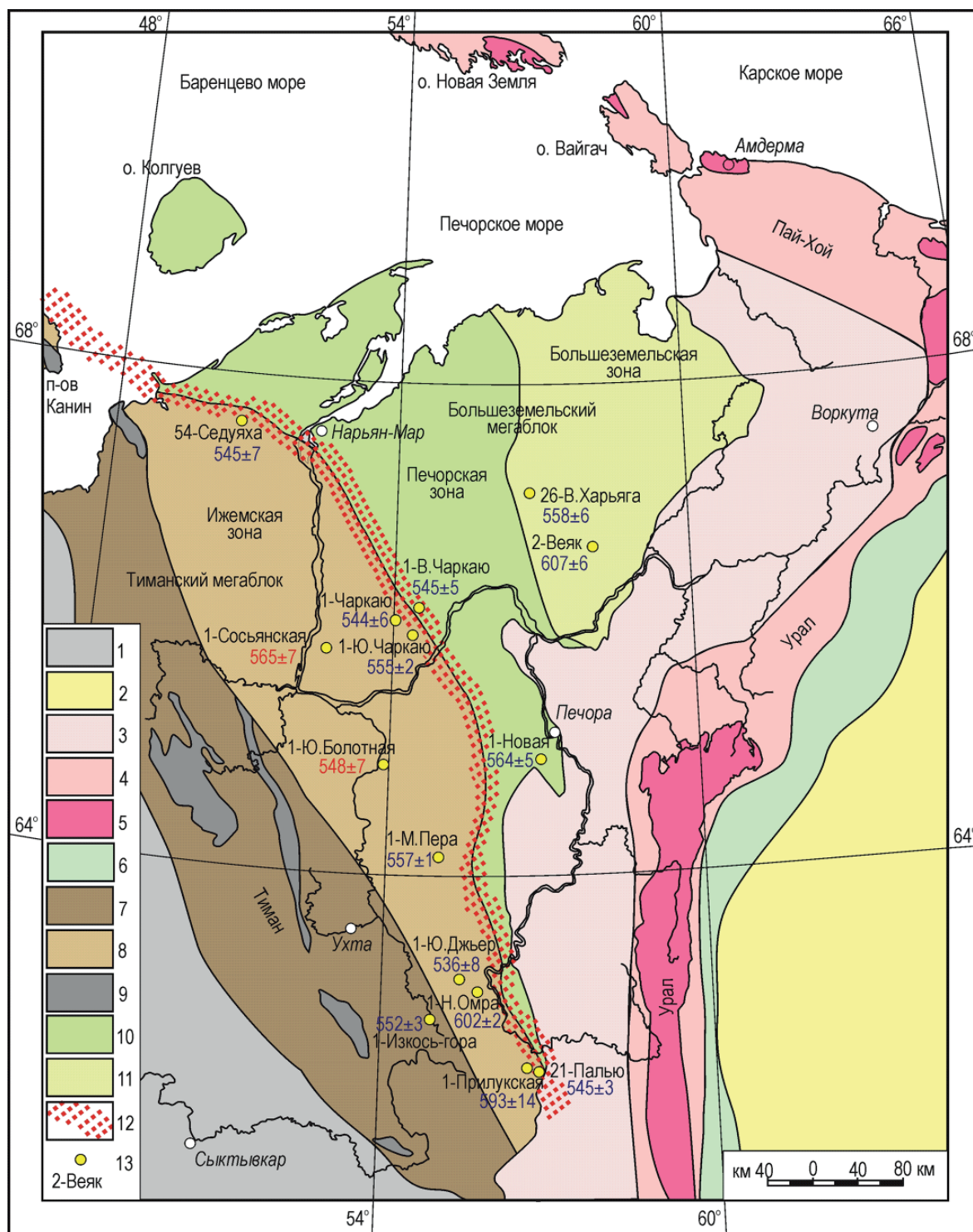


Рис. 1. Тектоническое строение фундамента Печорской синеклизы и ее обрамления (по: Тимано-Печорский..., 2000; Белякова и др., 2008): 1 — Восточно-Европейский кратон; 2 — Западно-Сибирская плита; 3–6 — Урал: 3 — Предуральский краевой прогиб, 4 — Западно-Уральская мегазона, палеозойские комплексы Пай-Хоя, о-ва Вайгач и архипелага Новая Земля, 5 — Центрально-Уральская мегазона, верхнедокембрийские комплексы Пай-Хоя, о-ва Вайгач и архипелага Новая Земля, 6 — Восточно-Уральская мегазона; 7–11 — фундамент Тимано-Печорской плиты: 7 — Тиман, 8 — Ижемская зона, 9 — выходы на поверхность комплексов фундамента, 10 — Печорская зона, 11 — Большеземельская зона; 12 — Припечорская зона разломов (северо-западная часть — Чаркаю-Пылеметский разлом, юго-восточная часть — Ильич-Чикшинский разлом), 13 — скважины. Цветом выделен возраст гранитоидов: синим — определенный по циркону (U-Pb, SIMS), красным — по мусковиту ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)

Fig. 1. Tectonic structure of the basement of the Pechora basin and its frame (according to Timan-Pechora..., 2000; Belyakova et al., 2008): 1 — East European Craton; 2 — West Siberian Plate; 3–6 — the Urals: 3 — Cis-Ural Foredeep, 4 — West Ural megazone, Paleozoic complexes of Pai-Khoi, Vaigach Island, and Novaya Zemlya Archipelago, 5 — Central Ural megazone, Upper Precambrian complexes of Pai-Khoi, Vaigach Island, and Novaya Zemlya Archipelago, 6 — East Ural megazone; 7–11 — base-ment of the Pechora plate: 7 — Timan; 8 — Izhma zone; 9 — exposures of the basement; 10 — Pechora zone; 11 — Bolshezemelskaya zone; 12 — Pripechorya fault zone (northwestern part — Charkayu-Pylemets fault, southeastern part — Ilych-Chikshino fault); 13 — boreholes. The ages of granitoids is highlighted in color: blue — zircon ages (U-Pb, SIMS), red — muscovite ages ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$)

ше позднего рифея, а возраст гранитов не должен превышать 1 млрд лет. Следовательно, все цирконы в скв. 1-Южная Болотная являются унаследованными, а для оценки возраста гранитов следует искать дополнительные аналитические методы. По нашему мнению, для этой цели может быть полезным ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование мусковита, поскольку граниты не испытали значительных метаморфических преобразований и минеральный состав породы должен соответствовать первично-магматическому парагенезису. Этим же методом датирован мусковит из гранитов скв. 1-Сосьянская, которые оказались во многом похожи на гранитоиды 1-Южной Болотной.

Методы исследования

Содержания петрогенных оксидов в породах определены методом классического химического анализа в лаборатории химии минерального сырья Института геологии Коми научного центра УрО РАН (Сыктывкар, аналитик О. В. Кокшарова). Определения содержаний элементов-примесей выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург), аналитические процедуры опубликованы (Ронкин и др., 2005).

Определение состава минералов произведено на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сыктывкар).

U-Pb-датирование индивидуальных зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская, а также определение содержаний в цирконе элементов-примесей выполнено на вторично-ионном микрозонде обратной геометрии SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США. Изображения цирконов получены на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600, оснащенный катодолюминесцентным детектором. Изотопные измерения выполнялись согласно стандартным процедурам (Ireland, Gibson, 1998; Coble et al., 2018). Обработка полученных аналитических данных проведена с использованием программы SQUID-2 (Ludwig, 2009). Отношения Pb/U нормированы на значение $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.0668$ в стандартном цирконе TEMORA (Black et al., 2003).

^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование мусковитов из гранитов в скважинах 1-Сосьянская и 1-Южная Болотная проведено в лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск), аналитические процедуры опубликованы (Травин и др., 2009).

Особенности минерального и химического состава пород

Скважины 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская (рис. 1) находятся в центральной части Ижемской зоны. В скв. 1-Южная Болотная граниты вскрыты в интервале 2456–2624 м (забой). Отбор цирконов производили из гранита с глубины 2515.7 м. Скв. 1-Сосьянская, пробуренная примерно в 80 км к северо-западу от скв. 1-Южная Болотная, вскрыла граниты в интервале 2972–3300 м (забой). Проба на циркон отобрана из интерва-

ла 3292.2–3296.0 м. Скважины вскрывают небольшие гранитные массивы. Судя по размерам отрицательных магнитных аномалий (Белякова и др., 2008), гранитное тело, вскрытое скв. 1-Южная Болотная, не превышает в длину 13 км и в ширину — 7 км. Размер интрузива, вскрытого скв. 1-Сосьянская, составляет 17 × 7 км. Выше гранитов в обеих скважинах с резким угловым несогласием залегают кварцевые песчаники седельской свиты среднего кембрия — нижнего ордовика (Белякова, 1988; Решения..., 1987).

Биотит-мусковитовые граниты из скв. 1-Южная Болотная розовато-серые, массивной текстуры и средне- и крупнозернистой гранитовой структуры (рис. 2, а, б). Они состоят из кварца, калиевого полевого шпата (микроклина) и плагиоклаза примерно в равных соотношениях и содержат около 5 об. % слюд — хлоритизированного красно-коричневого высокожелезистого ($x(\text{Mg})$ 0.31–0.32) и высокоглиноземистого биотита (табл. 1) и мусковита. Более крупные зерна плагиоклаза в центральных частях сосюритизированы, а по краям — чистые, альбит-олигоклазового состава (An_{9-15}). Они содержат включения листочков биотита и мусковита. Выделения калиевого полевого шпата заключают в себе мелкие зерна плагиоклаза и кварца, а также чешуйки мусковита и биотита. На границе калиевого полевого шпата и плагиоклаза участками развит мirmekитовый агрегат. Акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, монацитом и торитом. Рутил, флюорит и пирит, встречающиеся в виде включений в хлоритизированном биотите, вероятно, являются вторичными.

Граниты из скв. 1-Сосьянская имеют похожий минеральный состав и структуру (рис. 2, с, д), отличаясь более кислым составом плагиоклаза (Ab_{0-9}), еще более низкой магнезиальностью биотита ($x(\text{Mg})$ 0.24–0.27), заметным содержанием фтора в апатите и отсутствием флюорита и пирита. Акцессорные минералы те же, за исключением торита, и дополнительно присутствуют уранинит и коффеинит.

Граниты из скважин 1-Сосьянская и 1-Южная Болотная характеризуются преимущественно повышенной щелочностью: ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) составляет в них 8.70 и 7.94–8.77 мас. % при концентрациях SiO_2 71.68 и 70.60–74.46 мас. % соответственно (табл. 2., рис. 3, а). По содержанию K_2O (4.45 и 3.47–5.30 мас. %) породы относятся к высококалиевым (рис. 3, б) и для них характерен калиево-натриевый тип щелочности: $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.96$ в гранитах скв. 1-Сосьянская и 0.55–0.78 в скв. 1-Южная Болотная, за исключением одного образца, в котором это отношение равно 1.3.

По петрохимической классификации породы относятся к семействам гранитов и умеренно-щелочных гранитов, на диаграмме Ab–An–Or точки их составов располагаются в поле гранитов (рис. 3, с).

Граниты из обеих скважин относятся к перглиноземистым, индекс Шенда составляет в них 1.14–1.31 (рис. 3, д).

Рассматриваемые породы характеризуются низкими для гранитоидов концентрациями TiO_2 (0.04–0.20 мас. %), MgO (0.20–0.68 мас. %), CaO (0.50–0.95 мас. %) и повышенными содержаниями P_2O_5 (0.17–0.23 мас. %).

Концентрации литофильных элементов-примесей в исследуемых гранитах (проанализировано по од-

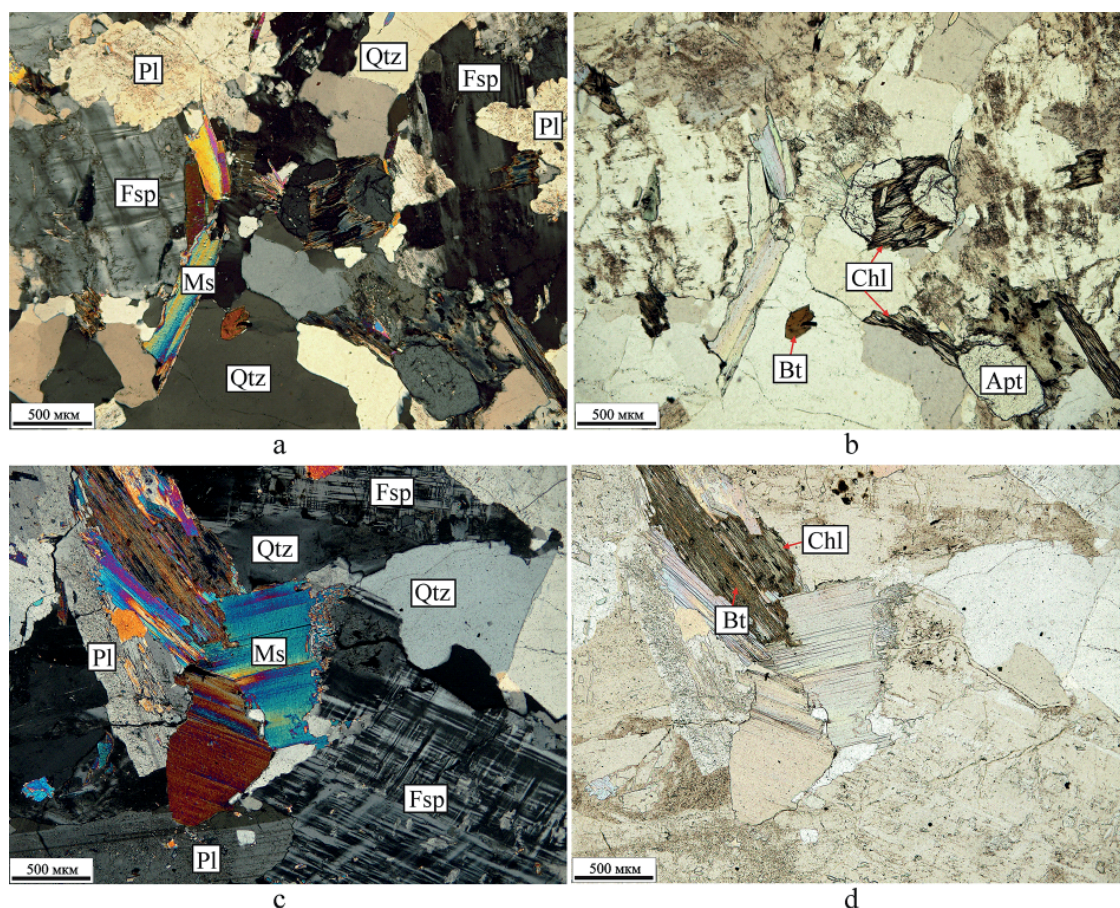


Рис. 2. Микрофотографии шлифов из гранитов скважин 1-Южная Болотная (a, b) и 1-Сосьянская (c, d) с анализатором (a, c) и без анализатора (b, d). Qtz — кварц, Pl — плагиоклаз, Fsp — калиевый полевой шпат, Bt — биотит, Ms — мусковит, Apt — апатит, Chl — хлорит

Fig. 2. Thin-section photomicrographs of granites from 1-Yuzhnaya Bolotnaya borehole (a, b) and 1-Sosyanskaya borehole (c, d), under cross polarized (a, c) and plane polarized light (b, d). Qz — quartz, Pl — plagioclase, Fsp — alkali feldspar, Bt — biotite, Ms — muscovite, Apt — apatite, Chl — chlorite

Таблица 1. Химический состав биотита из гранитов, мас. %

Table 1. Chemical composition of biotite from granites, wt. %

Компонент Component	1-Южная Болотная / 1-Yuzhnaya Bolotnaya				1-Сосьянская / 1-Sosyanskaya				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	34.51	32.25	33.74	32.75	36.36	35.81	34.44	34.49	36.28
TiO ₂	2.37	2.84	2.87	2.49	2.75	2.23	2.14	2.84	2.35
Al ₂ O ₃	19.4	18.91	19.46	19.03	19.74	19.82	19.28	19.59	20.31
FeO	23.59	23.47	22.94	24	20.48	22.26	21.77	22.28	22.66
MnO	0.43	0.47	0.44	0.5	0.71	0.73	0.77	0.63	0.61
MgO	6.23	5.95	6	6.14	4.4	4.35	4.41	4.28	4.22
K ₂ O	8.1	8.09	8.4	7.28	9.46	9.47	9.35	9.63	9.44
Сумма / Sum	94.63	91.98	93.85	92.19	93.9	94.67	92.16	93.74	95.87
Si, ф.ед.	2.79	2.69	2.75	2.73	2.97	2.91	2.87	2.83	2.91
Ti	0.14	0.18	0.18	0.16	0.17	0.14	0.13	0.18	0.14
Al	1.85	1.86	1.87	1.87	1.9	1.89	1.89	1.89	1.92
Al _{IV}	1.21	1.31	1.25	1.27	1.03	1.09	1.13	1.17	1.09
Al _{VI}	0.64	0.55	0.63	0.6	0.87	0.8	0.76	0.72	0.83
Fe ^{IV}	1.59	1.64	1.56	1.67	1.4	1.51	1.51	1.53	1.52
Mn	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04
Mg	0.75	0.74	0.73	0.76	0.54	0.53	0.55	0.52	0.5
K	0.84	0.86	0.87	0.77	0.98	0.98	0.99	1.01	0.97
X(Mg)	0.32	0.31	0.31	0.31	0.27	0.25	0.26	0.25	0.24

Примечание. Анализы 1–4 и 6–9 выполнены в частично хлоритизированных листочках биотита.

Note. Analyses 1–4 and 6–9 were made on partially chloritized biotite leaflets.

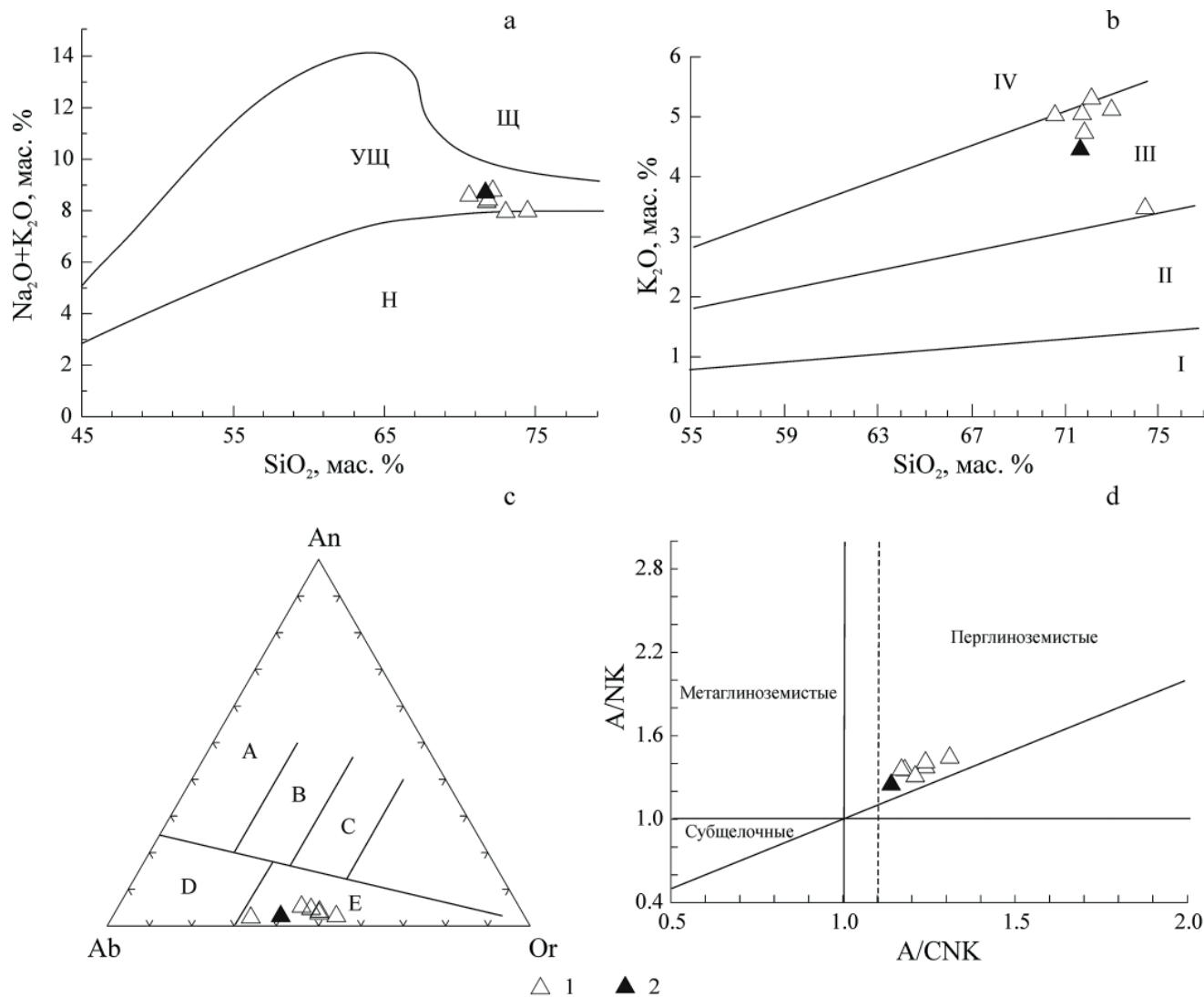


Рис. 3. Дискриминационные диаграммы для изученных гранитов: а — SiO_2 – $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (по: Le Maitre, 1989); б — SiO_2 – K_2O , (по: Rickwood, 1989); в — Ab – An – Or , (по: O'Connor, 1965); д — A/CNK – A/NK , (по: Maniar, Piccoli, 1989). На рисунке (а) буквами обозначены поля состава пород нормальной (Н) и умеренной (УЩ) щелочности, а также щелочных пород (Щ). Поля гранитоидов на рисунке (с): А — тоналиты, В — гранодиориты, С — адамеллиты, D — тронджемиты, Е — граниты. 1 — скв. 1-Южная Болотная, 2 — скв. 1-Сосьянская

Fig. 3. Discrimination diagrams for the studied granites. а — SiO_2 – $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ (Le Maitre, 1989), б — SiO_2 – K_2O (Rickwood, 1989), в — Ab – An – Or (O'Connor, 1965), д — A/CNK – A/NK (Maniar, Piccoli, 1989). The letters on (а) indicate fields of rocks of low (Н), moderate (УЩ) and high (Щ) alkalinity. The letters refer to fields on (с): А — tonalites, В — granodiorites, С — adamellites, D — trondhjemites, Е — granites. 1 — 1-Yuzhnaya Bolotnaya borehole, 2 — 1-Sosyanskaya borehole

ному образцу из каждой скважины) заметно варьируют (табл. 3). Так, например, содержание Rb в гранитах из скв. 1-Южная Болотная составляет 208 г/т, а в скв. 1-Сосьянская — 51 г/т, Sr — 42 г/т и 120 г/т, Y — 5 г/т и 12 г/т, Ba — 207 г/т и 1261 г/т, Zr — 28 г/т и 167 г/т соответственно. Несмотря на такие различия, для рассматриваемых гранитов прослеживается похожая тенденция обогащенности крупноионными элементами (K, Rb, Ba), а также Th и Ta и обеднения высокозарядными (Zr, Y и HREE) по сравнению с рассчитанным (Pearce et al., 1984) модельным составом гранитов срединно-океанических хребтов (рис. 4, а).

Концентрации редкоземельных элементов (REE) в породах из скв. 1-Сосьянская примерно в 5 раз выше, чем в гранитах из скв. 1-Южная Болотная, но характер их распределения в этих двух образцах очень похож (рис. 4, б): характерно обогащение легкими REE относительно тяжелых (La_N/Yb_N — 36 и 25) и проявлен-

ный дефицит европия ($\text{Eu}_N/\text{Eu}_N^*$ — 0.53 и 0.58 соответственно).

Результаты U-Pb SHRIMP-RG-датирования циркона и особенности их состава

В скв. 1-Сосьянская зерна циркона (60–150 мкм) отобраны из гранита (обр. 28) в интервале глубин 3292.2–3296.0 м. Многие зерна окатанные, со сглаженными вершинами и ребрами, в некоторых сохранились блестящие грани. Полностью окатанные зерна имеют матовую поверхность. Большинство зерен непрозрачные или полупрозрачные, лишь отдельные прозрачные, достаточно чистые, без включений. В породе преобладают светло-розовые и розовые удлиненно-призматические, с частично сохранившимися гранями призмы до эллипсовидных цирконовые зерна с коэффициентом удлинения (K_y) 1.5–3, реже встреча-



Таблица 2. Содержание петрогенных оксидов в гранитах, мас. %

Table 2. Main oxide contents in granites, wt. %

Скважина Borehole	1-Южная Болотная 1-Yuzhnaya Bolotnaya						1-Сосьянская 1-Sosyanskaya
№ обр. / Sample No.	21/1	21/6	22/3	23/3	24/1	24/2	28
Глубина, м / Depth, m	2500.5	2505.5	2509.7	2513.2–2518.2	2518.6	2519.6	3292.2–3296
SiO ₂	72.16	70.60	71.76	71.86	74.46	73.02	71.68
TiO ₂	0.17	0.12	0.18	0.04	0.04	0.17	0.20
Al ₂ O ₃	15.69	15.24	15.29	15.16	14.60	14.68	14.72
Fe ₂ O ₃	0.25	0.79	0.48	0.33	0.16	0.22	0.33
FeO	0.94	1.28	1.07	1.01	0.38	0.75	1.34
MnO	0.02	н/о	0.03	0.03	0.05	0.02	0.03
MgO	0.40	0.68	0.50	0.54	0.20	0.40	0.38
CaO	0.67	0.87	0.78	0.95	0.50	0.56	0.64
Na ₂ O	3.47	3.56	3.29	3.69	4.51	2.83	4.25
K ₂ O	5.30	5.02	5.04	4.73	3.47	5.11	4.45
P ₂ O ₅	0.18	0.21	0.23	0.21	0.17	0.20	0.22
П.п.п. / LOI	1.33	1.61	1.27	1.44	0.87	1.56	1.10
Сумма / Sum	100.57	99.98	99.92	99.99	99.41	99.51	99.33
H ₂ O ⁻	0.27	0.20	0.18	0.23	0.27	0.30	0.15
CO ₂	<0.1	0.28	<0.1	0.16	<0.1	<0.1	<0.1

Таблица 3. Содержание элементов-примесей в гранитах Ижемской зоны, г/т

Table 3. Trace element contents in granites of Izhma zone, ppm

Компонент Component	1-Южная Болотная 1-Yuzhnaya Bolotnaya	1-Сосьянская 1-Sosyanskaya	Компонент Component	1-Южная Болотная 1-Yuzhnaya Bolotnaya	1-Сосьянская 1-Sosyanskaya
	23/3	28		23/3	28
Li	113	56.1	Ba	207	1261
Be	12.4	3.98	La	22.3	102
Sc	1.94	5.92	Ce	48.0	201
V	6.04	35.3	Pr	5.54	24.9
Cr	77.5	51.3	Nd	21.2	93.0
Co	1.67	7.02	Sm	4.22	15.1
Ni	41.5	13.6	Eu	0.64	2.60
Cu	16.5	6.97	Gd	2.97	11.2
Zn	30.3	28.7	Tb	0.41	1.15
Ga	20.4	8.21	Dy	1.88	6.76
Ge	1.16	0.64	Ho	0.27	1.23
Rb	208	70.7	Er	0.61	3.37
Sr	42.4	120	Tm	0.08	0.47
Y	5.23	12.2	Yb	0.45	2.90
Zr	28.3	167	Lu	0.06	0.42
Nb	6.66	13.5	Hf	1.36	10.3
Mo	0.60	0.17	Ta	2.43	2.04
Ag	0.72	0.58	W	1.95	15.3
Cd	0.01	0.21	Tl	1.68	0.57
Sn	17.7	1.92	Pb	29.8	8.60
Sb	0.05	0.47	Bi	0.88	0.04
Te	0.005	н/о	Th	11.3	20.7
Cs	36.1	5.53	U	3.56	4.94

ются светло-розовые, почти бесцветные, близкие к шаровидным, окатанные, непрозрачные, с матовой поверхностью. В небольшом количестве присутствуют темно-желтые идиоморфные бипирамидально-призматические (цирконового габитуса), с шероховатыми поверхностями кристаллы с K_y 4–5. Католюми-несцентные изображения (рис. 5) демонстрируют на-

личие в зернах циркона тонкой или более грубой осцилляционной зональности и присутствие в некоторых зернах предположительно детритовых ядер (например, в зернах 3 и 9).

Результаты аналитических измерений 12 зерен приведены в табл. 4. Диапазон $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрастов составляет 1844–252 млн лет. В трех аналитических кра-

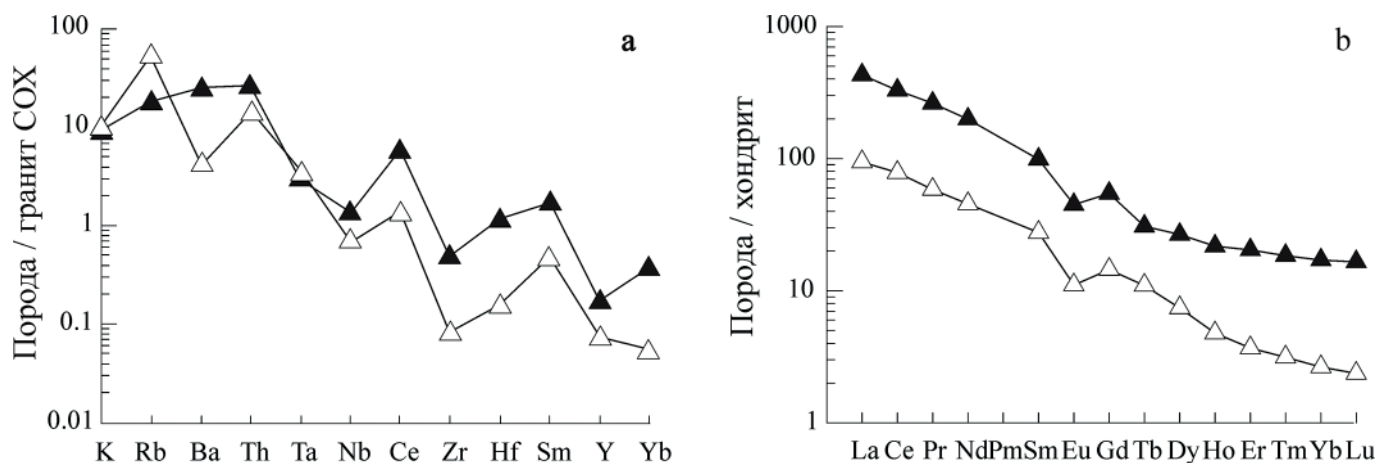


Рис. 4. Графики, иллюстрирующие геохимические особенности гранитов: а — содержания элементов-примесей, б — распределения REE. Концентрации элементов нормированы к составу: а — модельного гранита СОХ (Pearce et al., 1984), б — хондрита CI (Sun, McDonough, 1989). Усл. обозн. — см. рис. 3

Fig. 4. Diagrams illustrating the geochemical features of granites: а — trace element contents, б — REE pattern. Element concentration is normalized to: а — ORG granite (Pearce et al. 1984), б — CI chondrite (Sun, McDonough, 1989). Legend — see Fig. 3

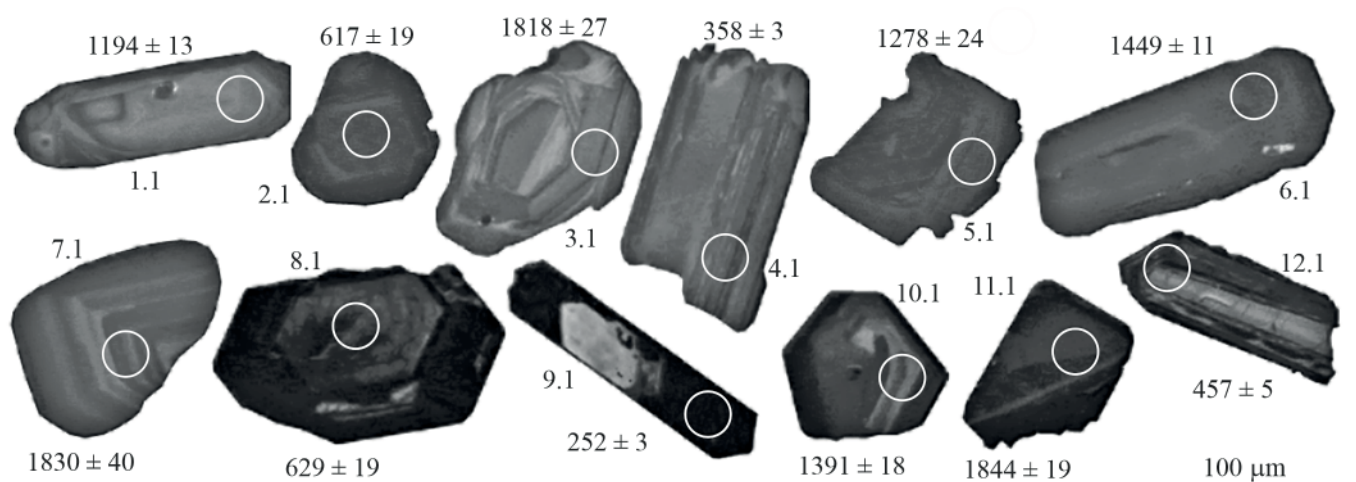


Рис. 5. Катодолюминесцентные изображения зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская. Номера аналитических кратеров соответствуют номерам в табл. 4

Fig. 5. Cathodoluminescent images of zircon grains from granites of the 1-Sosyanskaya borehole. Numbers of analytical craters as in the Table 4

терах (3.1, 7.1 и 11.1) в зонах роста с осцилляционной зональностью получены позднекарельские датировки (1844 ± 19 , 1830 ± 40 и 1818 ± 27 млн лет). Две точки (6.1 и 10.1) показали возрасты, соответствующие раннему рифею (1449 ± 11 и 1391 ± 18 млн лет). Два анализа (5.1 и 1.1) дали среднерифейские датировки (1278 ± 24 и 1194 ± 13 млн лет). В точках 8.1. и 2.1 в центральных частях зерен циркона определен позднерифейский возраст (629 ± 19 и 617 ± 19 млн лет). Три датировки (457 ± 5 , 358 ± 3 и 252 ± 3 млн лет), соответствующие позднему ордовика, началу раннего карбона и окончанию поздней перми, получены в аналитических кратерах 12.1, 4.1 и 9.1. Наиболее молодая из них относится к идиоморфному удлинённо-призматическому зерну, выделяющемуся на фоне других зерен высокими содержаниями U и Th (20 538 и 1115 мкг/т соответственно).

Анализ химического состава зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская показал их большое разнообразие (табл. 5, рис. 6). Результаты, полученные по

трем кратерам (2.1 — 617 ± 19 млн лет, 5.1 — 1278 ± 24 млн лет, 9.1 — 252 ± 3 млн лет), расположенным во внешних зонах роста кристаллов, показывают, что исследованные части зерен заметно обогащены легкими REE (рис. 6, а) и по составу приближаются к гидротермальным цирконам (рис. 6, б). Графики распределения REE, построенные для остальных зерен, имеют более-менее схожий облик при заметных вариациях содержания элементов, и можно предположить, что они соответствуют магматическим цирконам из пород различного состава. В частности, по содержанию Y и U (рис. 6, с) проанализированные зерна отвечают циркону из основных пород, сиенитовых пегматитов и гранитоидов (преимущественно гранодиоритов и тоналитов). Этому разнообразию соответствует достаточно большой разброс величин Th/U (0.01–0.99) и рассчитанных по содержанию Ti в цирконе (Watson et al., 2006) минимально возможных температур магматических расплавов, из которых кристаллизовались цирконы (табл. 5). За исключением предположительно гидротермальных

Таблица 4. Результаты U-Pb-изотопных исследований циркона из гранитов скв. 1-Сосыанская (обр. 28, инт. 3292.2–3296 м)
Table 4. Results of U-Pb-dating of zircon grains from granites of 1-Sosyanskaya borehole (sample 28, depth 3292.2–3296 m)

Зерно, кратер Grain, spot	$^{206}\text{Pb}_c$ %	Содержания, мкг/г Content, ppm			$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Изотопные отношения $\pm\%$ (1σ) Isotope ratios $\pm\%$ (1σ)			Rho	Возраст, млн лет $\pm 1\sigma$ Age, Ma $\pm 1\sigma$		D, %
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
9.1	2.50	702.5	20538	1115	0.06	0.0398 $\pm$ 1.3	0.289 $\pm$ 2.0	0.0527 $\pm$ 1.6	0.65	252 $\pm$ 3	316 $\pm$ 36	25
4.1	9.37	79.6	1622	240	0.15	0.0571 $\pm$ 0.9	0.406 $\pm$ 5.9	0.0516 $\pm$ 5.9	0.15	358 $\pm$ 3	265 $\pm$ 135	-26
12.1	4.22	62.5	991	457	0.48	0.0734 $\pm$ 1.2	0.568 $\pm$ 3.2	0.0562 $\pm$ 3.0	0.38	457 $\pm$ 5	459 $\pm$ 66	+0
2.1	63.05	67.2	803	285	0.37	0.1004 $\pm$ 3.3	0.748 $\pm$ 65.6	0.0541 $\pm$ 65.6	0.05	617 $\pm$ 19	373 $\pm$ 1476	-40
8.1	0.93	190.1	2160	31	0.01	0.1025 $\pm$ 3.2	0.829 $\pm$ 7.8	0.0587 $\pm$ 7.1	0.41	629 $\pm$ 19	554 $\pm$ 155	-12
1.1	0.24	12.4	71	20	0.29	0.2035 $\pm$ 1.2	2.195 $\pm$ 2.2	0.0782 $\pm$ 1.9	0.55	1194 $\pm$ 13	1151 $\pm$ 38	-4
5.1	38.33	89.6	500	320	0.66	0.2192 $\pm$ 2.1	2.943 $\pm$ 17.7	0.0974 $\pm$ 17.6	0.12	1278 $\pm$ 24	1574 $\pm$ 329	23
10.1	17.58	31.4	155	52	0.34	0.2408 $\pm$ 1.4	2.928 $\pm$ 13.9	0.0882 $\pm$ 13.9	0.10	1391 $\pm$ 18	1385 $\pm$ 266	-0
6.1	7.92	82.1	382	185	0.50	0.2521 $\pm$ 0.9	3.374 $\pm$ 6.8	0.0971 $\pm$ 6.8	0.13	1449 $\pm$ 11	1568 $\pm$ 127	8
3.1	0.50	22.1	79	57	0.74	0.3258 $\pm$ 1.7	4.992 $\pm$ 2.1	0.1111 $\pm$ 1.2	0.81	1818 $\pm$ 27	1817 $\pm$ 23	-0
7.1	0.66	35.3	125	120	0.99	0.3282 $\pm$ 2.5	4.960 $\pm$ 2.7	0.1096 $\pm$ 1.2	0.93	1830 $\pm$ 40	1792 $\pm$ 21	-2
11.1	–	44.9	158	71	0.46	0.3312 $\pm$ 1.2	5.124 $\pm$ 1.3	0.1122 $\pm$ 0.6	0.92	1844 $\pm$ 19	1836 $\pm$ 11	-0

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта составляет 0.15%. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D — дискордантность: $D = 100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ и $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

Note. Error in the calibration standard is 0.15 %. $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ — common and radiogenic lead. Isotope ratios and $^{206}\text{Pb}^*$ content are corrected using measured ^{204}Pb . D is discordance: $D = 100 \times [\text{age } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})/\text{age } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$. Rho is the error correlation coefficient of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$.

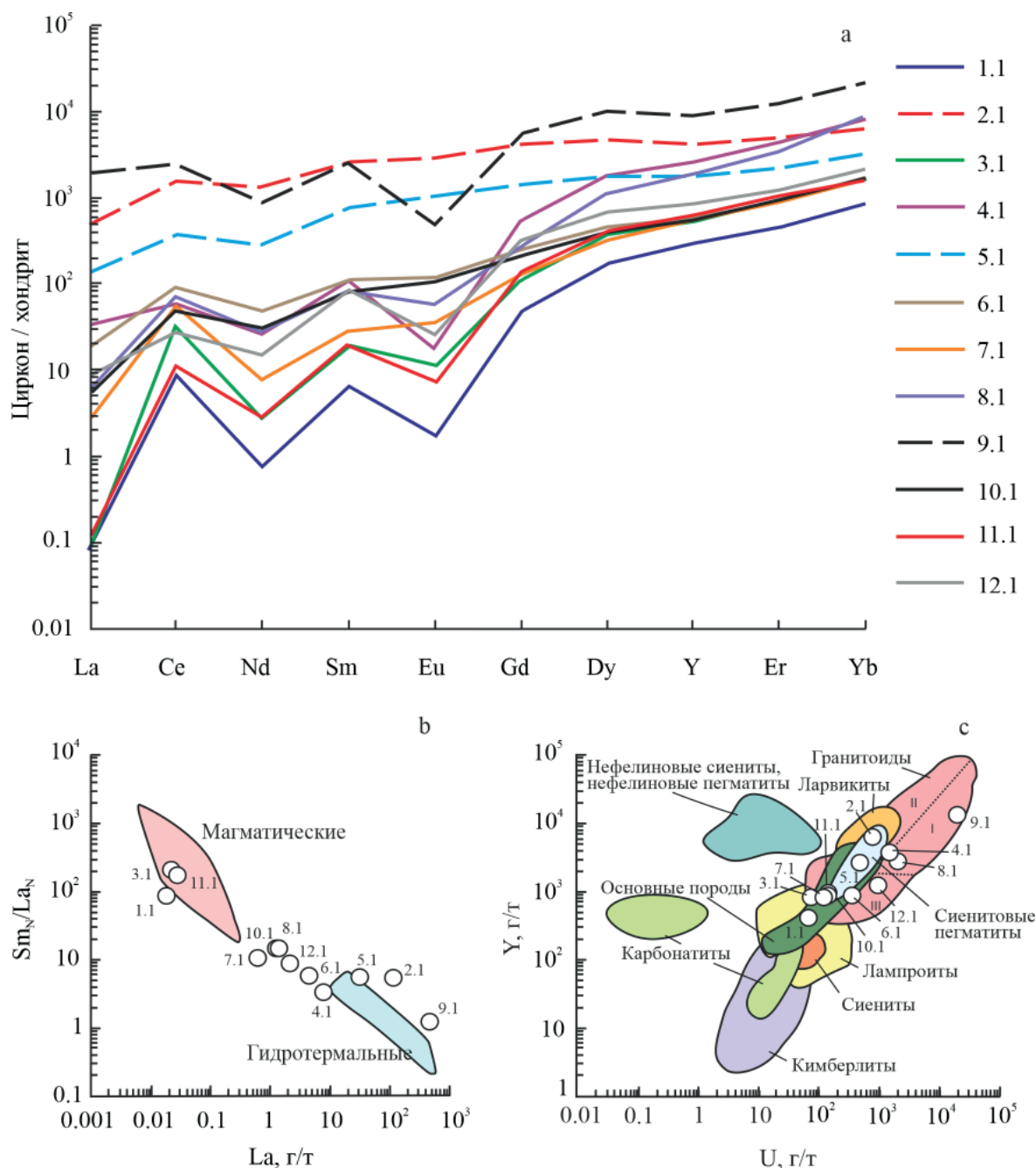


Рис. 6. Диаграммы, иллюстрирующие особенности состава изученных зерен циркона: а — график распределения REE, концентрации нормированы к составу хондрита CI (Sun, McDonough, 1989); б — Sm_N/La_N — La (Hoskin, 2005); в — Y—U, поле состава циркона из гранитоидов включает области состава циркона из аплитов и лейкогранитов (I), гранитов (II), гранодиоритов и тоналитов (III) (Belousova et al., 2002). Номера зерен соответствуют таковым в табл. 4 и 5

Fig. 6. Diagrams illustrating the compositional features of the studied zircon grains: а — chondrite-normalized (Sun, McDonough, 1989) REE chart; б — Sm_N/La_N — La (Hoskin, 2005); в — Y—U, the compositional field of zircon from granitoids includes zircon from aplites and leucogranites (I), granites (II), granodiorites and tonalites (III) (Belousova et al., 2002). Grain numbers correspond to the numbers in Tables 4 and 5

цирконов (анализы 2.1., 5.1 и 9.1), для которых этот метод расчета неприменим, остальные зерна показали интервал температур 724–875 °С.

Температура насыщения расплава цирконием для продатированного гранита из скв. 1-Сосьянская (обр. 28) составляет 804 °С, а для гранита из скв. 1-Южная Болотная (обр. 23-3) — 664 °С (рис. 7), но, учитывая, что в породах много зерен унаследованного циркона, рассчитанные температуры, вероятно, завышены, что типично для гранитоидов, в составе которых отмечаются реликты детритовых цирконов (Hanchar, Watson, 2003).

⁴⁰Ar-³⁹Ar-возраст мусковита

Для установления возраста гранитов было проведено ⁴⁰Ar-³⁹Ar-датирование мономинеральных фракций мусковита из гранитов скважин 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская, отобранных из тех же образцов, из которых датировались цирконовые зерна.

В возрастном ⁴⁰Ar-³⁹Ar-спектре мусковита из гранитов скв. 1-Южная Болотная (рис. 8, а) выделяется кондиционное плато, хорошо выраженное в средне- и высокотемпературной областях, которое отвечает средневзвешенному возрасту 548 ± 7 млн лет. По результа-

**Таблица 5.** Содержание элементов-примесей в цирконе из гранитов скв. 1-Сосьянская, г/т**Table 5.** Trace element contents in zircon from granites of 1-Sosyanskaya borehole, ppm

Зерно, точка Grain, spot	1.1	2.1	3.1	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1
La	0.02	114.40	0.02	7.67	31.81	4.41	0.63	1.38	463.86	1.25	0.03	2.09
Ce	5	940	19	37	226	53	35	43	1530	29	6	17
Nd	0.4	622.7	1.3	12.1	130.6	22.0	3.5	11.7	384.3	14.8	1.3	7.3
Sm	1.0	394.6	2.9	16.3	115.8	16.2	4.3	13.0	373.5	11.7	3.0	12.0
Eu	0.10	168.36	0.66	1.01	59.50	7.14	2.00	3.27	26.95	6.24	0.40	1.47
Gd	10	871	23	104	295	50	26	54	1156	42	27	62
Dy	43	1186	88	451	457	115	81	274	2578	102	99	168
Y	443	6516	865	3968	2742	919	854	2912	13919	846	979	1335
Er	76	795	154	734	370	148	143	568	2011	145	169	200
Yb	143	1071	265	1361	539	283	274	1448	3675	283	278	352
Hf	9532	12546	8138	13033	8669	10606	7779	18014	27784	8541	8384	10280
Fe	1	5411	4	6749	1047	168	4	5445	31852	149	2	1876
⁴⁸ Ti	12.3	249.5	13.5	5.3	70.2	16.6	11.6	3.9	58.8	15.0	13.8	13.0
T, °C	840	1324	851	753	1077	875	833	724	1048	863	853	846
Eu _N /Eu _N *	0.06	0.85	0.18	0.06	0.94	0.71	0.45	0.33	0.12	0.77	0.09	0.13
Sm _N /La _N	84.72	5.34	210.98	3.28	5.64	5.70	10.53	14.56	1.25	14.53	172.22	8.88
Yb _N /Gd _N	18.0	1.5	14.1	15.8	2.2	6.9	12.8	32.7	3.8	8.2	12.4	6.9

там ⁴⁰Ar-³⁹Ar-датирования мусковита из гранитов скв. 1-Сосьянская средневзвешенный возраст по плато составил 565 ± 7 млн лет (рис. 8, b). Сопоставимость этих датировок с возрастными цирконов из гранитов других скважин свидетельствует о том, что полученные Ar-Ar-возрасты соответствуют времени образования гранитов.

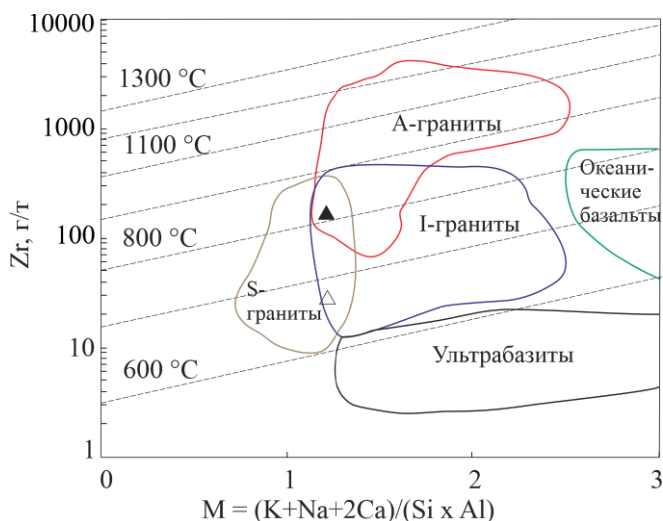


Рис. 7. Концентрация насыщения расплавов цирконием в зависимости от состава расплава при различных температурах (по: Костицын и др., 2015; Hanchar, Watson, 2003). Поля составов гранитов S-, I- и A-типов, океанических базальтов и ультраосновных пород очерчены по данным (Костицын и др., 2015). Усл. обозн. — на рис. 3

Fig. 7. Zirconium saturation in melts at different temperatures as a function of melt composition, after (Kostitsyn et al., 2015; Hanchar and Watson, 2003). Composition fields for S-, I-, and A-type granites, oceanic basalts, and ultramafic rocks are plotted using (Kostitsyn et al., 2015). Legend — see Fig. 3

Обсуждение результатов

Двуслюдяные граниты, вскрытые скважинами 1-Сосьянская и 1-Южная Болотная в фундаменте Ижемской зоны Печорской синеклизы по минеральному и химическому составу наиболее близки к гранитоидам S-типа, образующимся за счет частичного плавления метаосадочного субстрата.

Породы содержат мусковит, образующий как сростки с биотитом, так и включения в плагиоклазе и, по-видимому, являющийся магматическим. Для гранитов из обеих скважин характерны высокожелезистый и высокоглиноземистый биотит, обычный в S-гранитах (рис. 9), и типичные для подобных пород монацит и апатит.

Исследованные граниты характеризуются повышенной щелочностью и глиноземистостью, обогащены K и R и обеднены Ti, Mg и Ca. Магмы, из которых кристаллизуются граниты подобного состава, возникают при частичном плавлении преимущественно метapelитового субстрата (рис. 10, а). На диаграмме Дж. Маеды фигуративные точки состава гранитов из обеих скважин располагаются в поле гранитов S-типа (рис. 10, b), а на графике зависимости концентрации циркония в расплаве от состава и температуры магмы (рис. 7) попадают в области перекрытия полей составов гранитов: S- и I- типов (скв. 1-Южная Болотная), S-, I- и A-типов (скв. 1-Сосьянская).

Принадлежность рассматриваемых двуслюдяных высокоглиноземистых гранитов к S-типу, геохимические особенности пород, такие как обогащенность пород крупноионными литофильными элементами и обедненность высокозарядными элементами, преобладание LREE над HREE, свидетельствуют о вероятной связи гранитов, вскрытых скважинами 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская, с коллизионными процессами.

Точки состава гранитов из скв. 1-Южная Болотная и 1-Сосьянская на диаграмме R1-R2 (рис. 11) группи-

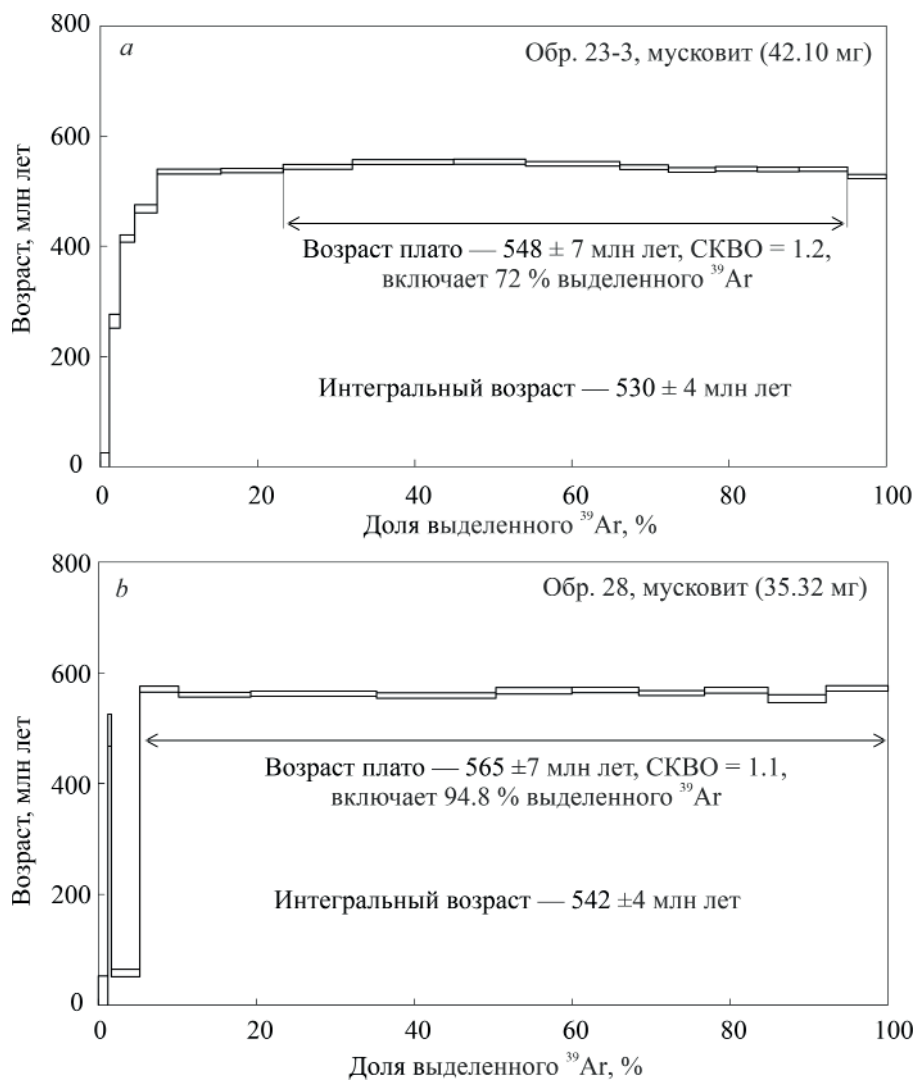


Рис. 8. Результаты $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования мономинеральных фракций мусковита из гранитов скважин 1-Южная Болотная (а) и 1-Сосьянская (b). Погрешности соответствуют 1σ

Fig. 8. Results of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of monomineral fractions of muscovite from granites of the 1-Yuzhnaya Bolotnaya (a) and 1-Sosyanskaya (b) boreholes. Errors are 1σ

руются в пределах области составов синколлизионных гранитоидов и вблизи этого поля. На диаграммах Дж. Пирса, применяемых для установления геодинамических обстановок формирования гранитоидов, точки состава продатированных пород попадают в поля островодужных и синколлизионных гранитов.

Попытки датирования зерен циркона из гранитов обеих скважин не привели к определенности, так как из-за относительно невысокой температуры гранитного расплава, формирующего S-граниты (Chappell, White, 2001), в породе сохраняется большое количество унаследованных цирконов разного возраста (табл. 4) и состава (табл. 5, рис. 6). Разброс цирконо-вых возрастов столь велик, что говорить о выделении какой-то когерентной группы, отвечающей возрасту гранитов, не приходится. Нет ни одной датировки, сопоставимой с возрастом синколлизионных гранитоидов (544–555 млн лет), локализованных вблизи Припечорской зоны разломов и наиболее приближенных к сосьянским гранитам (рис. 1). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрасты (млн лет), полученные в аналитических точках 9.1 (252 ± 3), 4.1 (358 ± 3) и 12.1 (457 ± 5) трудно увязать с какими-либо эндогенными событиями в эволюции Тиманского

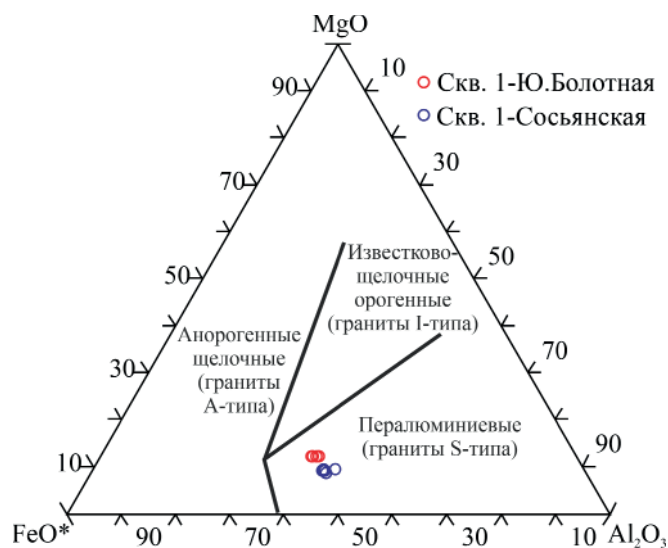


Рис. 9. Состав биотита из гранитов. Основа диаграммы по: Abdel-Rahman, 1994

Fig. 9. Composition of biotite from granites. Diagram based on Abdel-Rahman, 1994

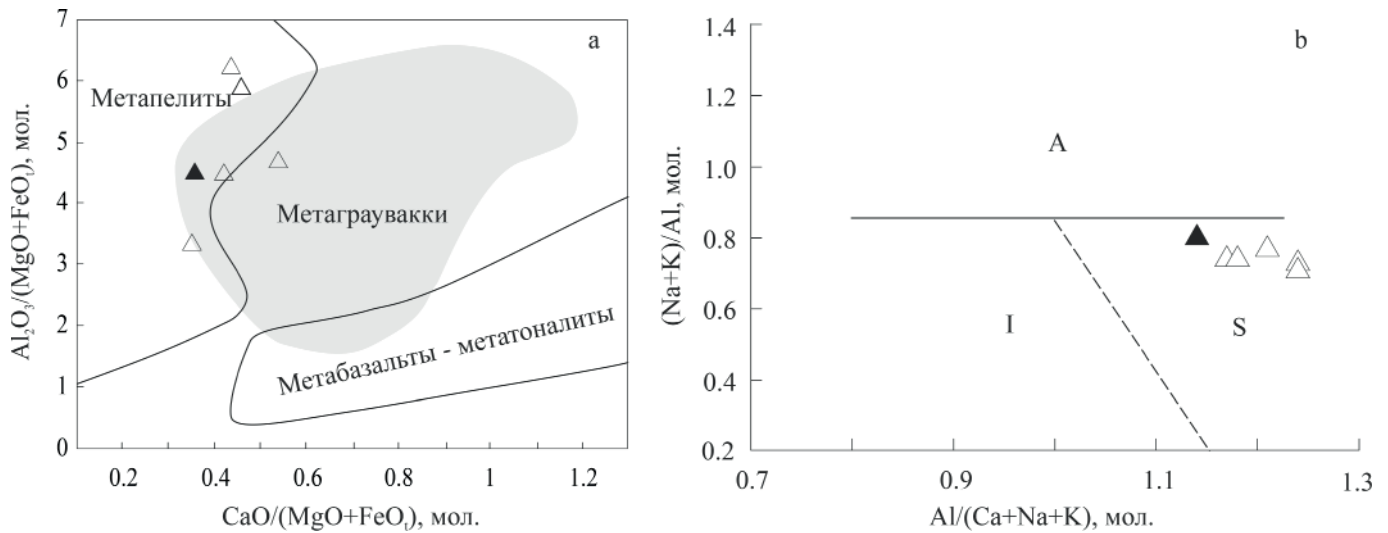


Рис. 10. Диаграммы для определения состава субстрата гранитов: *a* — показаны поля составов частичных расплавов, полученных экспериментально при плавлении различных пород (Altherr et al., 2000); *b* — разграничены поля составов гранитоидов А-, S- и I-типов (по: Maeda, 1990). Усл. обозн. — на рис. 3

Fig. 10. Diagrams for determining the composition of the granite substratum: *a* — fields of denote compositions of partial melts obtained in experimental studies by melting of various bulk compositions (Altherr et al., 2000); *b* — the composition fields of A-, S-, and I-type granitoids according (to Maeda, 1990). Legend — see Fig. 3

мегаблока, поскольку магматические объекты такого возраста не выявлены. Условно их появление может быть связано с тектономагматическими событиями, происходившими в это время на Среднем Тимане. Так, возраст, полученный в точке 9.1, сопоставим с K-Ar-возрастом ультракалийевых трахитов, составляющим 271–288 млн лет (Мальков, 1999), а в точке 4.1 — с K-Ar-возрастом девонских трахитов, равным 365 ± 8 млн лет (Шуйский и др., 2023). $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -возрасты, установленные в аналитических точках 2.1 и 8.1 (617 ± 19 и 629 ± 19 млн лет соответственно), немного древнее датировок цирконов из скв. 1-Нижняя Омра (602 ± 2 млн лет) и скв. 1-Прилукская (593 ± 14 млн лет), расположенных в юго-восточной части Ижемской зоны (рис. 1).

Более половины зерен циркона из гранитов скв. 1-Сосьянская, показавшие возрасты более 1 млрд лет, как и цирконы в гранитах скв. 1-Южная Болотная (Андреичев и др., 2014б), по-видимому, унаследованы из гранитообразующего субстрата, в качестве которого служили вскрытые скважинами метатерригенные породы фундамента Ижемской зоны. Эти породы не охарактеризованы U-Pb-возрастными данными по детритовым цирконам, но сопоставимость по составу пород Ижемской зоны с выходящими на поверхность сланцами Тимана (Белякова и др., 2008 и ссылки в ней), для которых эти данные имеются (Андреичев и др., 2014а; 2017б; 2018; Удоратина и др., 2017; Соболева и др., 2019; Брусницына и др., 2021), позволяет распространять их на породы Ижемской зоны. Таким образом, соотносимость возрастов древних цирконов из гранитов скв. 1-Сосьянская с цирконовыми датировками метаосадочных пород Тимана свидетельствуют о том, что формирование кластических осадков, слагающих верхнедевонский фундамент Тиманского мегаблока, происходило за счет накопления продуктов эрозии одних и тех же источников сноса, каковыми являлись в то время породные комплексы, аналогичные наблюдаемым ныне на Фенноскандинавском

щите, и, возможно, комплексы Среднерусского ороре-на, образовавшегося в результате сочленения в конце раннего протерозоя (1.8–1.7 млрд лет) архейско-нижнепротерозойских литосферных мегаблоков Волго-Сарматии и Фенноскандии (Бибикина и др., 1995; Богданова и др., 2006; Claesson et al., 2001; Bogdanova et al., 2008).

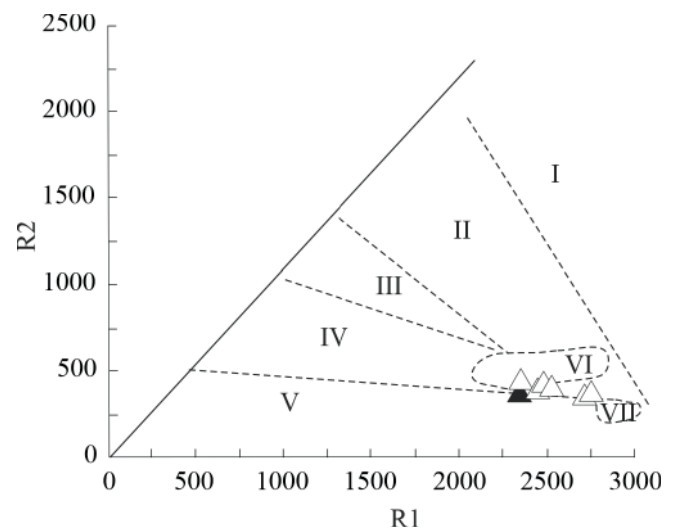


Рис. 11. Мультипликационная диаграмма R1–R2 (Batchelor, Bowden, 1985). Поля составов гранитоидов: I — дифференциатов мантийных магм, II — надсубдукционных, III — постколлизийных поднятий, IV — позднеорогенных, V — анорогенных, VI — синколлизийных, VII — посторогенных. $R1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})$, $R2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$. Усл. обозн. — см. рис. 3

Fig. 11. Multication diagram R1–R2 (Batchelor, Bowden, 1985). Compositional fields of the major granitoid associations: I — mantle fractionates, II — pre-plate collision, III — post-collision uplift, IV — late orogenic, V — anorogenic, VI — syn-collision, VII — post-orogenic. $R1 = 4\text{Si} - 11(\text{Na} + \text{K}) - 2(\text{Fe} + \text{Ti})$, $R2 = 6\text{Ca} + 2\text{Mg} + \text{Al}$. Legend — see Fig. 3

Температура закрытия K/Ar изотопной системы мусковита составляет порядка 370 °C (Hodges, 2004). Это означает, что датировка по мусковиту магматического парагенезиса фиксирует время, когда произошло остывание гранита до температур ниже 370 °C. В случае формирования небольших гранитных тел остывание происходит достаточно быстро, в пределах первых миллионов лет, что не превышает ошибки определения ^{40}Ar - ^{39}Ar -возраста.

Цифры ^{40}Ar - ^{39}Ar -возрастов мусковита из гранитов скважин 1-Сосыанская (565 ± 7 млн лет) и 1-Южная Болотная (548 ± 7 млн лет) оказались близки и сопоставимы с U-Pb (SIMS SHRIMP-IIe и SHRIMP-RG)-результатами по цирконам из гранитоидов других зон фундамента Печорской синеклизы. Это свидетельствует о том, что полученные аргоновые датировки являются хорошей оценкой возраста кристаллизации S-гранитов, образовавшихся наряду с другими гранитоидами фундамента Печорской синеклизы в позднем венде при коллизионных процессах на завершающей фазе тиманского тектогенеза.

Исследование выполнено по теме «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм, изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600012-2) с частичной поддержкой в рамках темы государственного задания ИГТ УрО РАН (ГР № 123011800013-6). ^{40}Ar - ^{39}Ar -датирование выполнено в рамках темы государственного задания ИГМ СО РАН (122041400171-5).

Литература / References

- Акимова Г. Н. Геохронология докембрия Тимана // Сов. геология. 1980. № 12. С. 71—85.
- Akimova G. N. Geochronology of the Precambrian of Timan. Sov. geology, 1980, No. 12, pp. 71—85. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Литвиненко А. Ф. Изотопная геохронология гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы. Сыктывкар: Геопринт, 2007. 68 с.
- Andreichev V. L., Litvinenko A. F. Isotopic geochronology of granitoid magmatism in the basement of the Pechora Basin. Syktyvkar: Geoprint, 2007, 68 p. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Герелс Дж. U-Pb-возраст и источники сноса обломочных цирконов из верхнедокембрийских отложений Северного Тимана // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2014а. Т. 22. № 2, С. 32—45. DOI: 10.7868/S0869592X14020021
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Gehrels G. U-Pb dating and provenance of detrital zircons from the Upper Precambrian deposits of North Timan. Stratigraphy and Geological Correlation, 2014a, V. 22, No. 2, pp. 147—159. DOI: 10.1134/S0869593814020026
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г. Первые U-Pb-данные о возрасте гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы // ДАН. 2014б. Т. 458. № 5. С. 559—566. DOI: 10.7868/S0869565214290192
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G. First U-Pb Data on Age of Granitoids in the Basement of the Pechora Basin. Doklady Earth Sciences, 2014b, V. 458, Part 2, pp. 1207—1214. DOI: 10.1134/S1028334X14100146
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Миллер Э. Л., Кобл М. А., Ларионов А. Н., Вакуленко О. В., Сергеев С. А. Возраст гранитоидов Припечорской разломной зоны фундамента Печорской синеклизы: первые U-Pb (SIMS)-данные // ДАН. 2017а. Т. 474. № 3. С. 321—326. DOI: 10.7868/S0869565217150129
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Miller E. L., Coble M. A., Larionov A. N., Vakulenko O. V., Sergeev S. A. Age of granitoids in the Pripechora fault zone of the basement of Pechora Basin: First U-Pb (SIMS)-data. Doklady Earth Sciences, 2017a, V. 474, issue 1, pp. 498—502. DOI: 10.1134/S1028334X17050191
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Хоуриган Дж. К. Результаты U-Pb (LA-ICP-MS)-датирования детритовых цирконов из терригенных отложений верхней части докембрийского фундамента Северного Тимана // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2017б. Т. 92, вып. 1. С. 10—20.
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Hourigan J. K. U-Pb (LAICP-MS) dating of detrital zircons from clastic sediments of upper part of Precambrian basement of Northern Timan. Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Series, 2017b, V. 92, part 1, pp. 10—20. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Хубанов В. Б., Соболев И. Д. U-Pb (LA-ICP-MS)-возраст детритовых цирконов из метаосадочных пород основания верхнедокембрийского разреза Северного Тимана // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2018. Т. 93, вып. 2. С. 14—26.
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Khubanov V. B., Sobolev I. D. U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from clastic sediments composing lowest part of Precambrian sequence of Northern Timan. Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Series, 2018, V. 93, No. 2, pp. 14—26. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л. Два эпизода надсубдукционного интрузивного магматизма в пределах Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы // Вестник геонаук. 2023а. 10 (346). С. 15—25. DOI: 10.19110/geov.2023.10.2
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Ronkin Yu. L. Two episodes of subduction-related intrusive magmatism within the Pechora zone of the Pechora Basin basement. Vestnik of Geosciences, 2023, No. 10 (346), pp. 15—25. (in Russian)
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л., Миллер Э. Л., Кобл М. А. Гранитоиды Большеземельской зоны фундамента Печорской синеклизы: состав и U-Pb-возраст // Геология и геофизика, 2023б. Т. 64, № 2. С. 180—191. DOI: 10.15372/GiG2022125
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Ronkin Yu. L., Miller E. L., Coble M. A. Granitoids in the Bolshezemel zone of the Pechora Basin basement: composition and U-Pb age. Russian Geology and Geophysics, 2023, V. 64, No. 2, pp. 148—157. DOI: 10.2113/RGG 20224436
- Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ронкин Ю. Л., Ларионов А. Н., Сергеев С. А., Миллер Э. Л., Кобл М. А. U-Pb (SIMS) цирконовая хронология интрузивного магматизма юго-восточной части Ижемской зоны фундамента Печорской синеклизы // Вестник геонаук. 2024. 11 (359). С. 14—29. DOI: 10.19110/geov.2024.11.2
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Ronkin Yu. L., Larionov A. N., Sergeev S. A., Miller E. L., Coble M. A. U-Pb (SIMS) zircon chronology of intrusive magmatism of the south-eastern part of the Izhma zone (basement of Pechora Basin). Vestnik of Geosciences, 2024, No. 11 (359), pp. 14—29. (in Russian)



- Белякова Л. Т. Строение фундамента Ижма-Печорской впадины и Большеземельского мегаблока // Верхний докембрий севера европейской части СССР. Сыктывкар, 1983. С. 72—75. Деп. в ВИНТИ. № 1155—84.
- Belyakova L. T. Structure of the basement of the Izhma-Pechora depression and the Bolshezemelsky megablock). Upper Precambrian of the North of the European part of the USSR). Syktyvkar, 1983, pp. 72—75. Dep. at VINITI. No. 1155—84. (in Russian)
- Белякова Л. Т. Стратиграфические подразделения Ижма-Омринского комплекса // Стратиграфия и литология нефтегазоносных отложений Тимано-Печорской провинции: Сб. науч. тр. Л., 1988. С. 17—22.
- Belyakova L. T. Stratigraphic subdivisions of the Izhma-Omrinsky complex. Stratigraphy and lithology of oil and gas deposits of the Timan-Pechora province collection of scientific papers. Leningrad, 1988, p. 17—22. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Богацкий В. И., Богданов Б. П., Довжилова Е. Г., Ласкин В. М. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. Ухта: ГУП РК ТП НИЦ, 2008. 288 с.
- Belyakova L. T., Bogatskij V. I., Bogdanov B. P., Dovzhikova E. G., Laskin V. M. The basement of the Timan-Pechora oil and gas basin. Uhta: TP SRC, 2008, 288 p. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Степаненко В. И. Магматизм и геодинамика байкалид фундамента Печорской синеклизы // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1991, № 12, с. 106—117.
- Belyakova L. T., Stepanenko V. I. Magmatism and geodynamics of the Baikaliide basement of the Pechora Basin. Proceedings USSR AS. Geological series, 1991, No. 12, pp. 106—117. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Довжилова Е. Г. Новые данные по составу и возрасту фундамента Тимано-Печорской плиты // Структура и динамика литосферы Восточной Европы: Результаты исследований по программе EUROPROBE. М.: ГЕОКАРТ, ГЕОС, 2006. С. 510—520.
- Belyakova L. T., Dovzhikova E. G. New data on the composition and age of the Timan-Pechora plate basement. Structure and Dynamics of the Lithosphere of Eastern Europe. Results of Studies under the EUROPROBE Programme. Moscow: GEOKART, GEOS, 2006, pp. 510—520. (in Russian)
- Бибикова Е. В., Богданова С. В., Клаэссон С., Горбачев Р. М., Кирнозова Т. И. Изотопный возраст, природа и структура докембрийской коры в Беларуси // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1995. Т. 3. № 6. С. 68—78.
- Bibikova E. V., Bogdanova S. V., Claesson S., Gorbatshev R., Kirnozova T. I. Age, nature and structure of the Precambrian crust in Belarus. Stratigraphy and Geological Correlation. Interperiodika. 1995, No. 6, pp. 591—601.
- Богданова С. В., Гарецкий П. Г., Каратаев Г. И. и др. Проект EUROBRIDGE: палеопротерозойская аккреция и коллизия коры в Фенноскандии и Сарматии. Геология и геофизические образы // Строение и динамика литосферы Восточной Европы: Результаты исследований по программе EUROPROBE: Очерки по региональной геологии России / Ред. Н. И. Павленкова М.: Роснедра: РАН, ГЕОКАРТ, 2006. С. 221—290.
- Bogdanova S. V., Garetsky R. G., Karataev G. I., et al. EUROBRIDGE Project: Paleoproterozoic crustal accretion and collision in Fennoscandia and Sarmatia. Geology and geophysical images. Structure and dynamics of the lithosphere of Eastern Europe: Results of studies on the EUROPROBE program: Essays on regional geology of Russia. Ed. Pavlenkova N. I. Moscow: ROSNEDRA, RAS, GEOKART, 2006, pp. 221—290. (in Russian)
- Борисова Е. Ю., Бибикова Е. В., Доброженецкая Л. Ф., Макаров В. А. Геохронологическое изучение циркона гранитогнейсов Кокчетавского алмазоносного района // Докл. РАН. 1995. Т. 343. № 6. С. 801—805.
- Borisova E. Yu., Bibikova E. V., Dobrozhenskaya L. F., Makarov V. A. Geochronological study of zircon from granite-gneisses of the Kokchetav diamondiferous region. Doklady Earth Sciences, 1995, V. 343, No. 6, pp. 801—805. (in Russian)
- Брусницына Е. А., Ершова В. Б., Худoley А. К., Андерсон Т., Маслов А. В. Возраст и источники сноса пород четлаской серии (рифей) Среднего Тимана по результатам U-Th-Pb (LA-ICP-MS)-датирования обломочных цирконов // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2021. Т. 29. № 6. С. 3—23. DOI: 10.31857/S0869592X21060028
- Brusnitsyna E., Ershova V., Khudoley A., Andersen T., Maslov A. Age and provenance of the Riphean rocks of the Chetlas Group of the Middle Timan: U-Th-Pb (LAICP-MS) dating of detrital zircons. Stratigraphy and Geological Correlation, 2021, V. 29, No. 6, pp. 607—626. DOI: 10.1134/S0869593821060022
- Гафаров Р. А. О глубинном строении фундамента в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Урала // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1970. № 8. С. 3—14.
- Gafarov R. A. On the deep structure of the basement in the junction zone of the East European Platform and the Urals. Proceedings of USSR AS. Geological series, 1970, No. 8, pp. 3—14. (in Russian)
- Гецен В. Г. Геодинамическая реконструкция развития северо-востока европейской части СССР для позднепротерозойского этапа // Геотектоника. 1991. № 5. С. 26—37.
- Getzen V. G. Geodynamic reconstruction of the development of the Northeast of the European part of the USSR for the Late Proterozoic stage. Geotectonics, 1991, No. 5, pp. 26—37. (in Russian)
- Дедеев В. А., Журавлев В. С., Запольнов А. К. Тиманская и Печорская складчатые системы // Структура фундамента платформенных областей СССР. Л.: Наука, 1974. С. 82—90.
- Dedeev V. A., Zhuravlev V. S., Zapol'nov A. K. Timan and Pechora fold systems. Structure of the basement of the platform regions of the USSR. Leningrad: Nauka, 1974, pp. 82—90. (in Russian)
- Дедеев В. А., Запорожцева И. В. Земная кора Европейского Северо-Востока СССР. Л.: Наука, 1985, 98 с.
- Dedeev V. A., Zaporozhtseva I. V. The Earth's crust of the European North-East of the USSR. Leningrad: Nauka, 1985, 98 p. (in Russian)
- Костицын Ю. А., Белоусова Е. А., Силантьев С. А., Бортников Н. С., Аносова М. О. Современные проблемы геохимических и U-Pb геохронологических исследований циркона в океанических породах // Геохимия. 2015. № 9. С. 771—800. DOI: 10.7868/S0016752515090022
- Kostitsyn Yu. A., Belousova E. A., Silant'ev S. A., Bortnikov N. S., Anosova M. O. Modern problems of geochemical and U-Pb geochronological studies of zircon in oceanic rocks. Geochem. Int., 2015, V. 53, No. 9, pp. 759—785. DOI:10.1134/S0016702915090025



- Мальков Б. А. Герцинский бостонитовый комплекс Среднего Тимана // Геология Европейского Севера России: Труды Института геологии Коми НЦ УрО РАН; Вып. 103. № 4. Сыктывкар, 1999. С. 43—47.
Malkov B. A. Gertsinsky bostonite complex of the Middle Timan. Geology of the European North of Russia. Proceedings of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS. Issue 103, Syktvykar, 1999, No. 4, pp. 43—47. (in Russian)
- Оловянишников В. Г., Бушуев А. С., Дохсаньянц Э. П. Строение зоны сочленения Русской и Печорской плит по геолого-геофизическим данным // Докл. РАН. 1996. Т. 351. № 4. С. 209—231.
Olovyanishnikov V. G., Bushuev A. S., Dokhsanyants E. P. The structure of the conjugation zone of the Russian and Pechora plates from geological and geophysical data. Doklady Earth Sciences, 1996, V. 351, No. 8, pp. 1228—1232.
- Пучков В. Н. Структурные связи Приполярного Урала и Русской платформы. Л.: Наука, 1975. 203 с.
Puchkov V. N. Structural connections between the Cis-Polar Urals and adjacent part of the East-European Platform. Leningrad: Nauka, 1975, 208 p.
- Пучков В. Н. Эволюция литосферы: от Печорского океана к Тиманскому орогену, от Палеоуральского океана к Уральскому орогену // Проблемы тектоники Центральной Азии. М.: ГЕОС, 2005. С. 309—342.
Puchkov V. N. Evolution of the lithosphere: from the Pechora Ocean to the Timan Orogen, from the Paleoural Ocean to the Ural Orogen. Problems of Tectonics of Central Asia. Moscow: GEOS, 2005, pp. 309—342. (in Russian)
- Решения Межведомственного стратиграфического совещания по ордовики и силуру Восточно-Европейской платформы (Ленинград, 1984 г.). Л.: ВСЕГЕИ, 1987. 114 с.
Decisions of the Interdepartmental Stratigraphic Meeting on the Ordovician and Silurian of the East European Platform (1984). Leningrad: VSEGEI, 1987, 114 p. (In Russian)
- Ронкин Ю. Л., Лепихина О. П., Голик С. В., Журавлев Д. З., Попова О. Ю. Мультиэлементный анализ геологических образцов кислотным разложением и окончанием на HR ICP-MS Element2 // Информационный сборник научных трудов ИГТ УрО РАН: Ежегодник-2004. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2005. С. 423—433.
Ronkin Yu. L., Lepikhina O. P., Golik S. V., Zhuravlev D. Z., Popova O. Yu. Multielement analysis of geological samples by acid decomposition and completion on HR ICPMS Element2. Information collection of scientific works of the Institute of Geography UB RAS: Yearbook 2004. Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2005, pp. 423—433 (in Russian).
- Соболева А. А., Андреичев В. Л., Бурцев И. Н., Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б., Соболев И. Д. Детритовые цирконы из верхнедокембрийских пород вымской серии Среднего Тимана (U-Pb-возраст и источники сноса) // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2019. Т. 94, вып. 1. С. 3—16.
Soboleva A. A., Andreichev V. L., Burtsev I. N., Nikulova N. Y., Khubanov V. B., Sobolev I. D. Detrital zircons from Upper Precambrian rocks of the Vym series of the Middle Timan (U-Pb age and sources of drift). Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Section, 2019, V. 94, No. 1, pp. 3—16. (in Russian)
- Соболева А. А., Андреичев В. Л. Коллизионные магматические породы орогена Тиманид // Соотношение времени образования магматических формаций и рудных месторождений металлогенических провинций Евразии: IX Российская конференция по изотопной геохронологии. Материалы конференции. М.: ИГЕМ РАН, 2025. С. 196—198.
Soboleva A. A., Andreichev V. L. Collisional igneous rocks of the Timanides orogen // Relationship between ages of igneous formations and ore deposits in the metallogenic provinces of Eurasia: IX Russian Conference on Isotope Geochronology: Conference Proceedings. Moscow: IGGEM RAS, 2025, pp. 196—198. (in Russian)
- Стратиграфический кодекс России. Издание третье. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
Stratigraphic Code of Russia. Third edition. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2019, 96 p. (in Russian)
- Тимано-Печорский седиментационный бассейн: Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических) / Н. И. Никонов, В. И. Богацкий, А. В. Мартынов и др. Ухта: Изд-во ТП НИЦ, 2000.
Timan-Pechora sedimentary basin. Atlas of geological maps (lithological-facial, structural and paleogeological). Eds. V. I. Bogatsky, Z. V. Larionova. Ukhta: TP SRC, 2000. (in Russian)
- Травин А. В., Юдин Д. С., Владимиров А. Г., Хромых С. В., Волкова Н. И., Мехоношин А. С., Колотилина Т. Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. № 11. С. 1181—1199.
Travin A. V., Yudin D. S., Vladimirov A. G., Khromykh S. V., Volkova N. I., Mekhonoshin A. S., Kolotilina T. B. Thermochronology of the Chernorud Granulite Zone, Ol'khon Region, Western Baikal Area. Geochemistry International, 2009, V. 47, No. 11, pp. 1107—1124. DOI: 10.1134/S0016702909110068
- Удоратина О. В., Бурцев И. Н., Никулова Н. Ю., Хубанов В. Б. Возраст метапесчаников верхнедокембрийской четласской серии Среднего Тимана на основании U-Pb-датирования детритных цирконов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2017. Т. 92, вып. 5. С. 15—32.
Udoratina O. V., Burtsev I. N., Nikulova N. Yu., Khubanov V. B. Age of metasediments of the Upper Precambrian Chetlas Series of the Middle Timan on the basis of U-Pb dating of detrital zircons. Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological Section, 2017, V. 92, No. 5, pp. 15—32. (in Russian)
- Фишман М. В., Андреичев В. Л., Естафьева А. Д. Каталог определений возраста горных пород СССР радиологическими методами (северо-восток европейской части СССР, север Урала, Пай-Хой, Новая Земля). Сыктывкар: Ин-т геологии Коми фил. АН СССР, 1981. 181 с. Деп. в ВИНТИ. № 531—82.
Fishman M. V., Andreychev V. L., Estafieva A. D. Catalogue of age determinations of rocks of the USSR by radiological methods (North-East of the European part of the USSR, North of the Urals, Pai-Khoi, Novaya Zemlya). Syktvykar: Institute of Geology, Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1981, 181 p. Dep. in VINITI. No. 531—82. (in Russian)
- Шуйский А. С., Куликова К. В., Удоратина О. В., Лебедев В. А. Позднедевонская плюмовая Цилемская дайка (Средний Тиман): обоснование геодинамической природы и



- возраста // Вестник геонаук. 2023. 12(348). С. 30—36. DOI: 10.19110/geov.2023.9.4
- Shuisky A. S., Kulikova K. V., Udoratina O. V., Lebedev V. A. Late Devonian plume Tsilemsky dyke (Middle Timan): composition and K-Ar age. *Vestnik of Geosciences*, 2023, No. 12(348), pp. 30—36. (in Russian)
- Abdel-Rahman A. F. M. Nature of biotites from alkaline, calc-alkaline and peraluminous magmas // *Journal of Petrology*. 1994. V. 35 (2). P. 525—541. DOI: 10.1093/petrology/35.2.525
- Altherr R., Holl A., Hegner E., Langer C., Kreuzer H. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) // *Lithos*. 2000. V. 50. P. 51—73. DOI: 10.4236/ojped.2015.52023 2 654
- Batchelor R. A., Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters // *Chemical Geology*. 1985. V. 48. P. 43—55. DOI: 10.1016/0009-2541(85)90034-8
- Belousova, E., Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Fisher, N. L., Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2002. V. 143 (5). P. 602—622. DOI: 10.1007/s00410-002-0364-7
- Black L. P., Kamo S. L., Allen C. M., Aleinikoff J. N., Davis D. W., Korsch R. J., Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U—Pb geochronology // *Chem. Geol.* 2003. V. 200. P. 155—170. DOI: 10.1016/S0009-2541(03)00165-7
- Bogdanova S.V., Bingen B., Gorbatshev R. et al. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia // *Precambrian Res.* 2008. V. 160. P. 23—45.
- Chappell B. W., White A. J. R. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*. 2001. V. 48. P. 489—499. DOI: 10.1046/j.1440-0952.2001.00882.x
- Claesson S., Bogdanova S.V., Bibikova E.V., Gorbatshev R. Isotopic evidence of Palaeoproterozoic accretion in the basement of the East European Craton // *Tectonophysics*. 2001. V. 339. P. 1—18.
- Coble M. A., Vazquez J., Barth A. P., Wooden J., Burns D., Kylander-Clark A., Jackson S., Vennari C. E. Trace element characterization of MAD-559 zircon reference Material for ion microprobe analysis. *Geostandards and Geoanalytical Research*. 2018, V. 42. P. 481—497. DOI: 10.1111/ggr.12238.
- Gee D. G., Beliakova L., Pease V., Larionov A., Dovzhikova E. New, Single Zircon (Pb-Evaporation) Ages from Vendian Intrusions in the Basement beneath the Pechora Basin, Northeastern Baltica // *Polarforschung*. 2000. V. 68. P. 161—170. DOI: 10.2312/polarforschung.68.16.
- Hanchar J.M., Watson E.B. Zircon saturation thermometry // *Rev. Mineral. Geochem.* 2003. V. 53. No. 1. P. 89—112. DOI:10.2113/0530089
- Hodges K.V. Geochronology and thermochronology in orogenic systems // *Treatise on Geochemistry*. Oxford, Elsevier, 2004. P. 263—292. DOI: 10.1016/B0-08-043751-6/03024-3
- Hoskin P. W. O. Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2005. V. 69. P. 637—648. DOI: 10.1016/j.gca.2004.07.006
- Ireland T. R., Gibson G. M. SHRIMP monazite and zircon geochronology of high-grade metamorphism in New Zealand // *J. Metamorphic Geol.* 1998. V. 16. P. 149—167. DOI: 10.1111/j.1525-1314.1998.00112.x
- Le Maitre R. W. A. Classification of igneous rocks and glossary of terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Oxford, Blackwell, 1989. 193 p.
- Ludwig K. R. SQUID 2 — A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2009. No. 5. 110 p.
- Maeda J. Opening of the Kuril Basin deduced from the magmatic history of central Hokkaido, North Japan // *Tectonophysics*. 1990. V. 174. P. 235—255. DOI: 10.1016/0040-1951(90)90324-2
- Maniar P. D., Piccoli P. M. Tectonic discrimination of granitoids // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1989. V. 101 (5). P. 635—643. DOI: 10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2
- O'Connor J. T. A. A classification for quartz-rich igneous rock based on feldspar ratios // *U.S. Surv. Prof. Paper*. 1965. V. 52B. P. B79—B84.
- Pearce J. A., Harris N. B. W., Tindle A. G. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks // *Journal of Petrology*. 1984. V. 25. Issue 4. P. 956—983. DOI: 10.1093/petrology/25.4.956.
- Rickwood P. C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides and minor elements // *Lithos*. 1989. V. 22. P. 247—263. DOI: 10.1016/0024-4937(89)90028-5
- Sun S.-s., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, Colorado, USA, Special publication, 1989? V. 42, P. 313—345. DOI:10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19
- Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 2006. V. 151. P. 413—433. DOI: 10.1007/s00410-006-0068-5.

Поступила в редакцию / Received 29.10.2025



Золоторудное месторождение Тунанца в трубке взрыва (Кордильера-Дель-Кондор, юго-восток Эквадора) и вопросы классификации подобных объектов

Х. П. Медина, П. А. Игнатов

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, Москва, Россия
juanmedinageologia@gmail.com, petrignatov@gmail.com

Впервые представлены оригинальные данные по месторождению Тунанца, расположенному в Кордильере-дель-Кондор, в Субандийской зоне на юго-востоке Эквадора. В исследование включены геологическая схема, описание вмещающих пород и минерализованных структур, что служит основой для первичной классификации месторождения и понимания его происхождения. Используются геологические материалы и документация по поверхностным обнажениям и подземным работам на месторождении Тунанца; петрографическое исследование включало анализ 96 шлифов. Используются литературные данные по аналогичным месторождениям. Получены важные характеристики месторождения и подобных объектов. Предложена классификация этих месторождений в зависимости от положения минерализации относительно трубки. Результаты демонстрируют взаимосвязь между месторождением и типом минерализованных структур и должны использоваться в качестве инструмента при поисках и классификации эпитермальных и порфировых месторождений.

Ключевые слова: *брекчиевая трубка, классификация, золото, эпитермальный, Кордильера-дель-Кондор*

Tunantza breccia-pipe hosted gold deposit (Cordillera Del Condor, southeastern Ecuador) and issues of classification of similar deposits

J. P. Medina, P. A. Ignatov

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia

For the first time, original data from the Tunantza deposit, located in the Cordillera del Cóndor in the Sub-Andean zone of southeastern Ecuador, are presented. The study includes a geological map, descriptions of host rocks and mineralized structures, which serve as the basis for the preliminary classification of the deposit and understanding its origin. Geological materials and documentation from surface outcrops and underground workings at the Tunantza deposit are used; the petrographic study involves the analysis of 96 thin sections. Literature data on similar deposits are used. Important characteristics of the deposit and similar objects are obtained. A classification of these deposits based on the position of mineralization relative to the pipe is proposed. The results demonstrate the relationship between the deposit and the type of mineralized structures and should be used as a tool in the exploration and classification of epithermal and porphyry deposits.

Keywords: *breccia-pipe, classification, gold, epithermal, Cordillera del Condor*

Введение

Порфировые и эпитермальные месторождения представляют собой значимые источники меди и золота — двух металлов, ключевая роль которых в современной экономике обусловлена их промышленными свойствами, экономической ценностью и исторической значимостью, определяя их статус стратегических ресурсов и активов глобальной финансовой системы. Крупные месторождения данного генетического типа ассоциированы с брекчиевыми трубками магматическо-гидротермального или фреатомагматического генезиса, как, например, медно-молибденовое порфировое месторождение El Teniente (Чили) с ресурсами свы-

ше 94 млн т меди (Séguret и др. 2013) либо эпитермальные месторождения Асуран (Филиппины) с добычей более 200 т золота (Figueroa и др., 2022) и Криппл-Крик (США) с более чем 810 т извлеченного золота (Kadel-Harder и др., 2020), пространственно ассоциированные с Тихоокеанским рудным поясом, так же, как и месторождение Тунанца. Вместе с тем рудовмещающие брекчии отличаются значительной сложностью, что определяет их недостаточную изученность. В этой связи детальное изучение таких брекчий достаточно важно. Полученные данные позволили уточнить классификацию месторождений брекчий, предложенную Corbett (2017) и Sillitoe и др. (2005).

Для цитирования: Медина Х. П., Игнатов П. А. Золоторудное месторождение Тунанца в трубке взрыва (Кордильера-Дель-Кондор, юго-восток Эквадора) и вопросы классификации подобных объектов // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 20–25. DOI: 10.19110/geov.2025.11.2

For citation: Medina J. P., Ignatov P. A. Tunantza breccia-pipe hosted gold deposit (Cordillera Del Condor, southeastern Ecuador) and issues of classification of similar deposit. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 20–25, doi: 10.19110/geov.2025.11.2



Объект исследования

Золоторудное месторождение Тунанца, ранее известное как Пиунца, разрабатываемое по лицензии горного общества «Питука II», расположено на юге Эквадора, в провинции Самора-Чинчипе, в 9 км к юго-востоку от города Самора (78°53' в. д., 4°07' ю. ш.), в Кордильере-дель-Кондор. В этом же регионе находятся эпитермальное месторождение Фрута-дель-Норте, с запасами 9.91 млн унций золота и 15.0 млн унций серебра (Leary и др., 2016), медно-порфировый объект Мирадор с ресурсами 609 млн метрических тонн при содержании 0.58 % Cu, 3.2 млн унций золота и 22 млн унций серебра (Drobe и др., 2013), скарновое месторождение Намбиха и другие практически не изученные золотоносные зоны. К ним относится и месторождение Тунанца, которое представляет собой мелко-среднее эпитермальное месторождение, локализованное в трубе фреатомагматической брекчии.

Цель настоящего исследования — установить основные характеристики месторождения Тунанца для определения его типа. Для этого приведены геологическое описание объекта, характеристики минерализованных структур, результаты петрографических и минераграфических исследований. Также собрана информация по основным месторождениям золота и меди, связанным с брекчиевыми трубками, для их классификации.

Методы

Исследование основано на данных геолого-структурного анализа и изучения более чем 500 проб пород, руд и метасоматитов, отобранных из поверхностных выходов коренных пород, и на документации более чем 3000 погонных метров горных выработок месторождения золота Тунанца.

Библиографический обзор выполнен по месторождениям золота и меди, в которых основная минерализация связана с брекчиевыми трубками, ассоциированными с магматическими гидротермальными системами.

Петрографические и минералогические исследования включали макроскопическое изучение и диагностику текстур и структур пород и руд 315 образцов, отобранных на месторождении Тунанца.

Оптическая микроскопия. Изучено 96 образцов, из которых 47 прозрачных шлифов и 10 аншлифов соответствовали фрагментам руды и пробам из обогащенной зоны; остальные 39 прозрачных шлифов — по породам и метасоматитам. Исследования проводились на микроскопе Axioscope-5, оборудованном цифровой камерой и компьютером с программным обеспечением SIAMS, на кафедре геологии месторождений полезных ископаемых геологоразведочного факультета Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе РГГРУ — МГРИ.

Результаты и обсуждение

Геология месторождения Тунанца. Оно расположено на юго-востоке Эквадора, в Субандийской зоне, в пределах полимиктовой брекчиевой трубки взрывного происхождения типа фреатомагматической.

Брекчиевое тело прорывает в гранитные породы батолита Самора (рис. 1). Метаморфические породы неопротерозойско-палеозойского возраста образуют останцы кровли над батолитом, который на западе граничит с метаморфическими поясами, включающими триасовые породы, принадлежащие к Кордильере-Реаль (Leary и др., 2016). Данная зона интерпретируется как возможная область рифтогенеза пермско-триасового возраста, в которой происходило накопление осадочных пород, перекрытых щелочными вулканитами, которые несогласно залегают на морских карбонатных породах формации Сантьяго поздне-триасового-раннеюрского возраста (Leary и др., 2016).

Юрский калиево-щелочной вулканический пояс, простирающийся от севера Перу до Колумбии, включает батолит Самора длиной 200 км и шириной 50 км, имеющий северо-северо-восточное простирание. Он состоит из двух различных интрузивных комплексов: преимущественно однородных пластовых плутонов, представленных в основном среднезернистыми гранодиоритами, диоритами и тоналитами (Drobe и др., 2013; Leary и др., 2016), которые обнажаются на юго-западе в контакте с брекчиями, и субвулканических интрузий, даек и штоков, образующих пробки, обычно промежуточного (до фельзитового) состава, которые пересекают батолит в нескольких местах (Drobe и др., 2013; Leary и др., 2016) и выделяются своей связью с зонами медно-золотой минерализации (Drobe и др., 2013). Данный тип пород относится к риолитовым кварц-полевошпатовым порфирам, присутствующим внутри брекчии в виде обломков и неправильных блоков размером более 5 м, представляющих собой реликты гипабиссального тела, которое внедрилось в плутонические породы батолита Самора до образования брекчий (рис. 2).

Брекчии слагают неправильное тело с диаметром на поверхности около 1.4 км, с крутопадающими к центру контактами, указывающими на обратноконическую форму. Преимущественно это брекчии, содержащие хаотично распределённые обломки различного размера, включающие: риолитовый порфир, базальты, андезиты, гранодиорит, кварциты, гнейсы и в меньшей степени железистые туфы. Пересекаются гидротермальными брекчиями в виде субвертикальных жил, беспорядочно распределённых в теле брекчии. По комплексу признаков брекчии отнесены к фреатомагматическим.

Минерализация. Обогащённые зоны золоторудного месторождения Тунанца находятся в центральной части тела брекчий. Идентифицированы два типа минерализованных структур: 1 — минерализованные брекчии с сульфидной матрицей и обломками самой брекчии, образующие неправильные тела в виде удлиненных субвертикальных блоков, обычно около 20 м в поперечном сечении; 2 — тонкие, ~2 см, зигзагообразные сульфидно-кварцевые жилы с почти вертикальным падением и протяжённостью до 30 м. По отношению к первому типу минерализации они располагаются радиально, и отмечается незначительное увеличение их мощности вблизи него.

Рудные минералы включают пирит, сфалерит, галенит, халькопирит, арсенопирит и в меньших количествах другие сульфиды, которые в совокупности составляют более 60 %. Жильные минералы представле-

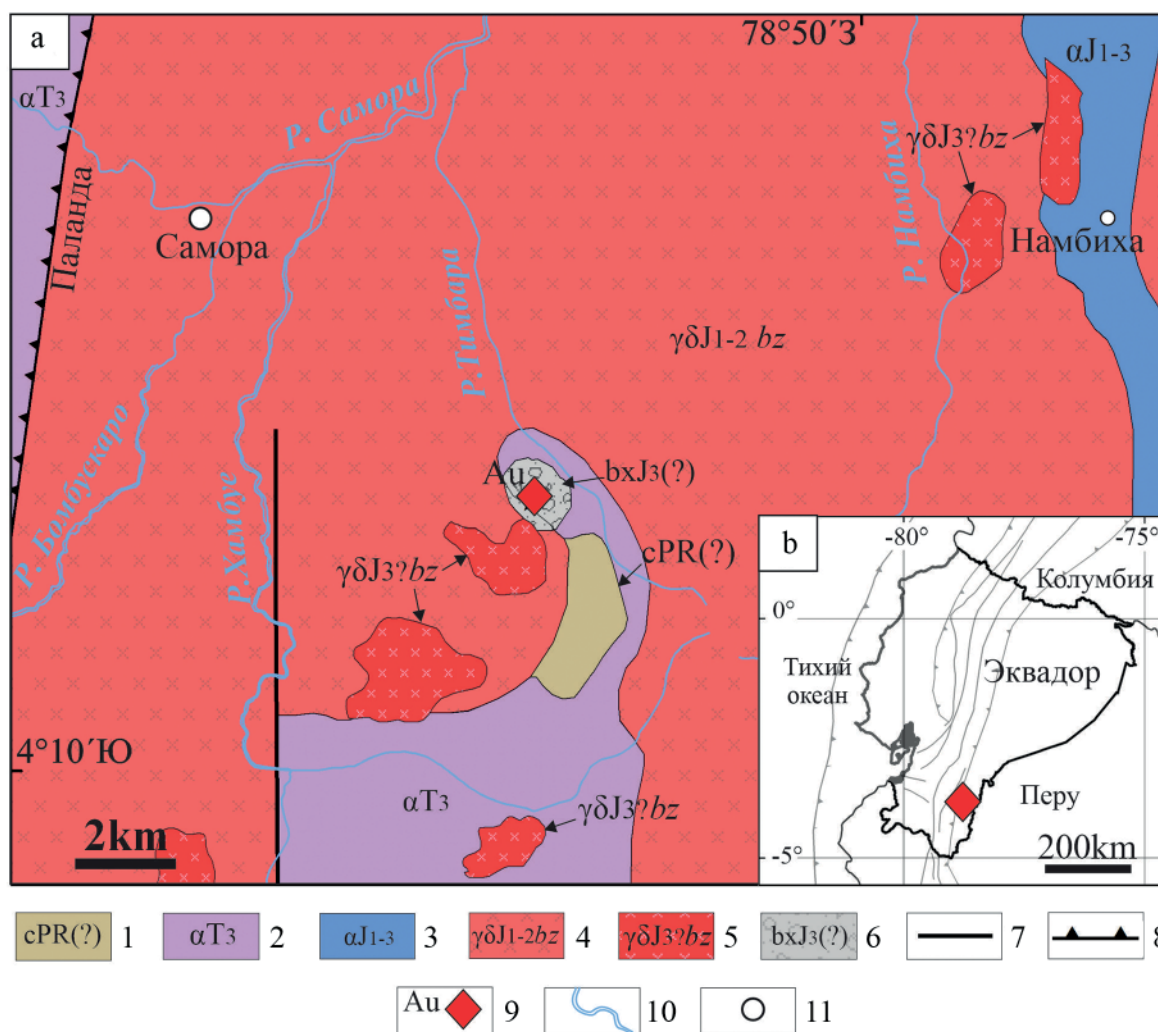


Рис. 1. Геологическая схема (а) и географическое расположение (б) золоторудного месторождения Тунанца.

Составлена на основе данных (INEMIN, 1994; INIGEMM, 2017).

1 — сланцы и гнейсы; 2 — гнейсы, лавы и вулканиты; 3 — известково-щелочные лавы, вулканиты и скарны; 4 — гранодиориты батолита Самора; 5 — поздние интрузивы гранодиорита, диорита батолита Самора; 6 — фреатомагматические брекчии; 7 — главный разлом; 8 — сдвиговый разлом; 9 — месторождение Тунанца; 10 — реки; 11 — населенный пункт

Fig. 1. Geological scheme (a) and Geographic location (b) of the Tunantza gold deposit was developed based on data (INEMIN, 1994; INIGEMM, 2017).

1 — schists and gneiss; 2 — gneiss, lavas and volcanic rocks; 3 — calc-alkaline lavas, volcanic rocks and skarns; 4 — granodiorites of the Zamora batholith; 5 — late intrusive rocks (granodiorite, diorite) of the Zamora batholith; 6 — phreatomagmatic breccias; 7 — main fault; 8 — strike-slip fault; 9 — Tunantza deposit; 10 — rivers; 11 — town

ны кварцем и поздними карбонатами. Самородное золото присутствует в виде зёрен размером 20–80 мкм. Концентрация золота сильно варьирует в соотношении Ag/Au: 0.5, 1.0, 5.0.

Другие месторождения в брекчиях-трубках. Месторождения золота и меди, связанные с брекчиевыми трубками и ассоциированные с магматическими гидротермальными системами, включают в основном порфировые месторождения, такие как Эль-Теньенте в Чили (Séguret и др., 2013), и эпitherмальные, как Акупан на Филиппинах (Figueroa и др., 2022). В них проявлены сложные процессы геологической эволюции, включая наложение на порфировые месторождения. Запасы золота в рассматриваемых объектах варьируют от 15 т, как в Дяньфан в Китае (Tian и др., 2017), до более чем 1400 т в Ладолам, Папуа-Новая Гвинея (Blackwell и др., 2014). Почти все они расположены в Циркум-Тихоокеанском поясе (рис. 3).

Возраст этих месторождений изменяется от пермокарбонного до плейстоценового. На поверхности брекчиевые трубки образуют тела неправильной формы с диаметрами от 200 до 5000 м, но обычно между 600 и 1600 м.

О классификации месторождений в брекчиях-трубках. Анализ собранных данных позволяет дифференцировать месторождения в зависимости от положения и формы рудных залежей. На этой основе предлагается выделять четыре типа месторождений:

1 — внутреннего заполнения, когда оруденение в виде жил, вкрапленности или их сочетаний распространено по всему объёму брекчиевого тела;

2 — центральный, когда прожилково-вкрапленная минерализованная матрица расположена в центральной части брекчиевых трубок, обычно в сопровождении окружающих жил. К этой группе относится месторождение Тунанца;



3 — периферический, когда рудные жилы и вкрапленная минерализация локализованы в зонах контакта между трубкой и вмещающими породами;

4 — комбинированный, который включает два или более из вышеперечисленных типов. Может сочетаться с минерализацией за пределами брекчии в виде жил, пересекающих тело брекчиевой трубки с обогащенными зонами внутри брекчии, а также в виде жил, обогащенных блоков, вкрапленной минерализации во

вмещающих породах и минерализованных порфиров за пределами трубки.

Выделено пять месторождений *центрального типа*, включая Туананца. Они характеризуются центральным оруденением, представляющим собой брекчиевые тела с сульфидной матрицей. Их характеристики суммированы в таблице 1. Все месторождения возраста эоцена или моложе, минерализация обычно включает пирит, халькопирит, галенит, сфалерит и само-

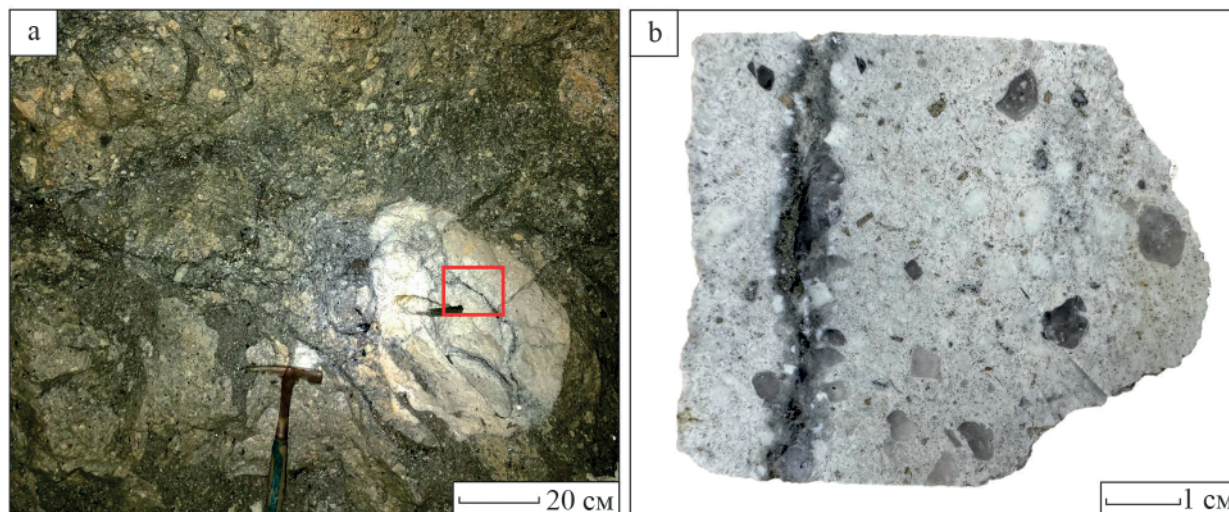


Рис. 2. Минерализованная брекчия месторождения Туананца: а — полукруглый обломок риолитового кварц-полевошпатового порфира; красная рамка показывает место отбора образца для фотографии б; б — прожилок сульфидов и кварца, пересекающий обломок риолитового кварц-полевошпатового порфира с кварц-серицитовым метасоматозом; крупные кристаллы кварца сохранились

Fig. 2. Mineralized breccia from the Tunantza deposit: а — subrounded fragment of rhyolitic quartz-feldspar porphyry; the red box indicates the location where the sample for photograph b was taken; б — sulfide and quartz veinlet cross-cutting the fragment of rhyolitic quartz-feldspar porphyry with quartz-sericitic alteration; coarse quartz crystals are preserved

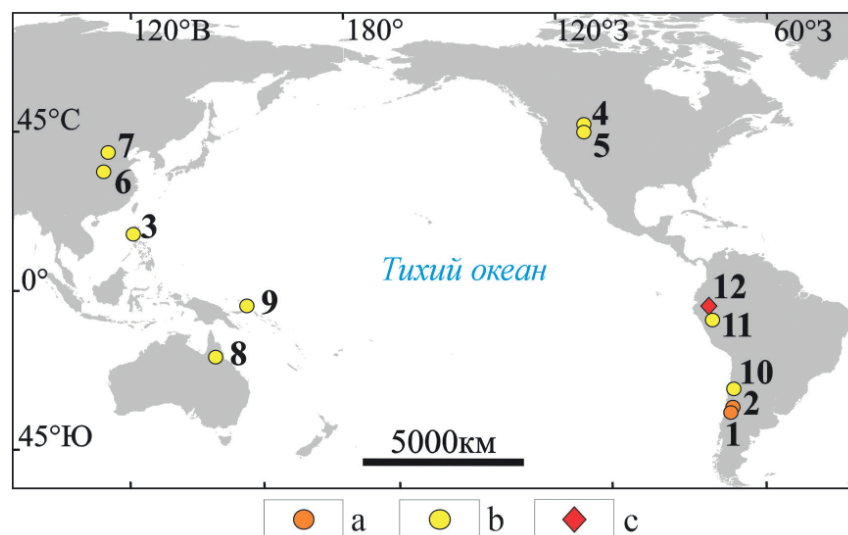


Рис. 3. Расположение месторождения Туананца и подобных объектов, связанных с брекчиевыми трубками. Составлено на основе анализа литературы, приведенной в данной статье: а — медно-молибденовый порфировый тип: 1 — Эль-Теньенте, Чили; 2 — Рио-Бланко-Лос-Бронсес, Чили; б, с — эпитеермальные: 3 — Акупан, Филиппины; 4 — Монтана Таннелс, США; 5 — Голден Санлайт, США; 6 — Дяньфан, Китай; 7 — Исинчжай, Китай; 8 — Кидстон, Австралия; 9 — Ладолам, Папуа — Новая Гвинея; 10 — Паскуа, Чили — Аргентина; 11 — Янакоча, Перу; 12 — Туананца, Эквадор

Fig. 3. Location of the Tunantza deposit and related objects associated with breccia pipes. Developed based on analysis of literature cited in this article: а — copper-molybdenum porphyry type: 1 — El Teniente, Chile; 2 — Rio Blanco-Los Bronces, Chile; б, с — epithermal type: 3 — Acupan, Philippines; 4 — Montana Tunnels, USA; 5 — Golden Sunlight, USA; 6 — Dianfang, China; 7 — Yixingzhai, China; 8 — Kidston, Australia; 9 — Ladolam, Papua New Guinea; 10 — Pascua, Chile-Argentina; 11 — Yanacocha, Peru; 12 — Tunantza, Ecuador



Таблица 1. Характеристика некоторых месторождений золота и меди в трубках брекчий (центрального типа)
Table 1. Characteristics of some breccia-pipe hosted gold and copper deposits (central type)

Месторождение, брекчия, страна Deposit, breccia, country	Запасы, средний диаметр брекчий Reserves, average breccia diameter	Тип месторождения, возраст Deposit type, age	Рудные минералы Ore minerals	Литература References
Ладолам, вулкан Луисе, Папуа – Новая Гвинея Ladolam, Luise Volcano, Papua New Guinea	>1400 т Au 4500 м	золотое эпиптермальное, плиоплейстоцен Gold epithermal, Plio-Pleistocene	пирит, марказит, халькопирит, галенит, тетраэдрит, теннантит Pyrite, marcasite, chalcopyrite, galena, tetrahedrite, tennantite	Blackwell et al., 2014 Müller et al., 2003 Müller et al., 2002
Рио-Бланко-Лос-Бронсес, Доновос, Чили Río Blanco-Los Bronces, Donoso, Chile	> 50 млн т Cu 600 м	медно-молибденовое минерализованная брекчия, миоцен-плиоцен Copper-molybdenum mineralized breccia, Miocene-Pliocene	халькопирит, пирит, спекулярит, молибденит Chalcopyrite, pyrite, specularite, molybdenite	Skewes et al., 2003
Паскуа, Бреча Централь, Чили – Аргентина Pascua, Brecha Central, Chile-Argentina	125 т Au (в брекчии) 340 м	Au-Ag-Cu высокосульфидное эпиптермальное, миоцен Au-Ag-Cu high-sulfide epithermal, Miocene	пирит, энаргит, самородное золото, барит, англезит Pyrite, enargite, native gold, barite, anglesite	Chouinard et al., 2005
Монтана Таннелс, США Montana Tunnels, USA	53 т Au 1000 м	Au-Ag-Pb-Zn эпиптермальное, эоцен Au-Ag-Pb-Zn epithermal, Eocene	электрум, сфалерит, галенит Electrum, sphalerite, galena	Sillitoe et al., 1985 Gammons C., et al., 2020
Тунанца, Эквадор Tunanza, Ecuador	– 1400 м	золотое эпиптермальное, поздняя юра – ранний мел (?) Gold epithermal, Late Jurassic-Early Cretaceous?	пирит, сфалерит, халькопирит, галенит, арсенопирит Pyrite, sphalerite, chalcopyrite, galena, arsenopyrite	Настоящее исследование The present study

родное золото. Они ассоциированы с гранитоидными массивами. В случае месторождения Тунанца его возраст не установлен, но предварительно оценивается как позднеюрско-раннемеловой в соответствии с возрастом вмещающих пород.

Выводы

Золоторудное месторождение Тунанца залегает в сложном теле фреатомагматических брекчий. Оно классифицируется как эпиптермальное в брекчиевой трубке, центрального типа и характеризуется минерализацией в виде обогащённых брекчий с сульфидной матрицей и концентрическими зигзагообразными жилами, расположенными в центральной зоне тела брекчиевой трубки. Другие месторождения данного типа характеризуются эоценовым или более молодым возрастом и связью с гранитными интрузиями и медно-порфировыми месторождениями, поэтому не исключено, что Тунанца также с ними связана.

Классификация месторождений в брекчиевых трубках, предложенная в данном исследовании, дополняет известные классификации, предложенные Sillitoe и др. (2005) для сульфидных эпиптермальных и порфировых объектов, а также классификацию брекчий с этих месторождений, предложенную Corbett (2017).

Она может быть использована при прогнозно-поисковых работах на ранних стадиях, обеспечивая основу для выявления обогащённых зон и оценки потенциальных ресурсов месторождений.

Полученные результаты целесообразно использовать при поисках месторождений в качестве дополнения при классификации и характеристике эпиптермальных и порфировых месторождений.

Литература / References

- Blackwell J. L., Cooke D. R., McPhie J., Simpson K. A. Lithofacies Associations and Evolution of the Volcanic Host Succession to the Minifie Ore Zone: Ladolam Gold Deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. *Economic Geology*. 2014. V. 109 (4). P. 1137–1160. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.4.1137>
- Chouinard A., Williams-Jones A. E., Leonardson R. W., Hodgson C. J., Silva P., Téllez C., Vega J., Rojas F. Geology and Genesis of the Multistage High-Sulfidation Epithermal Pascua Au-Ag-Cu Deposit, Chile and Argentina. *Economic Geology*. 2005; 100 (3). P. 463–490. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.3.463>
- Corbett G. Epithermal Au-Ag and porphyry Cu-Au exploration — short course manual. Sept 2017. Online version. URL: www.corbettgeology.com



- Drobe J., Lindsay D., Stein H., Gabites J. Geology, Mineralization, and Geochronological Constraints of the Mirador Cu-Au Porphyry District, Southeast Ecuador. *Economic Geology*. 2013. V. 108. P. 11–35. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.108.1.11>
- Figuerola A. J., Gabo-Ratio J. A., Manalo P. C. Takahashi R., Sato H., Ramos A.B. Breccia and vein mineralization of the Balatoc Diatreme, Acupan gold deposit, Baguio Mineral District: An example of a diatreme-hosted epithermal deposit in the Philippines. *Ore Geology Reviews*, 2022, Volume 144, 104826. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104826>
- Gammons C., Korzeb S., Hargrave P. Metallic ore deposit of Montana. MBMG Special Publication 122: Geology of Montana. 2020. Vol. 2: Special Topics. DOI: <https://doi.org/10.59691/LTWO3427>
- INEMIN. Gobierno del Ecuador. Geological and metal occurrence maps of the southern cordillera Real and El Oro metamorphic belts. Escala 1:500 000. Instituto Ecuatoriano de Minería - INEMIN. Producción Cartográfica, British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK. Ecuador. 1994.
- INIGEMM. Hoja geológica Zamora. Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico del Ecuador. Proyecto de investigación geológica y disponibilidad de ocurrencias de recursos minerales en el territorio ecuatoriano. República del Ecuador. Hoja 77, escala 1:100000. 2017.
- Kadel-Harder I.M., Spry P.G., Dan Layton-Matthews, Voinot A., Von der Handt A., McCombs A.L. Paragenetic relationships between low- and high-grade gold mineralization in the Cripple Creek Au-Te deposit, Colorado: Trace element studies of pyrite. *Ore Geology Reviews*. 2020. Volume 127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103847>
- Leary S., Sillitoe R., Stewart P., Roa K., Nicolson B. Discovery, Geology, and Origin of the Fruta del Norte Epithermal Gold-Silver Deposit, Southeastern Ecuador. *Economic Geology*. 2016. V. 111. No. 5. P. 1043–1072. DOI: <https://doi.org/10.2113/econgeo.111.5.1043>
- Müller D., Kaminski K., Uhlig S., Graupner T., Herzig P., Hunt S. The transition from porphyry- to epithermal-style gold mineralization at Ladolam, Lihir Island, Papua New Guinea: a reconnaissance study. *Mineralium Deposita*. 2002. V. 37. P. 61–74. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-001-0230-y>
- Müller D., Pettke T., Heinrich C.A. Characteristic features of alkaline rocks hosting the Ladolam gold deposit, Lihir Island, Papua New Guinea. Conference: Mineral Exploration and Sustainable Development; Millpress, Rotterdam, Athens, Greece, 2003.
- Séguret S. A., Celhay F. Geometric modeling of a Breccia pipe - comparing five approaches. *Apcom - Application of Computers and Operations research in the Mineral Industry*, 2013, 1. P. 257–266. URL: <https://minesparis-psl.hal.science/hal-00906751v1>
- Sillitoe R., Hedenquist J. W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. Special Publication: Volcanic, Geothermal, and Ore-Forming Fluids: Rulers and Witnesses of Processes within the Earth, Stuart F. Simmons, Ian Graham. 2005. Volume 10. DOI: <https://doi.org/10.5382/SP.10.16>
- Sillitoe R. H., Graubeger G. L., Elliott J. E. A diatreme-hosted gold deposit at Montana Tunnels, Montana. *Economic Geology*. 1985. V. 80 (6). P. 1707–1721. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.80.6.1707>
- Skewes M. A., Holmgren C., Stern C.R. The Donoso copper-rich, tourmaline-bearing breccia pipe in central Chile: petrologic, fluid inclusion and stable isotope evidence for an origin from magmatic fluids. *Miner Deposita*. 2003, V. 38. P. 2–21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00126-002-0264-9>
- Tian Y., Sun J., Ye H., Mao J., Wang X., Bi M., Xia X. Genesis of the Dianfang breccia-hosted gold deposit, western Henan Province, China: Constraints from geology, geochronology and geochemistry. *Ore Geology Reviews*, 2017, Volume 91, P. 963–980. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.08.011>

Поступила в редакцию / Received 30.10.2025



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 528.87

DOI: 10.19110/geov.2025.11.3

Возможности литологического картирования на территории северного окончания восточного склона Полярного Урала с использованием данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2

Ю. Н. Иванова^{1,2}¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия² Российский университет дружбы народов, Москва, Россия*jnivanova@yandex.ru*

Для Щучинской зоны Полярного Урала впервые выполнено литологическое картирование методом космодешифрирования на основании цифровых данных прибора дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2.

Целью исследования является оценка возможностей и эффективности использования данных космического аппарата Harmonized Landsat Sentinel-2 с применением современных методов обработки изображений для литологического картирования на территории северо-восточного склона Полярного Урала (Щучинская зона с Au-Fe-месторождением Юньягинское).

Построена литологическая карта территории исследования, демонстрирующая хорошую корреляцию с существующей геологической картой региона. В частности, метаморфизованные породы уверенно идентифицируются по цветовой гамме от темно-синего до фиолетового, ультраосновные — по красному, а сочетание зеленого и синего цвета указывает на области распространения осадочных и метаморфических пород.

Результаты исследования подтверждают результативность выбранного подхода и демонстрируют значительный потенциал использования космических снимков для геологического картирования территорий с высокогорным рельефом и небольшим покровом четвертичных отложений (до 6 м). Для дальнейшего повышения точности и расширения области применения методики рекомендуется интеграция с другими методами обработки космических изображений, позволяющими эффективно выделять литологические единицы в условиях мощного слоя четвертичных отложений, а также верификация полученных результатов посредством полевых работ.

Ключевые слова: космические снимки, Полярный Урал, Harmonized Landsat Sentinel-2, литологическое картирование, минимальная доля шума, цветовой композит

Potential for lithological mapping at the northern end of the eastern slope of the Polar Urals using data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing satellite

J. N. Ivanova^{1,2}¹ Institute of Ore Deposit Geology, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry RAS, Moscow, Russia² Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia

For the first time, lithological mapping has been carried out for the Shchuchinsky zone of the Polar Urals using the space decoding method on the basis of digital data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing instrument. The objective of this study is to evaluate the feasibility and effectiveness of Harmonized Landsat Sentinel-2 satellite data with modern image processing methods for lithological mapping of the northeastern slope of the Polar Urals (the Shchuchinsk zone hosting the Yunyaginskoye Au-Fe deposit).

We have created a lithological map of the study area showing a strong correlation with the existing geological map of the region. Specifically, metamorphosed rocks are reliably identified by dark blue to violet hues, ultramafic rocks by red, and a combination of green and blue indicates areas of sedimentary and metamorphic rocks.

Для цитирования: Иванова Ю. Н. Возможности литологического картирования на территории северного окончания восточного склона Полярного Урала с использованием данных космического аппарата дистанционного зондирования Земли Harmonized Landsat Sentinel-2 // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 26–32. DOI: 10.19110/geov.2025.11.3

For citation: Ivanova J. N. Potential for lithological mapping at the northern end of the eastern slope of the Polar Urals using data from the Harmonized Landsat Sentinel-2 remote sensing satellite. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 26–32, doi: 10.19110/geov.2025.11.3



The study results confirm the effectiveness of the chosen approach and demonstrate a significant potential of using this satellite imagery for geological mapping in high-mountain terrain with a thin cover of Quaternary sediments (up to 6 m). To further improve the accuracy and expand the method applicability, integration with other satellite image processing techniques that effectively identify lithological units under thicker Quaternary cover is recommended together with fieldwork verification.

Keywords: *satellite imagery, the Polar Urals, Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS), lithological mapping, minimal noise, color composite*

Введение

Литологическое картирование с применением современных космических снимков (КС) аппаратов дистанционного зондирования Земли, особенно в таком труднодоступном регионе, как Полярный Урал, открывает новые горизонты для изучения его геологического строения. Благодаря высокой разрешающей способности и широкому спектральному диапазону космических данных возможно детальное выделение и идентификация различных типов горных пород. Это позволяет значительно повысить точность геологических карт и прогнозировать распределение полезных ископаемых, что критически важно для устойчивого развития горнодобывающей промышленности в Арктике.

В этой работе использованы спутниковые данные космического аппарата (КА) Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS-2) с пространственным разрешением 30 м. Данные HLS-2 доступны бесплатно на сайте www.search.earthdata.nasa.gov. Более подробную информацию о характеристиках данного КА можно найти в работе (Maseki et al., 2018).

Целью данного исследования является оценка возможностей и эффективности использования данных КА HLS-2 с применением современных методов обработки изображений для литологического картирования на территории северо-восточного склона Полярного Урала (Щучьинская зона с Au-Fe-месторождением Юньягинское).

Результаты данного исследования могут быть использованы для обновления и уточнения существующих геологических карт, планирования геолого-разведочных работ в труднодоступных районах и адаптации решения задач геологического картирования на других северных территориях.

Геологическое строение Щучьинской зоны

Щучьинская зона (ЩЗ) расположена на крайнем севере Уральской складчатой области, в ее восточной, крайне пологой части. Ключевым элементом этой структуры является Главный Уральский разлом, иначе именуемый Главной Уральской сутурой; на большей части он проявлен в виде надвига, здесь он в основном погребен под чехлом рыхлых отложений (МЗ-КЗ) (рис. 1).

В структуре рассматриваемого региона четко выделяются несколько секторов. Здесь фундамент сложен палеозойскими складчатыми структурами, образованными породами ордовикского, силурийского, девонского и каменноугольного периодов. Этот фундамент перекрыт платформенными мезозойскими отложениями, относящимися к юрскому и триасовому периодам (Душин, 2020). Среди магматических по-

род преобладают габброиды, в то время как гранитоиды встречаются гораздо реже и формируют небольшие штокообразные массивы.

Различные свиты и комплексы пород содержат разнообразную рудную минерализацию. Наиболее значимой является рудная нагрузка гипабиссальных-абиссальных метагаббро-долеритового васьюкского и габбро-норитового харампэйско-масловского комплексов; они несут Fe-Ti-V-ортомагматическое и Fe- ($\pm$ Cu, Au)-скарновое оруденение. Магнетитовая эпискарновая минерализация ($\pm$ Cu) развита также во вмещающих эти плутоны породах янганапэйской толщи, представленной чередованием основных-средних вулканитов и терригенно-карбонатных пород. Метатерригенные (отчасти углеродистые и карбонатные) породы малопайпудинской и хантейской свит несут стратоидные скопления $\text{Cu}\pm\text{Au}$ - и полиметаллической минерализации.

Плутонические образования харбей-собского комплекса содержат Mo-, Pb-Zn-, Cu-кварцевые и Fe-скарновые рудопроявления. Кислые интрузивы сядатяхинского и евьюганского комплексов, а также их приконтактные зоны включают Au-, Mo- и Cu-рудопроявления. Метатерригенные ($\pm$ известняки) породы хойдышорской и усинской свит несут стратоидную $\text{Cu}\pm\text{Au}$ -минерализацию; в метатерригенных (отчасти углеродистых и карбонатных) породах орангской свиты, переслаивающихся с редкими потоками базальтов, выявлена Pb-Zn-минерализация.

В ультрабазитах сыгум-кеуского комплекса, а также дайкоподобных телах хартманюшорского комплекса отмечены крупные скопления хромитов. Метаморфогенные Ti-рудопроявления выявлены в метаморфизованных в высокотемпературных условиях образования ($\approx$ эклогиты) слюдяногорского комплекса.

Главным потенциально промышленным рудным объектом является Fe-скарновое ($\pm$ Cu, Au) Юньягинское месторождение; через его рудное поле проходит железнодорожная линия Обская – Бованенково. Оно пространственно и генетически связано со 2-й фазой юньягинского многофазного (габбро + гранодиориты + граниты) комплекса; с ней же ассоциируют мелкие скарно-магнетитовые рудопроявления. Здесь в одном и том же рудном районе соседствуют рудные залежи Fe($\pm$ Cu, Au)-скарновых руд, базитовых Ti-Fe-руд волковского типа, ультрабазит-базитовых Fe-Ti-V-руд качанарского типа. Все эти проявления нуждаются в более детальном геологическом исследовании и оценке их экономического потенциала (Зылева и др., 2014; Andreichev et al., 2017).

Геологическое строение и металлогения Щучьинской зоны, хотя и детально описаны в отдельных монографиях, статьях (Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014; Душин, 2020; Пучков, Иванов, 2020) и ряде производственных отчетов, требуют доизучения.

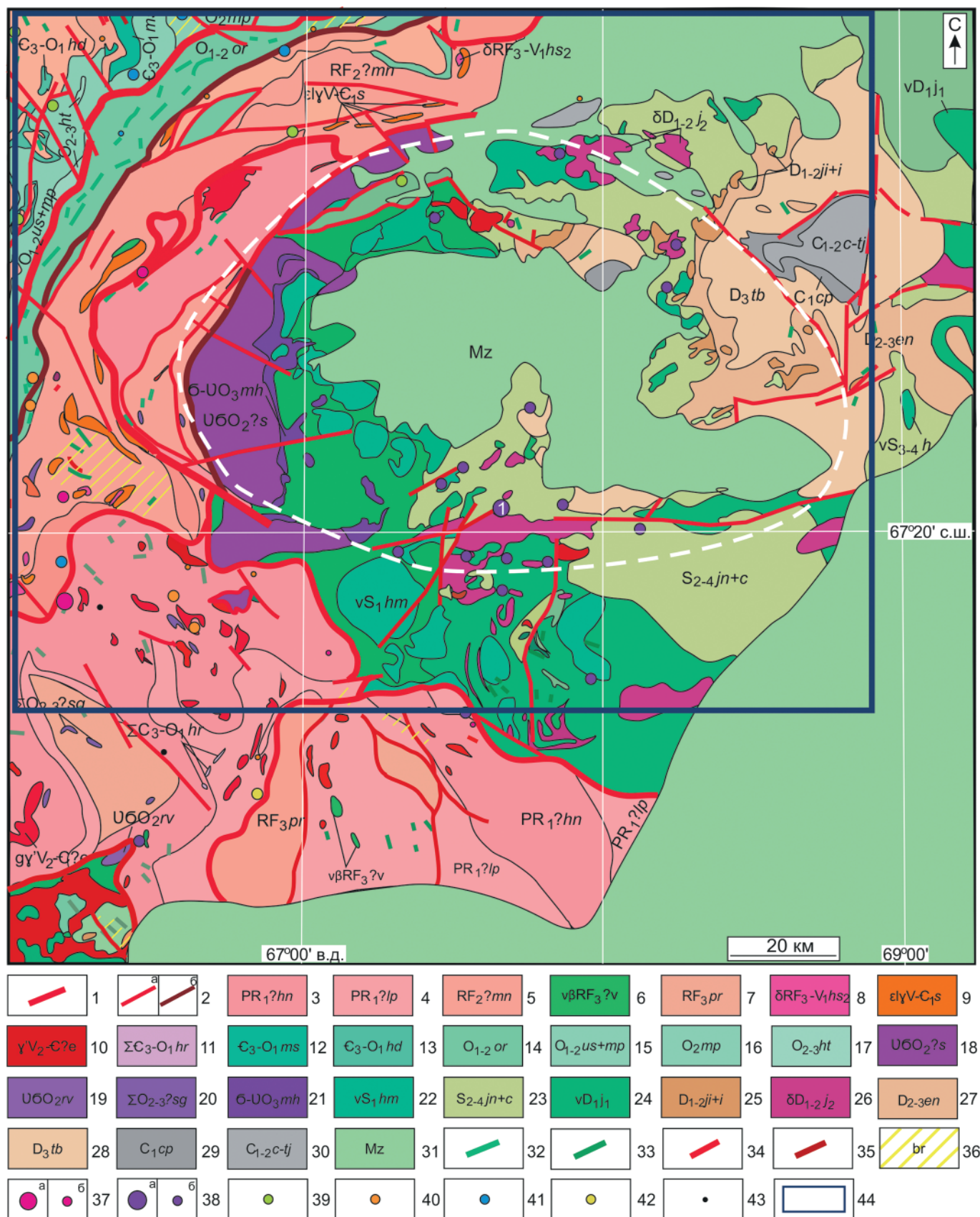


Рис. 1. Схема геологического строения Щучинской зоны по данным госгеолкарты масштаба 1:1000000 (Зылева и др., 2014):

1–2 — разломы: 1 — шарьяж, 2 — надвиг и взбросонадвиг (а), в т. ч. с предполагаемым рудоконтролем (б), 3–31 — свиты, толщи и комплексы: 3 — ханмейхойская свита: альбитовые амфиболиты с гранатами, реже амфибол-сланцевые и слюдяные гнейсы, линзы мраморов, железистые кварциты и гондиты; 4 — лаптаюганская свита с амфибол-биотитовыми и амфиболовыми прогнейсами, амфиболитами; 5 — метабазальтовая и метатерригенная минисейшорская свита; 6 — метабазальто-долеритовый васькеуский комплекс, несущий Fe-Ti-V-минерализацию; 7 — париквасьшорская свита с гранат-слюдисто-альбит-кварцевыми кристаллосланцами и сланцами, слюдяными плагиогнейсами, в низах — амфиболиты, амфиболитовые гнейсы, кварциты и гондиты, в верхах — высокоглиноземистые кристаллосланцы; 8 — вторая фаза габ-



бродиорит-гранодиоритового харбей-собского комплекса, несет скарново-магнетитовую, Cu-Mo-, Pb-Zn-минерализацию, 9 — гранодиоритовый сыдатыахинский комплекс, несущий Mo±Au-оруденение, 10 — метагранитовый евъяганский комплекс с метагранитами, метааласкитами, реже метаплагиогранитами, штоками гнейсогранитов и пластовыми телами гнейсогранитов с As-, Au-, Mo- и Cu-минерализацией; 11 — ультрамафитовый хартманюшорский комплекс, в него входят малые тела и дайки серпентинитов с Cr-минерализацией; 12 — метатерригенная минисейская свита; 13 — метатерригенная хойдышорская свита, несущая стратоидную Cu±Au-минерализацию; 14 — метатерригенная (отчасти углеродистая и карбонатная) с подчиненными базальтами орангская свита, несущая Pb-Zn-минерализацию; 15 — метатерригенные (± известняки) усинская и малопайпудынская свиты, несущие Cu±Au-минерализацию; 16 — метатерригенная (± известняки) малопайпудынская свита; 17 — метатерригенная (отчасти углеродистая и карбонатная) хантейская свита (в 16 и 17 — стратоидные скопления Pb-Zn-сульфидов); 18 — дунит-лерцолит-гарцбургитовый сыум-кеуский комплекс с промышленными скоплениями хромитов; 19 — дунит-лерцолит-гарцбургитовый райизско-войкарский комплекс; 20 — метаультрамафиты (отчасти эклогитоподобные) слюдяногорского комплекса, несут метаморфогенную Ti-минерализацию; 21 — дунит-верлит-клинопироксенитовый малохадатинский комплекс; 22 — метагаббровый малькский комплекс; 23 — габброноритовый харампэйско-масловский комплекс, несет Fe-Ti-V- и Cu-Fe-скарновое оруденение; 24 — первая фаза габбро-гранодиорит-гранитного юньягинского комплекса, в габбро — Fe-Ti-V-оруденение, 25 — объединенные янганапэйская и карбонатная толщи с базальтами, андезибазальтами, дацитами, плагиориолитами и их туфами, прослоями терригенных и карбонатных пород, несут Fe-скарновую и Cu-минерализацию, местами — горизонты бокситов; 26 — вторая фаза габбро-гранодиорит-гранитового юньягинского комплекса с Cu-Fe-скарновым оруденением, 27 — терригенная (± известняки) энзорская толща; 28 — терригенная (± трахибазальты, пепловые туфиты) тальбейская толща; 29 — карбонатно-терригенная толща; 30 — терригенно-карбонатная, терригенная толща; 31 — терригенные породы MZ (± бурые угли); 32–35 — немасштабные тела даек основного (32, 33) и кислого (34, 35) состава с Mo-, Au-, As-, Cu-минерализацией; 36 — зона березитизации; 37–43 — месторождения (а), рудопроявления и пункты минерализации (б): 37 — Mo, 38 — Fe, 39 — Au, Au-Fe, 40 — Cu, 41 — Pb-Zn, 42 — As-Mo-Au, 43 — Ti; 44 — границы изучаемой территории. Цифрой 1 обозначено Юньягинское месторождение, белой пунктирной линией — границы Щучинского палеовулкана

Fig. 1. Geological map of the Shchuchinskaya zone after the State Geological Map at a scale of 1:1000000 (Zyleva et al., 2014):

1–2 — faults: 1 — nappe, 2 — thrust and reverse-thrust fault (a), including those with supposed ore control (b); 3–31 — suites, strata and complexes: 3 — Khanmeikhoy suite: albite amphibolites with garnets, less common amphibole-mica and mica gneisses, marble lenses, ferruginous quartzites and gondites; 4 — Laptayugan suite: amphibole-biotite and amphibole gneisses, amphibolites; 5 — Miniseishor suite: metabasalt and metaterrigenous rocks; 6 — Vaskeu metagabbro-dolerite complex, bearing Fe-Ti-V mineralization; 7 — Parikvashor suite: garnet-mica-albite-quartz crystalline schists and schists, mica plagiogneisses; in the lower parts — amphibolites, amphibolite gneisses, quartzites and gondites; in the upper parts — high-alumina crystalline schists; 8 — the second phase of the Harbey-Sob gabbro-diorite-granodiorite complex, hosting skarn-magnetite, Cu-Mo, and Pb-Zn mineralization; 9 — Syadatyakh granodiorite complex, hosting Mo±Au mineralization; 10 — Ev'yugan metagranite complex with metagranites, meta-alaskites, less often meta-plagiogranites, gneissogranite stocks and sheeted bodies of gneissogranites with As, Au, Mo, and Cu mineralization; 11 — ultramafic Khartmanyushor complex, including small bodies and dikes of serpentinites with Cr mineralization; 12 — metaterrigenous Minisei suite; 13 — metaterrigenous Khoydyshor suite, bearing stratoid Cu±Au mineralization; 14 — metaterrigenous (partly carbonaceous and carbonate) orangsky suite with subordinate basalts, bearing Pb-Zn mineralization; 15 — metaterrigenous (±limestones) Usinsk and Malopaipudyn suites, bearing Cu±Au mineralization; 16 — metaterrigenous (±limestones) Malopaipudyn suite; 17 — metaterrigenous (partly carbonaceous and carbonate) Khantey suite (in suites 16 and 17 — stratoid accumulations of Pb-Zn sulfides); 18 — dunite-lherzolite-harzburgerite Syum-Keu complex with industrial accumulations of chromites; 19 — dunite-lherzolite-harzburgerite Raizko-Voikar complex; 20 — metaulttramafites (partly eclogite-like) of the Slyudyangora complex, carrying metamorphogenic Ti mineralization; 21 — dunite-wehrlite-clinopyroxenite Malokhadata complex; 22 — metagabbro Malyk complex; 23 — gabbronorite Kharampei-Maslov complex, containing Fe-Ti-V and Cu-Fe-skarne mineralization; 24 — first phase of the gabbro-granodiorite-granite Yunyakha complex, with Fe-Ti-V mineralization in gabbro; 25 — combined Yanganapey and carbonate strata with basalts, andesibasalts, dacites, plagioryholites and their tuffs, interlayers of terrigenous and carbonate rocks, bearing Fe-skarne and Cu mineralization, and in places - horizons of bauxites; 26 — second phase of the gabbro-granodiorite-granite Yunyakha complex with Cu-Fe-skarne mineralization; 27 — terrigenous (±limestones) Enzor strata; 28 — terrigenous (±trachybasalts, ash tuffites) Talbey strata; 29 — carbonate-terrigenous strata; 30 — terrigenous-carbonate, terrigenous strata; 31 — terrigenous MZ rocks (±brown coals); 32–35 — off-scale bodies of dikes of basic (32, 33) and acidic (34, 35) composition with Mo, Au, As, Cu mineralization; 36 — beresitization zone; 37–43 — deposits (a), ore occurrences and mineralization points (b): 37 — Mo, 38 — Fe, 39 — Au, Au-Fe, 40 — Cu, 41 — Pb-Zn, 42 — As-Mo-Au, 43 — Ti; 44 — boundaries of the studied territory. The number 1 indicates the Yunyaga deposit, the white dotted line indicates the boundaries of the Shchuchin paleovolcano

Исходные данные и подходы

Выбраны дневные и безоблачные снимки аппарата HLS-2 для территории изучения:

- HLS.S30.T41WPQ.202212T071619;
- HLS.S30.T42WVV.202212T071619;
- HLS.S30.T41WPR.202212T071619;
- HLS.S30.T42WVA.202212T071619.

Изображения можно получить с сайта <https://search.earthdata.nasa.gov>.

Версия HLS-2 включает предобработку KC.

Алгоритм методики, принятый в данном исследовании, состоит из следующих этапов:

- применение преобразования минимальной доли шума (Minimum Noise Fraction — MNF) и подготовка цветового композита MNF, наиболее подходящего для выделения литологических изменений для KC;
- литологическое картирование в среде ГИС путем визуальной интерпретации цветового композита, подготовленного на основе комбинаций индексов минералов и каналов MNF и экранной оцифровки;

- верификация полученной литологической карты путем сравнения с имеющимися геологическими данными и полевыми исследованиями;

- оценка и анализ точности и надежности полученной литологической карты;

- определение перспектив использования космической съемки для геологического картирования в аналогичных регионах.

Преобразование MNF и подготовка цветового композита выполнены в программе ENVI. Систематизация и обобщение данных — в QGIS.

Методы исследования

1. Преобразование минимальной доли шума (MNF). Это метод обработки мультиспектральных и гиперспектральных изображений, который упорядочивает компоненты в порядке убывания отношения «сигнал/шум» (SNR). Цель — выделить информативные признаки и уменьшить шум в данных. Метод предложен в 1988 году Грином, Берманом, Свитцером и Крейгом (Green et al., 1988). Первый этап MNF заключается в использовании ковариационной матрицы шума для декорреляции и нормализации шумовых компонент. Данные, характеризующиеся единичной дисперсией и отсутствием корреляции между каналами, идентифицируются как шум и отделяются от исходного набора данных. Этот процесс позволяет минимизировать влияние шума на последующие этапы обработки. На втором этапе к данным, очищенным от шума, применяется стандартная PCA-трансформация. Целью этой трансформации является переупорядочение среднеквадратических отклонений шумовых компонент. Полученные MNF-изображения, как и изображения главных компонент, упорядочиваются в соответствии с максимальной изменчивостью данных.

2. Цветовой композит. По данным (Lakshmi, Kusuma, 2018), с целью литологического картирования разрабатан и использован цветовой композит в ложных цветах MNF (RGB: 5-2-3) для спектральных каналов КА Landsat-8. Для КА HLS-2 цветовой композит будет RGB: 8a-2-3 (по: Masek et al., 2018; Sekandari et al., 2020).

Результаты и обсуждение

В работах (Иванова и др., 2019; Иванова, Выхристенко, 2021) для ШЗ выделена крупная кольцевая морфоструктура овальной формы 1-го порядка (размером 97 на 76 км) — Щучинский палеовулкан. Описано ее геологическое строение, на основе дистанционных данных (Landsat 8) и высокоточной цифровой модели рельефа (ASTER GDEM) выполнен анализ линеаментной сети и подготовлена карта дешифрованных морфоструктур, в том числе рудоперспективных.

На исследуемой территории, по данным (Зылева и др., 2014), выделяются зоны развития березитоподобных метасоматитов, с которыми генетически связаны проявления молибденовой, золоторудной, железозолоторудной и полиметаллической минерализации. Однако обнаружение этих зон с использованием методов дистанционного зондирования затруднено. Причиной тому является значительная мощность четвертичных отложений, достигающая 450 м. На отдельных локальных участках, где мощность четвертичных

отложений сокращается до 6 м (Викентьев и др., 2021), наблюдается совпадение их литологии с данными дешифрирования снимков.

Таким образом, для повышения эффективности поисковых работ и картирования потенциально рудоносных зон необходимо учитывать влияние четвертичного чехла. Одним из направлений может быть применение геофизических методов, позволяющих проникать на большую глубину и получать информацию о строении коренных пород. Кроме того, перспективным является анализ данных дистанционного зондирования в комплексе с геохимическими данными, полученными при опробовании четвертичных отложений, с целью выявления индикаторных элементов, связанных с коренной минерализацией. Цветовой композит, полученный с помощью КА HLS-2 MNF (RGB: 8a-2-3), оказался эффективным для распознавания некоторых литологических единиц в исследуемой области (рис. 2, а).

Красный цвет соответствует магматическим ультраосновным (УО) породам: дунит-гарцбургитовому сыум-кеускому и дунит-верлит-клинопироксенитовому малохадатинскому комплексам (рис. 2, б). Цвета от темно-синего до фиолетового соответствуют метаморфическим породам, образовавшимся при региональном и контактовом метаморфизме умеренной и высокой ступеней: ханмейхойской, лаптаюганской, париквасьшорской свитам и малыкскому комплексу.

Схожий состав метаморфических пород и сложное геологическое строение создают трудности для разделения ханмейхойской, лаптаюганской и париквасьшорской свит, а также выделения пород евъюганского комплекса. Например, гнейсы, представленные зеленым цветом, не демонстрируют изменений оттенков, что может объясняться примерно одинаковым содержанием в них SiO_2 (Lakshmi, Kusuma, 2018). В гнейсах париквасьшорской свиты концентрации SiO_2 составляют около 76 % (Шишкин и др., 2008), тогда как в аналогичных породах ханмейхойской свиты — 62–70 % (Уляшева, 2013).

Сочетание зеленого и синего цвета соответствует осадочным и метаморфическим породам орангской свиты, локализованным в СЗ-части территории. Породы восточной, СВ, ЮВ и южной частей изучаемой площади плохо выделяются на полученной литологической карте, вероятно, из-за мощных плиоцен-четвертичных отложений. Они распространены почти повсеместно и представлены комплексом морских, ледниково-морских, аллювиально-морских и континентальных образований. Их мощность зависит от рельефа коренных пород и отметок дневной поверхности, изменяясь в значительных пределах, достигая 450 м и более (Шишкин и др., 2008; Зылева и др., 2014). В целом расшифровка внутреннего строения ШЗ затруднено большой мощностью перекрывающих мезозойских отложений (до 500 м), представленных разнообразными осадочными породами.

Заключение

Исследование позволило построить литологическую карту северного окончания восточного склона Полярного Урала, используя полученные с КА HLS-2 данные, а также современные методы обработки изо-

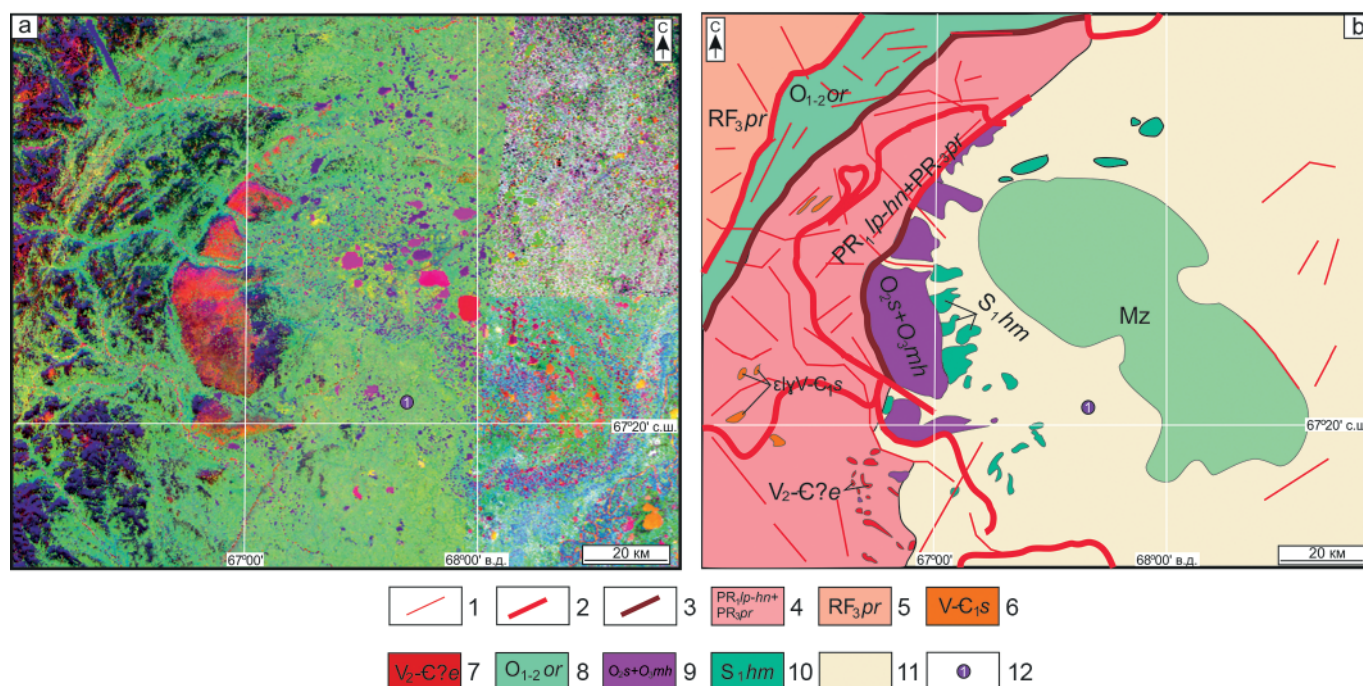


Рис. 2. Цветной композитный снимок MNF в ложных цветах (RGB: MNF 8a-3-2), полученный с помощью КС КА HLS-2 для исследуемой территории (а). Литологическая карта изучаемой территории (б), полученная путем визуальной интерпретации цветового композита MNF (RGB: MNF 8a-3-2) и экранной оцифровки:

1 — разрывные нарушения, выделенные с помощью КС КА HLS-2; 2, 3 — надвиг и взброснадвиг (2), в т. ч. рудоконтролирующий (3); 4–10 — соответствуют рис. 1; 11 — нерасчлененные четвертичные отложения; 12 — месторождение Юньягинское

Fig. 2. False-color composite MNF image (RGB: MNF 8a-3-2) from the HLS-2 satellite for the study area (a). Lithological map of the study area (b) obtained by visual interpretation of the MNF color composite (RGB: MNF 8a-3-2) and on-screen digitization: 1 — faults identified by the HLS-2 satellite; 2–3 — thrust and reversed thrust (2), ore-controlling (3); 4–10 — corresponds to Fig. 1; 11 — undifferentiated Quaternary sediments. 12 — Yunyaga deposit

бражений. Результаты демонстрируют перспективность использования космической съемки для геологического картирования в областях с гористым рельефом и минимальным покровом четвертичных отложений (до 6 м).

Сопоставление полученной литологической карты с существующими геологическими данными выявило высокую степень соответствия. Метаморфизованные породы четко выделяются по характерной цветовой гамме, варьирующейся от темно-синего до фиолетового. Ультраосновные породы надежно идентифицируются по красному цвету, а сочетание зеленого и синего оттенков указывает на районы распространения осадочных и метаморфических пород.

Для повышения точности и расширения области применения разработанной методики целесообразно объединить ее с другими методами обработки космической информации. Это позволит более эффективно выделять литологические единицы даже в тех районах, где мощность четвертичных отложений значительна.

Кроме того, крайне важна обязательная верификация полученных результатов с использованием данных полевых работ. Это позволит не только подтвердить достоверность литологической карты, но и выявить возможные ограничения и внести необходимые коррективы в алгоритм обработки изображений.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ № 23-17-00266.

Литература / References

- Викентьев И. В., Иванова Ю. Н., Нафигин И. О., Бортников Н. С. Структурная позиция и типизация метасоматических зон, Полярный Урал: первый опыт современного космического зондирования Земли // Доклады Академии наук. 2021. Т. 500. №2. С. 115–122. DOI:10.31857/S2686739721100170
- Vikentyev I. V., Ivanova Yu. N., Nafigin I. O., Bortnikov N. S. Structural position and typification of metasomatic zones, Polar Urals: the first experience of modern space sensing of the Earth. Doklady Earth Sciences, 2021, V. 500, No. 2, pp. 115–122. (in Russian)
- Зылёва Л. И., Коновалов А. Л., Казак А. П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (3-е покол.). Сер. Зап.-Сибирская. Лист Q-42 — Салехард. Объяснит. зап. СПб.: Картограф. фабр. ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Zyleva L. I., Konovalov A. L., Kazak A. P. et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). West Siberian Series. Sheet Q-42 — Salekhard: Explanatory Note. St. Petersburg: VSEGEI, 2014, 396 p. (in Russian)
- Душин В. А. Геологическое строение и магматизм Шучинского мегаблока (Полярный Урал) // Известия УГТУ. 2020. Вып. 4(60). С. 35–56. DOI:10/21440/2307-2091-2020-4-35-56
- Dushin V. A. Geological structure and magmatism of the Shchuchinsky megablock (Polar Urals). Bulletin of the

- Ural State Mining University, 2020, 4(60), pp. 35–56. (in Russian)
- Иванова Ю. Н., Выхристенко Р. И. Структурный контроль золоторудной минерализации восточного склона Полярного Урала по результатам анализа мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исследование Земли из космоса. 2021. № 6. С. 60–73. DOI:10.31857/S0205961421050055
- Ivanova Yu. N., Vykhristenko R. I. Structural control of gold mineralization on the eastern slope of the Polar Urals based on the analysis of multispectral images from the Landsat 8 spacecraft. *Earth Exploration from Space*, 2021, No. 6, pp. 60–73. (in Russian)
- Иванова Ю. Н., Выхристенко Р. И., Викентьев И. В. Геологическая позиция и структурный контроль оруденения Топугул-Ханмейшорского района (Полярный Урал) по результатам дистанционного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 66–76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019366-79>
- Ivanova Yu. N., Vykhristenko R. I., Vikentyev I. V. Geological position and structural control of mineralization in the Toupugol-Khanmeishor region (Polar Urals) based on remote sensing results. *Exploration of the Earth from Space*, 2019, No. 3, pp. 66–76. (in Russian)
- Пучков В. Н., Иванов К. С. Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития // Геотектон. 2020. № 1. С. 41–61. DOI: 10.31857/S0016853X20010105
- Puchkov V. N., Ivanov K. S. Tectonics of the Northern Urals and Western Siberia: general history of development. *Geotekton*, 2020, No. 1, pp. 41–61. (in Russian)
- Ремизов Д. Н., Шишкин М. А., Григорьев С. И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000 (2-е изд., циф.). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XVI (г. Хордьюс). Объясн. зап. СПб.: Картограф. фабр. ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Remizov D. N., Shishkin M. A., Grigoriev S. I., et al. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200000 (2nd ed., digital). Polar-Ural Series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus Mountain). Explanatory Note. SPb: VSEGEI Cartographic Factory, 2014, 256 p. (in Russian)
- Уляшева Н. С. Состав и условия образования протолитов плагиогнейсов в Харбейском метаморфическом комплексе (Полярный Урал) // Вестник института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2013. С. 14–19.
- Ulyasheva N. S. Composition and Formation Conditions of Plagiogneiss Protoliths in the Kharbey Metamorphic Complex (the Polar Urals). *Vestnik of the Institute of Geology Komi SC UB RAS*, 2013, pp. 14–19. (in Russian)
- Шишкин В. А., Жигалов С. В., Грищенко Ш. Г. Государственная геологическая карта РФ. Масштаб 1:200 000 (новая серия). Лист P-55-XII. Объяснительная записка. СПб., 2008.
- Shishkin V. A., Zhigalov S. V., Grishchenko Sh. G. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000 (new series). Sheet P-55-XII. Explanatory Note. St. Petersburg: 2008. (in Russian)
- Andreichev V. L., Kulikova K. V., Larionov A. N., Sergeev S. A. Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // *Doklady Earth Sciences*. 2017. Vol. 477. No. 1. P. 1260–1264.
- Claverie M., Jub J., Masek J. G. et al. The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // *Remote Sensing of Environment*. V. 219. 2018. P. 145–161. DOI:10.1134/S1028334X17110095
- Green A. A., Berman M., Craig M. D. A Transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal // *IEEE Trans. Geosci.* 1988. 26(1). P. 65–74. DOI:10.1109/36.3001
- Lakshmi Ram Prasath H., Kusuma K. N. Lithological Mapping using Landsat 8 OLI and ASTER TIR Multispectral Data: A Comparative Study // *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*. 2018. V.7. Is. 1. P. 2728–2745. DOI:10.23953/cloud.ijarsg.369.
- Masek J. G., Claverie J., Ju. M. et al. Harmonized Landsat Sentinel-2 (HLS) Product User Guide. Product Version 2.0. 2018. 24 p.
- Sekandari M., Masoumi I., Beiranvand Pour A., M Muslim A. et al. Application of Landsat-8, Sentinel-2, ASTER and WorldView-3 spectral imagery for exploration of carbonate-hosted Pb-Zn deposits in the Central Iranian Terrane (CIT) // *Remote Sensing* 2020. 12. 1239. doi:10.3390/rs12081239

Поступила в редакцию / Received 31.10.2025



Применение малоглубинной сейсморазведки на объектах Среднего Тимана

В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова, Ю. Е. Езимова, А. В. Зелионко

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

udoratin@geo.komisc.ru

На территории Среднего Тимана, в пределах южной части Четласского поднятия, проведена малоглубинная сейсмическая разведка методом преломленных волн (МПВ) с целью определения возможности применения метода для поиска геологических тел типа «трубка взрыва». Объектами исследования являлись кимберлитовая трубка «Верхнемезенская», которая была эталоном, а также магнитные аномалии «Павьюгская» и «Каменская», имеющие изометричную форму, как объекты опробования. Предварительно осуществлялась магнитометрическая съемка по сети профилей с целью определения контура аномалий и локализации на местности для заложения сейсмического профиля. При проведении работ регистрация колебаний производилась с помощью 48-канальной линейной сейсмической станции SGD-SEL. Шаг между пунктами приема составлял 5 м, шаг между пунктами возбуждения — 10 м, общая длина расстановки — 235 м. При возбуждении сейсмических волн использовались удары кувалдой массой 10 кг, при обработке рассматривались преломленные волны.

В результате исследований на сейсмограммах по области потери корреляции, уменьшения интенсивности сейсмических волн, а также изменения формы первых вступлений хорошо выделяется зона, которая полностью соответствует местоположению Верхнемезенской трубки взрыва по геологическим данным.

Магнитная аномалия «Павьюга» в волновом поле характеризуется аномальной областью с повышенными значениями скоростей. Сейсмическая запись на магнитной аномалии «Каменская» представлена без аномальных зон и потери корреляции сейсмической записи.

Применение малоглубинной сейсморазведки МПВ показывает возможность использования метода для выделения границ геологических структур по неоднородностям среды. Глубинность метода определяется мощностью источника и длиной расстановки и в подавляющем большинстве наших исследований не превышает 30–50 м при расстановке в 235 м.

Ключевые слова: малоглубинная сейсморазведка, линейная сейсмическая станция, сейсмограммы, скоростной разрез, сейсмические волны, Средний Тиман

Shallow seismic survey in the Middle Timan

V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova, Yu. E. Ezimova, A. V. Zelionko

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

We conducted shallow seismic exploration in the Middle Timan region to study the depth and spatial distribution of geological bodies. The study focused on the «Verkhmenezenskaya» kimberlite pipe, and the «Pavyuga» and «Kamenskaya» magnetic anomalies, located within the southern part of the Chetlas uplift.

Analysis of the seismograms revealed distinct anomalies in the form of changes in first-arrival waveforms, loss of correlation, and reduced seismic wave intensity. These features clearly delineated the «Verkhmenezenskaya» pipe, and the «Pavyuga» magnetic anomaly zone.

The shallow seismic survey proved effective in mapping geological boundaries based on vertical heterogeneities. The investigation depth, determined by the energy of the seismic source and the spread length (235 m in this case), typically did not exceed 30–50 m., and in the vast majority of cases did not exceed 30–50 m with an alignment of 235 m.

The use of shallow seismic exploration (refraction method) supported this method to identify the boundaries of geological structures based on the heterogeneities of the environment.

Keywords: shallow seismic exploration, linear seismic station, seismograms, velocity section, seismic waves, Middle Timan

Введение

Под малоглубинной геофизикой понимают совокупность геофизических методов изучения строения верхней части разреза (ВЧР) на глубины до первых сотен метров. Основной (базовый) комплекс, как правило, включает магнито-, электро- и сейсморазведку, к вспомогательным методам относятся георадиолокация, микромагнитная и микрогравиметрическая съемки, методы радиометрии и ядерной геофизики (Манштейн, 2002; Боганик, Гурвич, 2006; Белоусов и др., 2014).

В настоящее время круг задач, стоящих перед малоглубинной геофизикой, достаточно широк: изучение геологии ВЧР, изыскания для строительства, проверка строения дорожной насыпи, картирование карьеров, обследование торфяных болот, зон вечной мерзлоты и растепления, сопровождение археологических работ, изучение геологического строения, поиск малоглубинных месторождений полезных ископаемых и т. д. (Манштейн, 2002; Боганик, Гурвич, 2006; Белоусов и др., 2014).

Для цитирования: Удоратин В. В., Магомедова А. Ш., Езимова Ю. Е., Зелионко А. В. Применение малоглубинной сейсморазведки на объектах Среднего Тимана // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 33–41. DOI: 10.19110/geov.2025.11.4

For citation: Udoratin V. V., Magomedova A. Sh., Ezimova Yu. E., Zelionko A. V. Shallow seismic survey in the Middle Timan. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 33–41, doi: 10.19110/geov.2025.11.4

В настоящей статье внимание будет уделено использованию малоглубинной сейсморазведки для возможности применения метода при поиске геологических тел типа «трубка взрыва». Наибольшее распространение среди сейсмических методов изучения ВЧР получил метод преломленных волн (МПВ), направленный на регистрацию преломленных и поверхностных волн.

При изучении более глубоких частей разреза и решении сложных структурно-геологических задач (расчленение геологического разреза) применяют метод отраженных волн (МОВ), разрешающая способность и точность структурных построений которого выше, чем при использовании МПВ. Сравнительно редкое применение МОВ связано с трудностями проведения полевых работ и способов обработки сейсмических данных, гарантирующих надежную регистрацию отраженных волн от неглубоко залегающих границ и их последующее выделение в процессе обработки (Манштейн, 2002; Боганик, Гурвич, 2006; Белоусов и др., 2014).

При изучении малых глубин длина волны импульса источника соизмерима с расстоянием до изучаемых геологических границ. Большинство процедур обработки отраженных волн (миграция, деконволюция и др.) действуют в предположении «дальней зоны», т. е. когда длина волны источника во много раз меньше глубины залегания целевых горизонтов. В малоглубинной сейсморазведке обычно используются низкочастотные источники сейсмических волн (кувалда, механические системы типа «падающего груза»), поэтому частоты отраженных волн для приповерхностной части разреза недостаточно велики для детального изучения слоев небольшой мощности и выделения локальных неоднородностей. В процессе обработки «неглубокие» (до 100 м) отражения часто теряют значительную часть своего высокочастотного спектра. Полевые сейсмограммы малоглубинного МОВ характеризуются низким соотношением «сигнал/помеха» из-за большого количества источников шума, а малая кратность суммирования является причиной невысокой вертикальной разрешенности итоговых временных разрезов. Часто значительная часть полезной сейсмической записи перекрыта высокоамплитудным цугом поверхностных волн, обладающих сильной дисперсией. Нередко выделение однократных отражений на их фоне невозможно из-за интерференции и близких характеристик полезных волн и волн-помех (Манштейн, 2002; Боганик, Гурвич, 2006; Белоусов и др., 2014).

Ввиду значительных ограничений применения МОВ на данный момент основным способом сейсмических исследований для верхней части разреза является метод преломленных волн. Это связано с относительной легкостью выделения этих типов волн, регистрируемых в первых вступлениях, оперативностью сбора данных, простотой обработки материалов и надежностью получаемых результатов (Манштейн, 2002; Боганик, Гурвич, 2006; Белоусов и др., 2014).

Особенностями малоглубинной сейсморазведки являются:

- малый шаг по пунктам возбуждения (ПВ) и пунктам приема (ПП) (от 2 до 10 метров);
- тип источника (маломощное вертикальное или горизонтальное возбуждение колебаний, как правило

невзрывное) и, как следствие, более низкий частотный состав записи;

- тип регистрируемых волн (продольные и поперечные);

- техногенные и геологические помехи, их характер и учет при проектировании методики работ;

- специфика строения ВЧР, связанная с геологией современных отложений (Манштейн, 2002; Боганик, Гурвич, 2006; Белоусов и др., 2014).

Цель наших исследований заключается в определении возможности применения метода для поиска геологических тел типа «трубка взрыва», залегающих близко к поверхности (первые десятки метров).

Аппаратура и методика исследований

При проведении работ регистрация колебаний производилась с помощью 48-канальной линейной сейсмической станции SGD-SEL (SGD-SEL — Sib Geo Device — Seismic Engineering Linear) (ООО НПК «СибГеофизПрибор»). Шаг между пунктами приема составлял 5 м, шаг между пунктами возбуждения — 10 м, общая длина расстановки — 235 м. Возбуждение сейсмических волн осуществлялось ударами кувалды массой 10 кг по специальной плашке.

Сейсмограммы записывались на жесткий диск станции в формате SEG-Y длиной 4000 мс при шаге дискретизации 1 мс.

Выделение полезного сейсмического сигнала на фоне помех выполнялось в режиме накопления воздействий. В сейсморазведке широко применяется синхронное накопление колебаний с целью ослабления нерегулярных волн-помех. Современная регистрирующая аппаратура позволяет проводить достаточно большое число накоплений, однако на практике оно редко превышает десять из-за быстрого снижения эффекта накапливания с ростом их числа и значительных затрат времени. Поэтому при небольшом уровне помех стремятся уменьшить число накоплений. Нами проводились опытные работы перед началом исследований, и количество накоплений составляло 4–6 в зависимости от уровня микросейсм.

Обработка материалов, полученных по методу преломленных волн, проводилась в программном пакете ZondST2D, предназначенном для двумерной обработки и интерпретации данных инженерной сейсморазведки.

На начальном этапе выполнялось суммирование сейсмограмм и введение поправок значений отметки момента вступления сейсмической волны, а также геометрии наблюдений. Затем анализировался частотный состав сигнала и соотношение «сигнал/помеха», при необходимости выполнялась полосовая фильтрация данных.

На следующем этапе осуществлялось выделение времени первых вступлений (пикирование) и построение годографов. Для контроля качества корреляции использовалось совместное представление взаимных трасс и годографов. В ходе обработки годографы сводились по взаимным временам. Критерием качества пикирования являлось среднее расхождение по взаимным временам для всей расстановки.

Заключительным этапом обработки полученных материалов являлось построение двумерного распре-

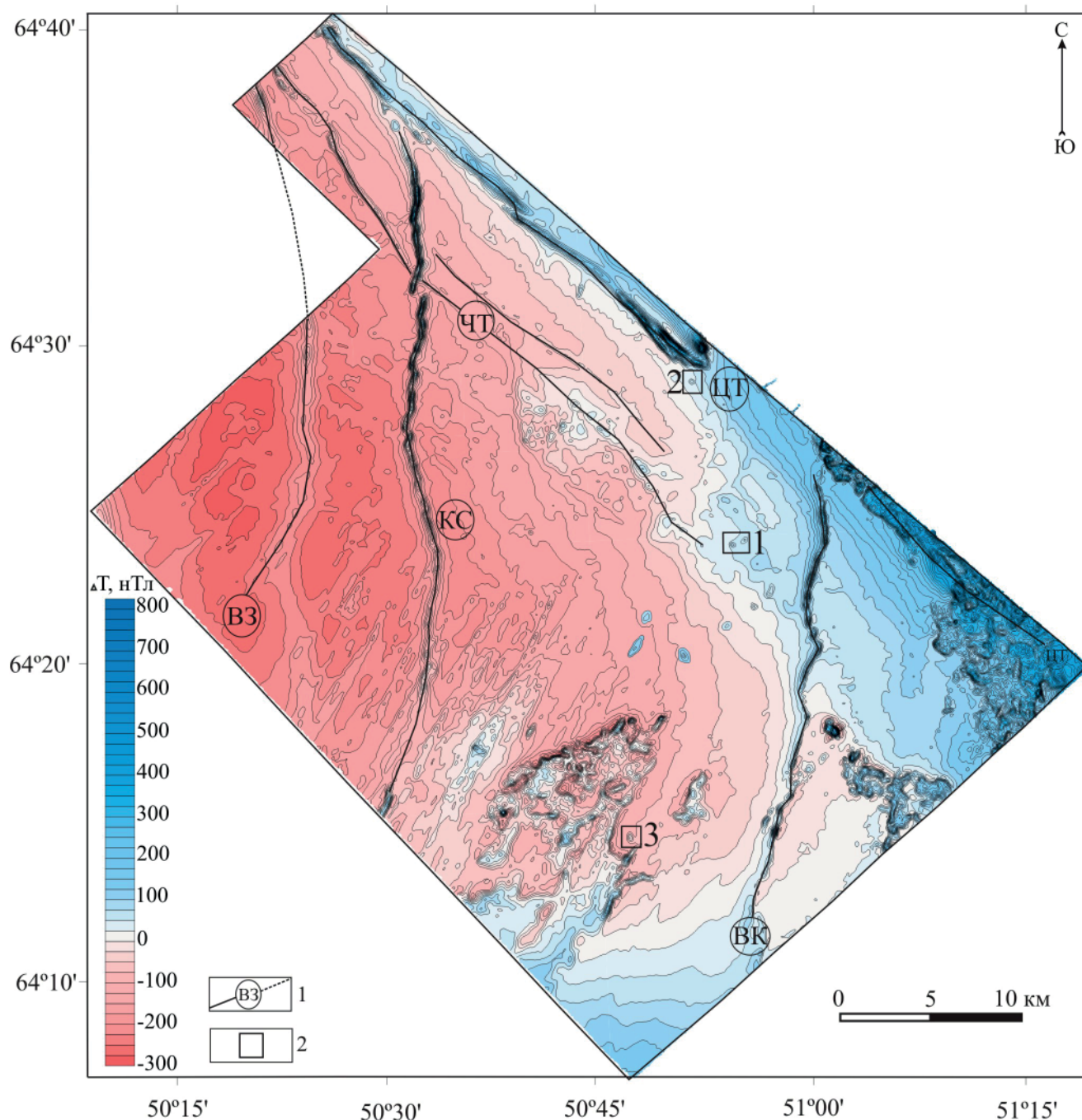


Рис. 1. Карта аномального магнитного поля Четласского поднятия масштаба 1:25 000 (Злоказов, Лаврова и др., 2001¹). 1 — разломы: ВЗ — Визингский, КС — Косьюский, ВК — Ворыквинский, ЧТ — Четласский, ЦТ — Центральнo-Тиманский; 2 — объекты исследования: 1 — Верхнемезенская трубка взрыва, 2 — магнитная аномалия «Павьюга», 3 — магнитная аномалия «Каменская»

Fig. 1. Map of the anomalous magnetic field of the Chetlas uplift on the scale of 1:25000 (Zlokazov, Lavrova et al., 2001¹). 1 — faults: B3 — Vizinga, KC — Kosyu, BK — Vorykva, ЧТ — Chetlass, ЦТ — Central Timan; 2 — objects of study: 1 — Verkhnemezenskaya explosion pipe, 2 — «Pavyuga» magnetic anomaly, 3 — «Kamenskaya» magnetic anomaly

¹ Злоказов А. А., Лаврова Т. Ю., Цыганов В. А. Отчет о проведении высокоточной комплексной аэрогеофизической съемки (аэромагнитометрия, аэроэлектроразведка в модификации дипольного индуктивного профилирования — ДИП-А, аэрогамма-спектрометрия) масштаба 1:10 000 для решения задач поисков марганца, бокситов, редких металлов, алмазов, золота в районе Четласского Камня на площади 1500 км². Листы Q-39-XXXIII, XXXIV, XXVII / ФГУ НПП «Аэрогеофизика». № 15198. М., 2001. 146 с.

Zlokazov A. A., Lavrova T. Yu., Tsyganov V. A. Report on the high-precision complex aerogeophysical survey (aeromagnetometry, aerelectronic exploration in the modification of dipole inductive profiling- DIP-A, aerogamma spectrometry) on a scale of 1:10000 to solve the problems of searching for manganese, bauxite, rare metals, diamonds, gold in the area of the Chetlas Stone on an area of 1500 km². Sheets Q-39-XXXIII, XXXIV, XXVII / Aerogeofizika. No. 15198. Moscow. 2001. 146 p.

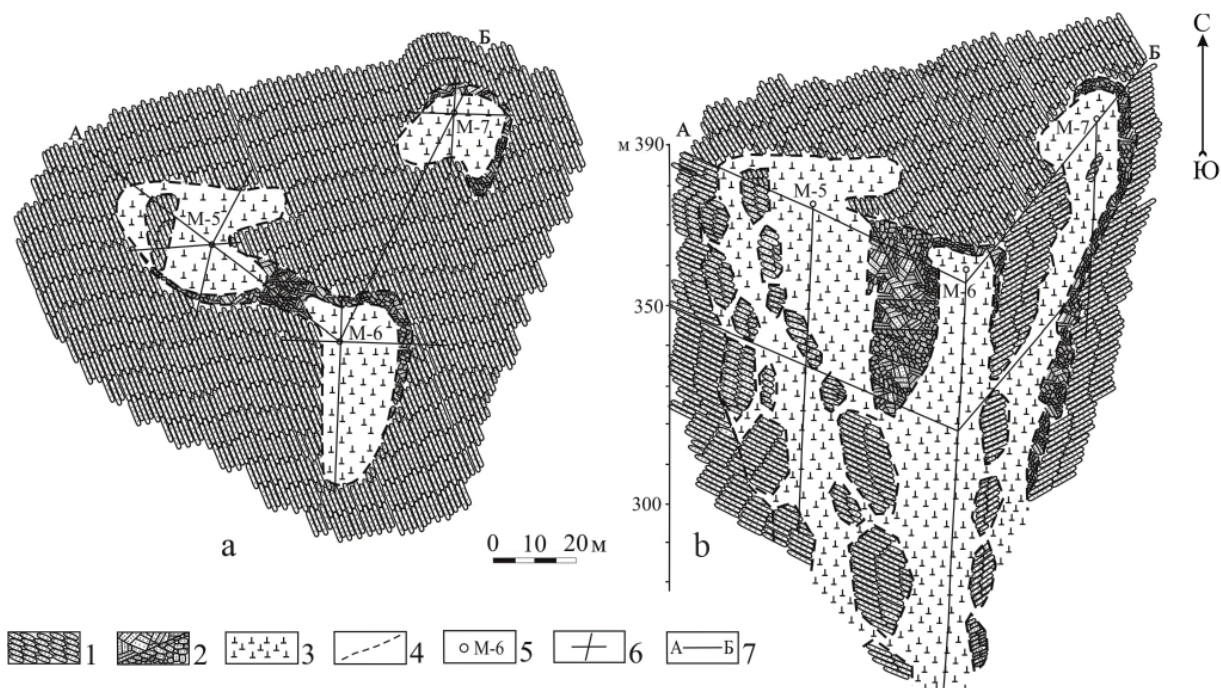


Рис. 2. Верхнемезенская кимберлитовая трубка: а — геологический план; б — блок-диаграмма с разрезом по линии А–Б (Айбабин и др., 1982²). 1 — светлинская свита, кварциты, реже сланцы, прослои и линзы гравелитов (направления штриховки на планах и разрезах соответствуют основным направлениям простираения и падения пород); 2 — зоны дробления, брекчии кварцитов, сланцев; 3 — позднебайкальская ультраосновная формация, пикритовые порфириды; 4 — геологическая граница; 5 — скважина и ее номер; 6 — канавы; 7 — линия геологического разреза

Fig. 2. Verkhne-Mezenskaya kimberlite pipe: a — schematic geological plan; b — schematic block diagram with a cut along line A–B (Aibabin et al., 1982²). 1 — Svetlinskaya suite, quartzites, less often shales, interlayers and lenses of gravelites (the directions of shading on the plans and sections correspond to the main directions of strike and dip of rocks); 2 — crushing zones, breccias of quartzites, shales; 3 — late Baikalian ultramafic formation, picrite porphyrites; 4 — geological boundary; 5 — well and its number; 6 — ditches; 7 — geological section line

деления скоростей полезных волн методом сейсмической томографии. Процесс получения скоростного изображения геологической среды включал в себя определение начальной модели и томографическую инверсию.

Объекты исследований

По материалам предшествующих исследований известно, что территория Среднего Тимана перспективна на нахождение тел трубчатого типа. В ее пределах в результате заверки магнитных аномалий найдены Верхнемезенская, Умбинская, Среднинская, Водораздельная кимберлитовые трубки.

Для проведения геофизических исследований нами были выбраны Верхнемезенская кимберлитовая трубка как эталон и две изометричные магнитные ано-

малии как объекты опробования. Объекты расположены в пределах Четласского поднятия Среднего Тимана на выделенных нами ранее перспективных участках (рис. 1).

Верхнемезенская кимберлитовая трубка была открыта наземными работами по заверке локальной калиевой и магнитной аномалий в верховьях р. Мезени (Ерема и др., 1973³). Располагается она в поле распространения терригенных образований светлинской свиты. Представляет собой изометричное трубообразное тело, выполненное эруптивной брекчией щелочно-ультраосновного состава, залегающее под маломощным (0.4–2.0 м) покровом рыхлых отложений. При проведении Э. Х. Ходжаевым в 1978 г. детальных наземных работ рядом с центром Верхнемезенской трубки было выявлено еще два центра. Полученные данные

² Айбабин Н. А., Дудар Л. П., Саблуков С. М., Довжикова Е. Г., Плякина И. Г. и др. Отчет о поисково-оценочных работах на алмазы на Умбинском и Мезенском участках (в трех томах) / Полярно-Уральское производственное геологоразведочное объединение «Полярноуралгеология». № 9885. Ухта. 1982. Том III. 48 с.

Aibabin N. A., Dudar L. P., Sablukov S. M., Dovzhikova E. G., Plyakina I. G. et al. Report on search-evaluation works for diamonds in Umba and Mezen areas (in three volumes) / Polar-Ural production geological prospecting association "Polyarnouralgeologiya". No. 9885. Ukhta. 1982. V III, 48 p.

³ Ерема Г. А., Карпова М. А., Трусевич Г. А. Отчет о результатах комплексной аэрогаммаспектрометрической съемки и наземных поисковых работ на территории Среднего Тимана в 1972 году / Министерство геологии; Ухтинское территориальное геологическое управление: отдел фондов. № 8279. Л., 1973. 158 с.

Erema G. A., Karpova M. A., Trusevich G. A. Report on the results of complex aerogamma-spectrometric survey and ground-based search operations on the territory of Middle Timan in 1972 / Ministry of Geology Ukhta Territorial Geological Department Funds Departmen. No. 8279. Leningrad. 1973. 158 p.

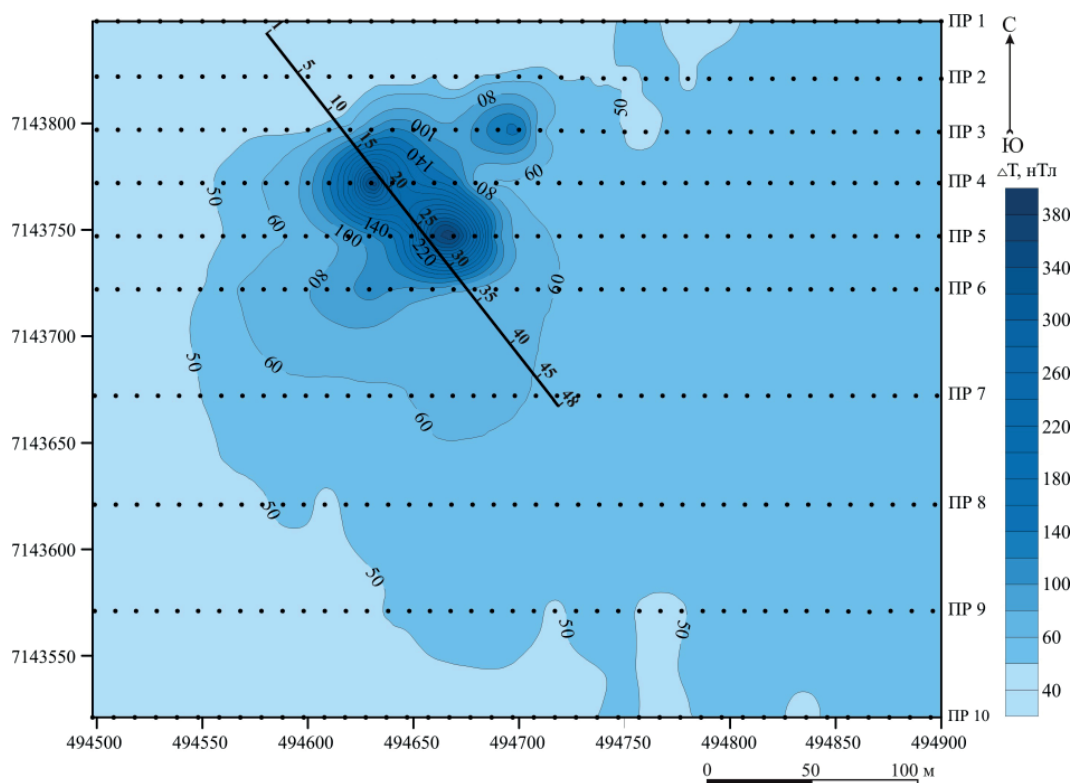


Рис. 3. Карта изолиний аномального магнитного поля Верхнемезенской кимберлитовой трубки масштаба 1:1000. Черные точки — пункты наблюдения по магнитометрическим профилям и их номера, линия — сейсмический профиль с каналами регистрации

Fig. 3. Map of isolines of the anomalous magnetic field of the Verkhnemezenskaya kimberlite pipe on the scale of 1:1000. Black circles — observation points along to magnetometric profiles and their number, the line — seismic profile with registration channels

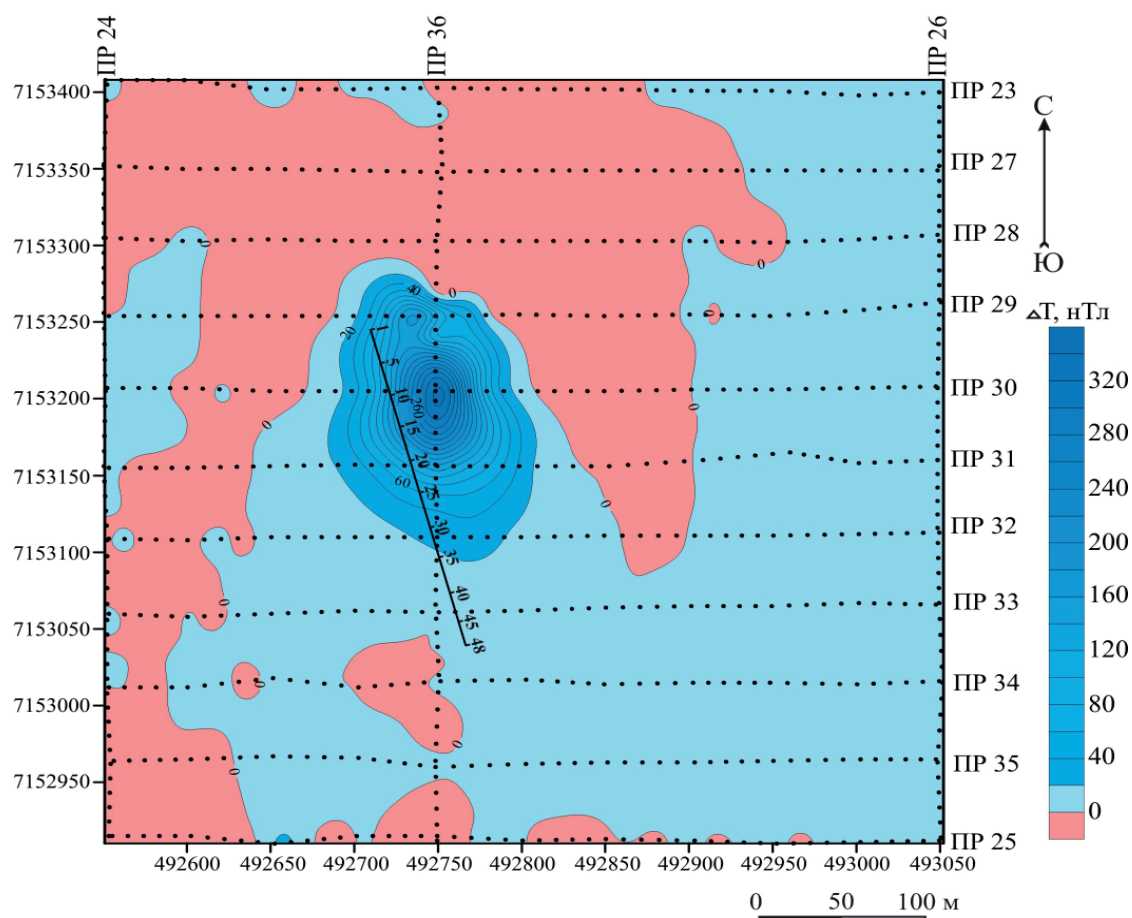


Рис. 4. Карта изолиний аномального магнитного поля Павьюгской аномалии масштаба 1:1000. Условные обозначения — на рис. 3

Fig. 4. Map of isolines of the anomalous magnetic field of the Pavyuga anomaly on the scale of 1:1000. Legend — see Fig. 3

позволяют говорить о том, что все три центра связаны с одним трубчатым телом сложного строения. Тела были вскрыты шестью канавами и тремя скважинами глубиной 82.2 (М-5), 107.5 (М-6) и 56 м (М-7). Скважины были пройдены в трех центрах положительной магнитной аномалии. На дочетвертичную поверхность трубчатое тело выходит в виде трех пятен изверженных пород, частично обрамленных зонами дробления. Выходы рудного тела имеют форму стреловидных листьев с закругленными углами, ориентированных к центру трубки. Трубчатое тело осложнено сильно измененным кимберлитом (рис. 2) (Айбабин и др., 1982²).

В пределах «Верхнемезенской» кимберлитовой трубки нами проведена детальная наземная магнитометрическая съемка масштаба 1:1000. В магнитном поле отчетливо выделяется положительная аномалия изометричной формы с тремя эпицентрами. Интенсивность в центре западного и южного эпицентров составляет

380 нТл, восточного — 150 нТл. Западный выход имеет размеры 40 × 30 м, восточный — 30 × 30 м и южный — 50 × 40 м. Общий размер аномалии 100 × 100 м (рис. 3).

Павьюгская магнитная аномалия, выделенная и отработанная нами в 2016 г., в магнитном поле представляет собой положительную аномалию эллипсоидной формы, простирающуюся в северо-северо-западном направлении, интенсивностью ΔT_a 340 нТл. Размеры локальной аномалии — 120 × 160 м (рис. 4).

Магнитная аномалия «Каменская» выбрана нами из-за ее локального одиночного расположения в пределах Мезенской площади мозаичного магнитного поля (рис. 1).

По результатам пешеходной магнитной съемки, выполненной нами в 2024 г., «Каменская» аномалия имеет овальную форму, несколько вытянутую в северо-западном направлении. Размеры ее составляют 250 × 450 м. Она распадается на две интенсивные (от 120

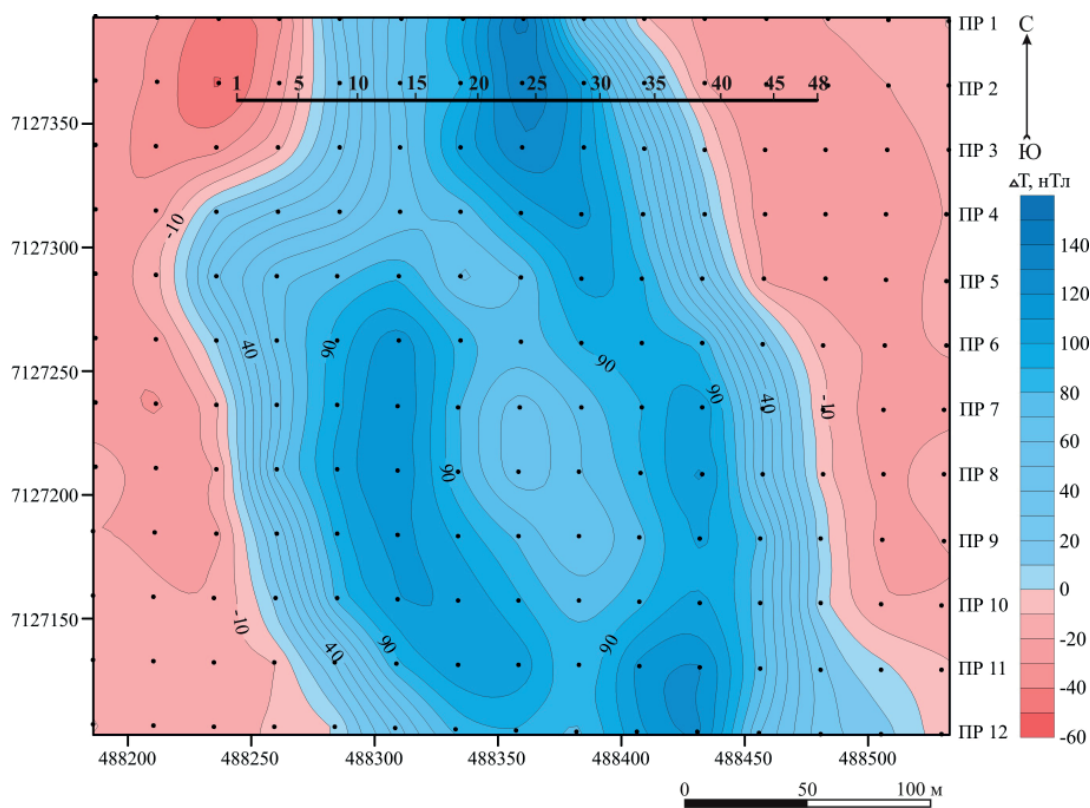


Рис. 5. Карта изолиний аномального магнитного поля Каменской аномалии масштаба 1:1000. Условные обозначения — на рис. 3

Fig. 5. Map of isolines of the anomalous magnetic field of the Kamenskaya anomaly on the scale of 1:1000. Legend — see Fig. 3

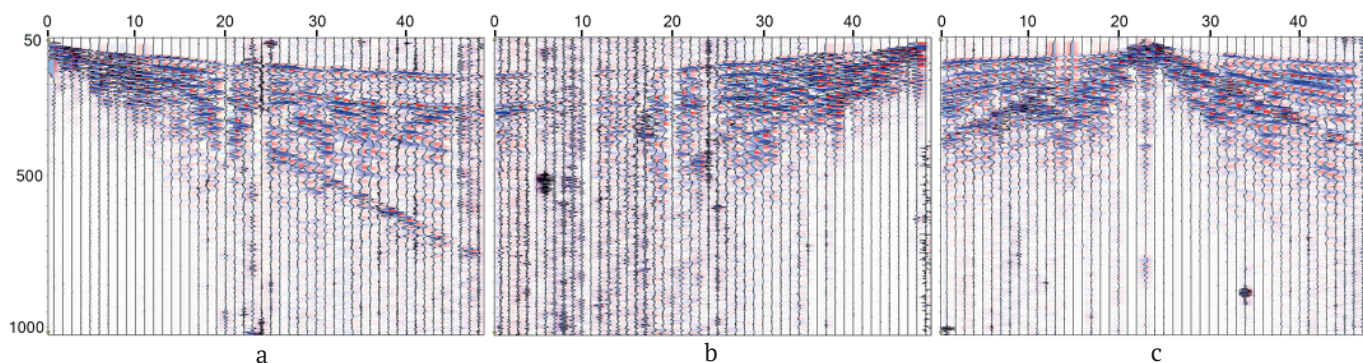


Рис. 6. Примеры сейсмограмм, полученных на участке «Верхнемезенская трубка взрыва». ПВ 1 (а), ПВ 47 (б), ПВ 23 (с)

Fig. 6. Examples of seismograms obtained at the Verkhnemezenskaya explosion pipe site. PV 1 (a), PV 47 (b), PV 23 (c)



до 150 нТл) положительные линейно вытянутые аномалии. Размеры первой — 50×150 м, второй — 50×350 м (рис. 5).

Сейсмические наблюдения

Верхнемезенская трубка взрыва

Сейсмическая запись характеризуется хорошим качеством, высоким отношением «сигнал/помеха». Первые вступления на сейсмограммах ПВ 3–45 выделяются уверенно. На ПВ 1, 47 для дальней зоны (ПП 1–3, ПП 46–48) отметка первых вступлений затруднительна. Это связано с наибольшим расстоянием ПВ–ПП, слабым ударным воздействием и, возможно, малым количеством накоплений (рис. 6).

Прямая продольная волна регистрируется в ближней зоне от 10 до 20 м со скоростью 0.5–0.8 км/с. Преломленные волны приходят со скоростями 2.5–3.0 км/с. Выделяются поверхностные волны со скоростями 0.4–0.6 км/с. Полезный сигнал регистрируется до 800 мс.

Результатом исследований явилось выделение области потери корреляции, уменьшения интенсивности сейсмических волн, а также изменения формы первых вступлений в районе ПП 12–20, ПП 20–32 и ПП 12–32 (рис. 7). На скоростном разрезе выделенная область отмечается пониженными значениями скоростей (рис. 8). Ширина зоны составляет 100 м с делением на 40 и 60 м.

Магнитная аномалия «Павьюга»

Сейсмическая запись представлена сложной волновой картиной, отвечающей различным условиям возбуждения и приема. Профиль проходил вдоль края болота. Северная часть находилась на возвышенности, тогда как южная — в низине. Сейсмическая запись южной части профиля ПП 1–11 хаотичная с плохим отношением «сигнал/помеха», далее запись ПП 13–47 становится чистой, с хорошим отношением «сигнал/помеха». Несмотря на это, первые вступления на всех сейсмограммах выделяются уверенно и характеризуются высокочастотным составом (рис. 9).

Прямая продольная волна регистрируется в ближней зоне до 10 м со скоростью 0.5–0.6 км/с. Преломленные волны приходят со скоростями 3.5–4.1 км/с. Поверхностные волны имеют скорости 0.4–0.45 км/с. Полезный сигнал регистрируется до 1000 мс. Характер волновой картины для отдельных пунктов возбуждения различается. Аномальная зона выделяется в районе ПП 12 и ПП 32. На скоростном разрезе область магнитной аномалии отмечается повышенными значениями скоростей (рис. 10).

Магнитная аномалия «Каменская»

Сейсмическая запись характеризуется хорошим качеством, высоким отношением «сигнал/помеха». Первые вступления на всех сейсмограммах выделяются уверенно (рис. 11).

Прямая продольная волна регистрируется в ближней зоне до 25 м со скоростью 0.5–0.6 км/с. Преломленные волны приходят со скоростями 2–2.5 км/с. Поверхностные волны имеют скорости 0.4–0.45 км/с. Характер волновой картины спокойный, без аномальных зон и потери корреляции сейсмической записи,

которая прослеживается до 1000 мс. На скоростном разрезе область отмечается аномалией с пониженными значениями скоростей (рис. 12).

Выводы

Верхнемезенская трубка взрыва. Результатом исследований явилось выделение на сейсмическом разрезе области потери корреляции, уменьшения интен-

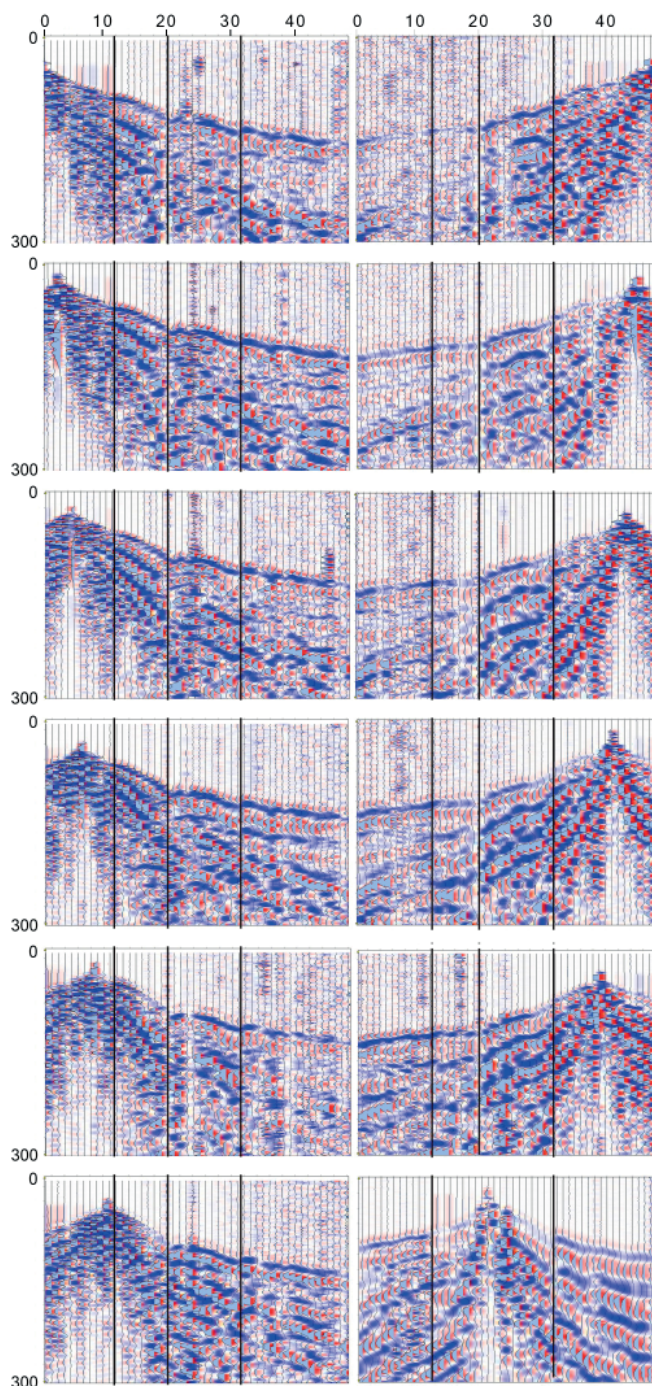


Рис. 7. Примеры сейсмограмм с выделением аномальной зоны на участке «Верхнемезенская трубка взрыва». ПВ 1, 3, 5, 7, 9, 11 (столбец слева сверху вниз), ПВ 47, 45, 43, 41, 39 (столбец справа сверху вниз), ПВ 21 (столбец справа внизу)

Fig. 7. Examples of seismograms, with the allocation of an anomalous zone in the Verkhnemezenskaya explosion pipe site. PV 1, 3, 5, 7, 9, 11 (column from left, top to bottom), PV 47, 45, 43, 41, 39 (column from right, top to bottom), PV21 (column from right bottom)

сивности сейсмических волн, а также изменения формы первых вступлений в районе ПП 12–20, ПП 20–32 и ПП 12–32. На скоростном разрезе выделенная область отмечается пониженными значениями скоростей. Ширина зоны составляет 100 м, с делением на 40 и 60 м. Выделенная область точно соответствует местоположению трубки взрыва.

Магнитная аномалия «Павьюга». Характер волновой картины для отдельных пунктов возбуждения различается. Аномальная зона выделяется в районе ПП 12 и ПП 32. На скоростном разрезе область магнитной аномалии отмечается повышенными значениями скоростей.

Магнитная аномалия «Каменская». Характер волновой картины спокойный, без аномальных зон и по-

тери корреляции сейсмической записи, которая прослеживается до 1000 мс. По сейсмическим данным выделить в пределах магнитной аномалии геологический объект не удалось, возможно из-за глубокого залегания тела, не позволяющего реализовать сейсмический метод при данной методике наблюдения.

В целом сейсмическая запись характеризуется хорошим качеством, высоким отношением «сигнал/помеха» на расстоянии 120–130 м от пункта возбуждения. На больших расстояниях это отношение ухудшается, вероятно в зависимости от условий возбуждения.

Прямая продольная волна регистрируется в ближней зоне от 15 до 30 м со скоростью 0.45–0.5 км/с.

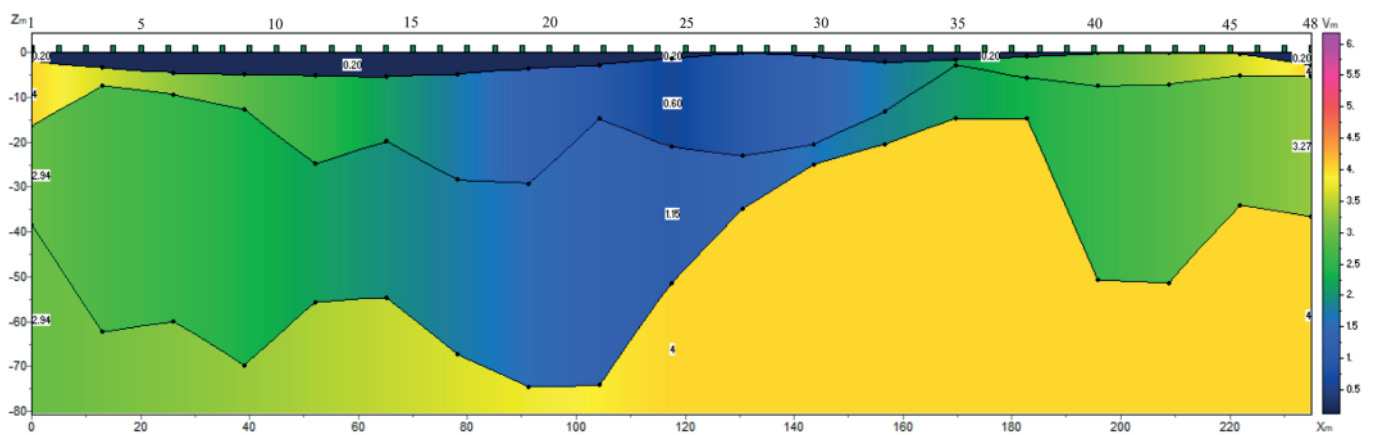


Рис. 8. Скоростной разрез участка «Верхнеземенская трубка», построенный по продольным волнам

Fig. 8. Velocity profile of the Verkhnezemenskaya pipe built along longitudinal waves

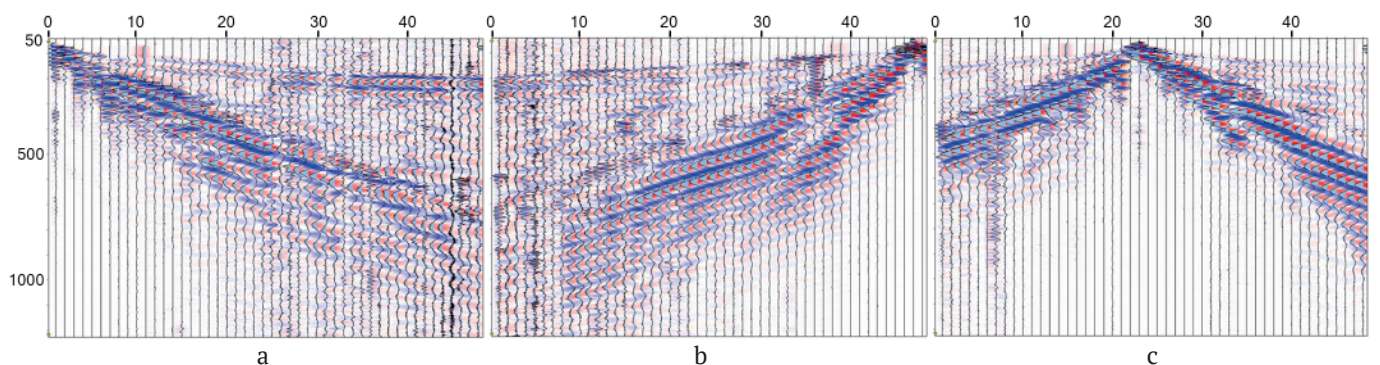


Рис. 9. Примеры сейсмограмм, полученных на участке магнитной аномалии «Павьюга». ПВ 1 (а), ПВ 47 (б), ПВ 23 (с)

Fig. 9. Examples of seismograms obtained at the «Pavyuga» magnetic anomaly site. PV 1 (a), PV 47 (b), PV 23 (c)

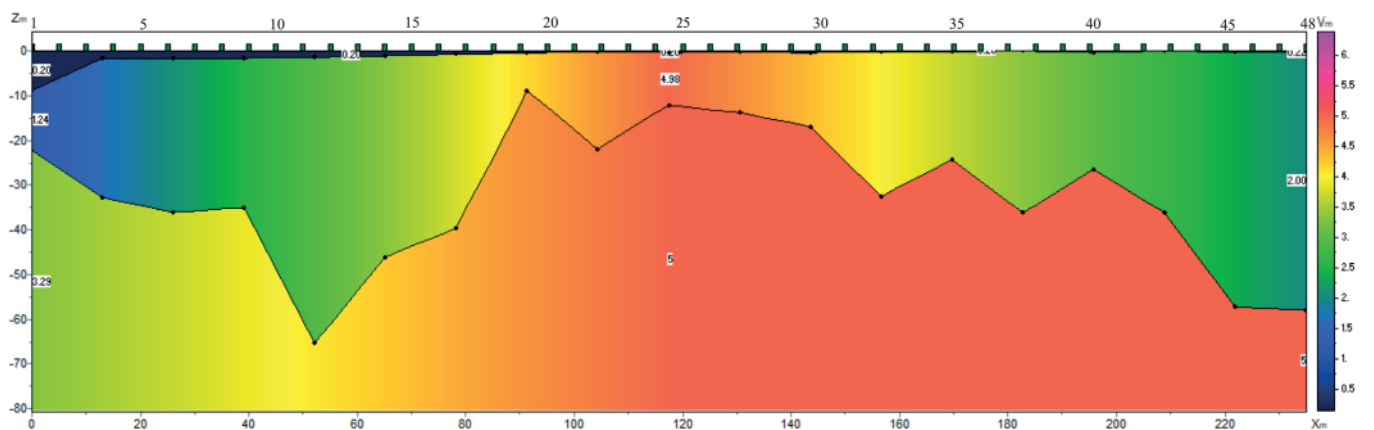


Рис. 10. Скоростной разрез участка магнитной аномалии «Павьюга», построенный по продольным волнам

Fig. 10. Velocity profile of the «Pavyuga» magnetic anomaly built along longitudinal waves

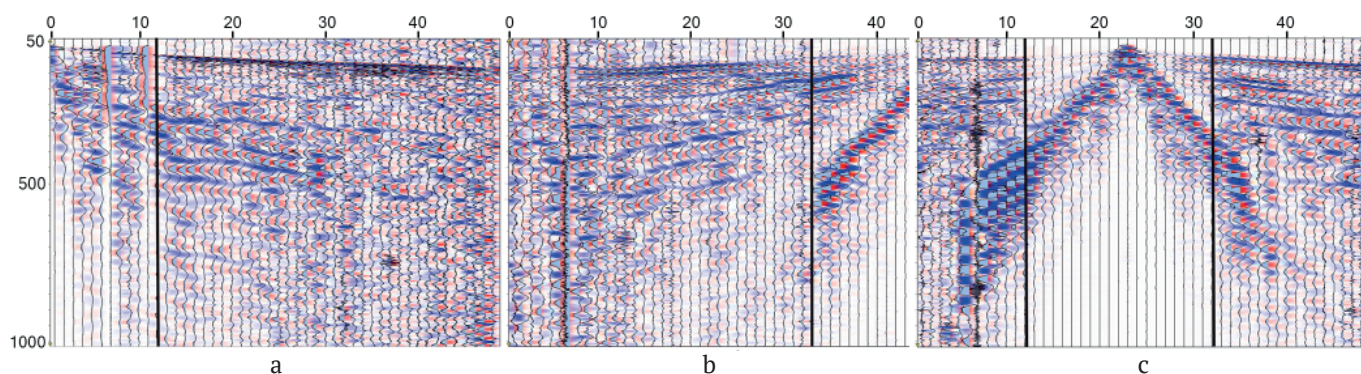


Рис. 11. Примеры сейсмограмм, полученных на участке магнитной аномалии «Каменская». ПВ 1 (а), ПВ 47 (b), ПВ 23 (с)

Fig. 11. Examples of seismograms obtained at the «Kamenskaya» magnetic anomaly site. PV 1 (a), PV 47 (b), PV 23 (c)

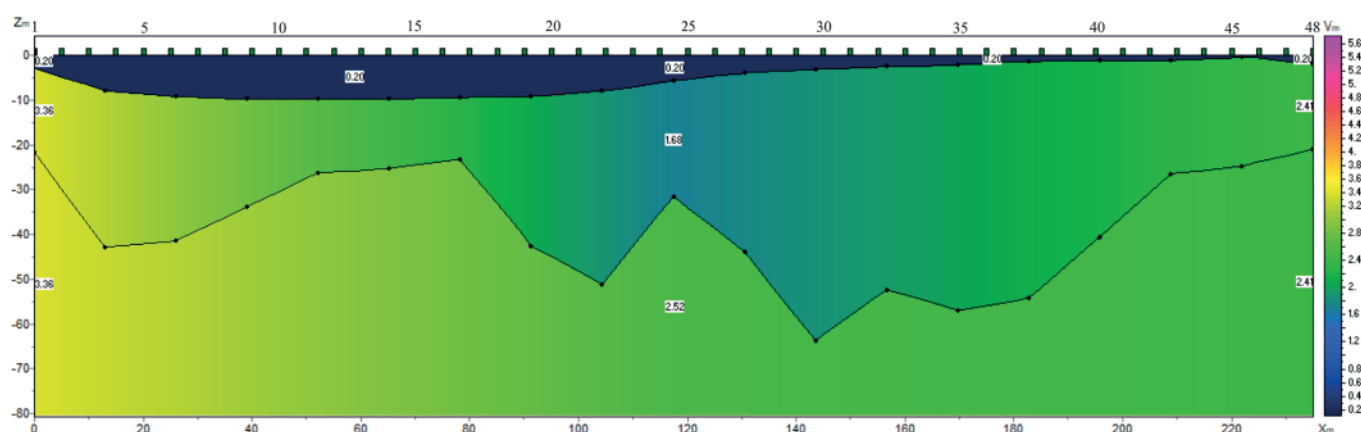


Рис. 12. Скоростной разрез участка магнитной аномалии «Каменская», построенный по продольным волнам

Fig. 12. Velocity profile of the «Kamenskaya» magnetic anomaly built along longitudinal waves

Преломленные волны приходят со скоростью 1.9–3.6 км/с. Поверхностные волны имеют скорость 0.3 км/с. Отчетливо выделяются звуковые (воздушные) волны со скоростью 0.33 м/с.

Закключение

Применение малоглубинной сейсморазведки МПВ показывает возможность использования метода для выделения границ геологических структур, таких как «трубка взрыва», и имеет большое значение для их поиска, т. к. зачастую форма магнитной аномалии ввиду ее сложности может не полностью соответствовать самому телу, его эпицентру.

При проведении полевых работ возможно использовать классические типы расстановок. Глубинность метода определяется мощностью источника и длиной расстановки и в подавляющем большинстве случаев не превышает 30–50 м при расстановке в 235 м. При наличии сложных границ и анизотропии скоростей разреза необходимо наличие дополнительных ПВ, как выносных, так и в пределах профиля, что позволяет учесть конфигурацию границ и корректно восстановить скоростную модель среды.

Исследование выполнено в рамках темы НИР «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» (ГР № 122040600012-2).

Литература / References

- Маништейн А. К. Малоглубинная геофизика. Новосибирск: Издательство НГУ, 2002. 135 с.
 Manstein A. K. Shallow Geophysics. Novosibirsk: NSU Publishing House, 2002, 135 p. (in Russian)
 Боганик Г. Н., Гурвич И. И. Сейсморазведка. Тверь: АИС, 2006. 744 с.
 Boganik G. N., Gurvich I. I. Seismic Exploration. Tver: AIS, 2006, 744 p. (in Russian)
 Белоусов А. В., Сергеев К. С., Сафиуллин Р. И. Возможности обработки различных типов волн, регистрируемых в инженерной сейсморазведке // Приборы и системы разведочной геофизики. 2014. № 1. С. 86–93.
 Belousov A. V., Sergeev K. S., Safiullin R. I. Processing Capabilities of Various Wave Types Recorded in Engineering Seismic Exploration. Instruments and Systems of Exploration Geophysics, 2014, No. 1, pp. 86–93. (in Russian)

Поступила в редакцию / Received 21.05.2025

Каолинитовые глины как перспективное сырье для получения цеолитовых материалов

А. В. Понарядов, О. Б. Котова, И. А. Перовский

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

alex401@rambler.ru

Выявлены особенности фазового состава каолина (каолинитовые глины, Средний Тиман, Россия). Адаптирован метод синтеза цеолитов из некондиционного алюмосиликатного сырья. Полученные цеолитовые сорбенты были исследованы комплексом современных аналитических методов, определены параметры пористой структуры. Установлено, что в результате гидротермической обработки в щелочном растворе происходит формирование цеолитов двух типов: LTA и FAU (фожазит), обладающих высокой степенью кристалличности. Сорбционная емкость по ионам Sr^{2+} составила 180 мг/г, что превосходит значения для известных микро- и мезопористых сорбентов. Доказано, что морфологические и структурные особенности цеолита влияют на его сорбционную способность. Полученные цеолиты представляют собой эффективный и доступный по цене материал для применения в экологически безопасных технологиях.

Ключевые слова: каолинитовая глина, некондиционное алюмосиликатное сырье, цеолиты, LTA, FAU, фожазит

Kaolinite clays: a promising raw for the production of zeolite material

A. V. Ponaryadov, O. B. Kotova, I. A. Perovskiy

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

Phase composition of kaolin (kaolinite clays, Middle Timan, Russia) has been studied. A method for synthesizing zeolites from low-grade aluminosilicate raw material — kaolinite clay (Middle Timan, Russia) — is adapted. The resulting zeolite sorbents are analyzed by a range of modern analytical methods, and their porous structure parameters are determined. We have found that hydrothermal treatment in an alkaline solution resulted in the formation of two types of zeolites: LTA and FAU (faujasite), both with a high degree of crystallinity. The sorption capacity for Sr^{2+} ions is 180 mg/g, exceeding the values for known micro- and mesoporous sorbents. We have shown that the morphological and structural properties of the zeolite influence its sorption capacity. The resulting zeolites represent an effective and affordable material for use in environmental technologies.

Keywords: kaolinite clay, low-grade aluminosilicate raw material, zeolites, LTA, FAU, faujasite

Введение

Вовлечение в переработку некондиционного алюмосиликатного сырья открывает широкие перспективы для получения ценных продуктов, таких как металлический алюминий, глинозем, кремний, а также различных строительных материалов, сорбентов и катализаторов. Использование такого сырья позволяет снизить зависимость от импорта дорогостоящего кондиционного сырья, уменьшить нагрузку на окружающую среду за счет утилизации отходов, а также создать новые рабочие места в регионах, где сосредоточены запасы некондиционного сырья (Лебедев и др., 2013; Володченко, 2017). Для его эффективной переработки необходимо применение комплексных методов, включающих предварительную обработку, селективное извлечение целевых компонентов и переработку технологических продуктов передела. К перспективным технологиям относятся гидрометаллургические методы (щелочное и кислотное выщелачивание), термохими-

ческие методы и биовыщелачивание (Gladyshev et al., 2024).

Каолиновое сырье как бесщелочной тип алюмосиликатного сырья представляется промышленно значимым источником получения не только Al_2O_3 , но и синтетических алюмосиликатов (цеолитов), обладающих высокой адсорбционной способностью, ионным обменом и каталитической способностью благодаря своей пористой структуре (Лихникевич и др., 2023). Каолинитовые глины, представляющие собой широко распространенное и относительно недорогое сырье, — перспективный источник для получения ценных материалов (Irma et al., 2025). В Республике Коми основные ресурсы каолинитового сырья связаны с тиманскими бокситами (Салдин и др., 2023). Ценность рудной формации определяется выигрышными горно-геологическими и минералого-технологическими особенностями (широкое распространение, крупные запасы, сравнительно простое геологическое стро-

Для цитирования: Понарядов А. В., Котова О. Б., Перовский И. А. Каолинитовые глины как перспективное сырье для получения цеолитовых материалов // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 42–46. DOI: 10.19110/geov.2025.11.5

For citation: Ponaryadov A. V., Kotova O. B., Perovskiy I. A. Kaolinite clays: a promising raw for the production of zeolite material. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 42–46, doi: 10.19110/geov.2025.11.5



ение, возможность открытого способа обработки, относительно простая технология обогащения, возможность получения коммерческих отходов переработки (Лихникевич и др., 2023; Горбачев и Красникова, 2015).

Одним из актуальных направлений переработки каолинистых глин является синтез цеолитов — кристаллических алюмосиликатов с уникальной микропористой структурой (Derbe et al., 2021). Высокая дисперсность каолинистой глины облегчает ее взаимодействие с щелочными растворами и способствует образованию цеолитной структуры. Благодаря своим молекулярно-ситовым свойствам, ионообменной способности и каталитической активности цеолиты находят широкое применение в различных отраслях промышленности, включая нефтепереработку, нефтехимию, адсорбцию, разделение газов и жидкостей, в производстве моющих средств (Шушков и др., 2018; Irma et al., 2025). Существенно возросла роль ядерной энергетики, что приводит к накоплению жидких радиоактивных отходов. Для их утилизации — иммобилизации радионуклидов цезия и стронция — также широко применяются сорбционные методы с использованием различных типов сорбционных материалов, в том числе цеолитов (Liu et al., 2024).

Синтез цеолитов из каолинистых глин представляет собой экономически выгодную альтернативу традиционным методам, использующим дорогие химические реагенты. Использование местного природного сырья при синтезе адсорбентов позволяет перейти к рациональному использованию природных ресурсов и значительно снизить стоимость их производства. Так, цеолит типа LTA, синтезированный из глины, дешевле на 15 % по сравнению с полученным из силиката натрия (Derbe et al., 2021).

Процесс получения цеолитов из каолинистой глины обычно включает несколько этапов: активацию глины (например, путем термической обработки или химической модификации), щелочную обработку для растворения алюмосиликатов, гидротермальный синтез в автоклавах при повышенной температуре и давлении, а также последующую промывку и сушку полученного цеолита (Khazipova et al., 2021). Различные факторы, такие как состав исходной глины, концентрация щелочи, температура и время синтеза, могут существенно влиять на структуру, размер кристаллов и свойства конечного продукта.

Таким образом, исследования, направленные на разработку эффективных и экономически выгодных методов получения цеолитов из каолинистых глин, представляют собой актуальную задачу, способствуя расширению области применения этих ценных материалов и снижению зависимости от традиционных, более дорогих источников сырья.

Цель работы: выявление особенностей фазового состава каолина и адаптация перспективного для практической реализации в экологических технологиях метода синтеза из каолина цеолитов с высокой степенью кристалличности, оценка их сорбционной емкости.

Материалы и методы

Образец каолина (Средний Тиман, Россия) был измельчен до фракции -0.1 мм (Kotova et al., 2022). Для повышения реакционной способности проводили тер-

мическую активацию образцов при температуре $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере в трубчатой печи Carbolite Gero TF1 16/60/300, скорость нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, время выдержки 2 часа. Навеску образца смешивали с раствором гидроксида натрия (концентрация 4.0 моль/л). Соотношение образца и щелочного раствора составляло $T:Ж = 1:28$. После перемешивания на магнитной мешалке (500 об/мин, 30 мин) полученный кристаллизационный раствор переносился в стальной автоклав с тefлоновым вкладышем объемом 40 мл, степень заполнения составляла $\sim 70\%$. Гидротермический синтез проводили при температуре $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 72 ч. Обработка после синтеза включала в себя промывку синтезированного цеолита от избытка гидроксида натрия дистиллированной водой до $\text{pH} \sim 8$ и сушку при $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 12 ч.

Фазовый состав образцов определялся по дифрактограммам неориентированных образцов. Съемка проводилась на рентгеновском дифрактометре Наоуан DX-2700BH: излучение $\text{CuK}\alpha$, Ni-фильтр, 40 kV , 30 mA , SDD-детектор, область сканирования $2-65^{\circ} 2\theta$. Химический состав был определен рентгенофлуоресцентным методом (Shimadzu XRF-1800). Морфология образцов исходного и аморфизованного каолина (алюмосиликатных систем $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$) и синтезированных цеолитов исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии (Tescan VEGA-3, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-MAX 50 mm^2). Химический состав цеолита до и после экспериментов по сорбции измерялся по видимому полю, стандартное отклонение рассчитано по 10 измерениям.

Сорбционные свойства полученного цеолита оценивались в экспериментах по сорбции катионов Sr^{2+} из раствора нитрата стронция (концентрация 22 ммоль/л, что соответствует Sr^{2+} 2 г/л), стартовый pH раствора 5.1 . Для эксперимента навеску воздушно-сухого образца массой 150 мг засыпали в полипропиленовую пробирку с 40 мл раствора нитрата стронция, соотношение $T:Ж = 1:266$. Время сорбции составляло 24 часа, во время эксперимента пробирка периодически встряхивалась на ротационном смесителе TAGLER PC-Мульти. По окончании эксперимента сорбент отделяли от раствора с помощью центрифугирования при скорости 3000 об/мин в течение 5 мин и отбирали аликвоту раствора. Элементный состав растворов до и после сорбции определен с помощью оптико-эмиссионного спектрометра с индуктивно связанной плазмой Vista MPX Red (Varian, Австралия).

Результаты и обсуждение

Основной минеральной фазой в каолине является каолинит (более 98%), также установлены диаспор (AlOOH) и рутил (TiO_2) (рис. 1, кривая 1), весовое отношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ составляет 0.852 (рис. 2), что очень близко к теоретическому значению 0.850 для каолинита. Железо, входящее в состав каолина, не формирует самостоятельных фаз и является изоморфной примесью в каолините. Концентрации в исходном каолине примесных элементов — Fe и Ti — не превышают лимитированных производственными требованиями значений.

При термической активации каолина происходит удаление гидроксильных групп, алюмоокислородный

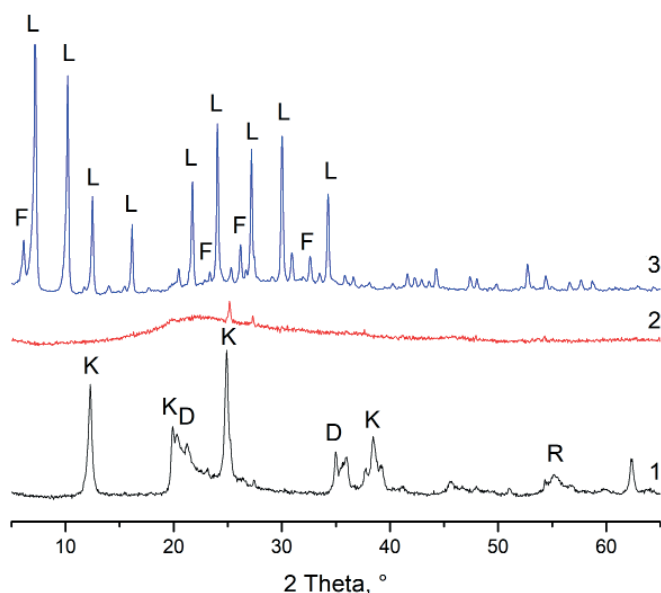


Рис. 1. Дифрактограммы образцов исходного каолина до (кривая 1) и после (кривая 2) термической активации, синтезированного цеолита (кривая 3): К — каолинит, D — диаспор, R — рутил, L — цеолит типа LTA, F — цеолит типа FAU

Fig. 1. Diffraction patterns of the initial kaolin samples before (curve 1) and after (curve 2) thermal activation, synthesized zeolite (curve 3): K — kaolinite, D — diaspor, R — rutile, L — LTA type zeolite, F — FAU type zeolite

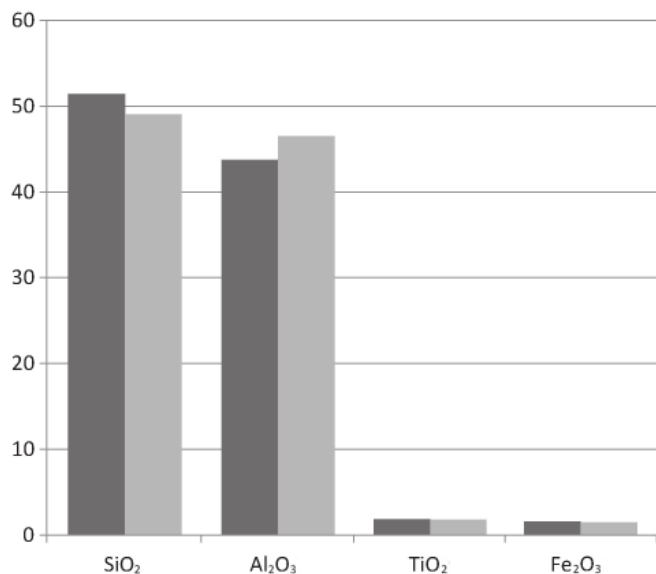


Рис. 2. Химический состав исходного каолина до (■) и после (▨) термической активации, мас. %

Fig. 2. Chemical composition of the initial kaolin before (■) and after (▨) thermal activation, wt. %

октаэдрический слой практически полностью пере-страивается в алюмоокислородный тетраэдрический слой образующейся промежуточной рентгеноаморфной фазы — метакеолинита (рис. 1, кривая 2) (Kotova et al., 2022). Одновременно происходит увеличение весового отношения Al_2O_3/SiO_2 до 0.947, что соответствует требованиям синтеза цеолита типа LTA.

Основной фазой во всех синтезированных образцах является цеолит типа LTA (рис. 1, кривая 3), идентифицированный по основным рефлексам с межплос-

костными расстояниями d/n (Å): 12.102, 8.588, 7.026, 4.073, 3.683, 3.269, 2.967, 2.609. Для определения степени кристалличности синтетических цеолитов используется соотношение интенсивности основных пиков (Ayele et al., 2015; Khazipova et al., 2021). Степень кристалличности синтезированного цеолита LTA составила ~95 %, что значительно выше данных, приводимых другими исследователями (Ayele et al., 2015; Khazipova et al., 2021). Помимо цеолита LTA в синтезированном образце присутствует цеолит типа FAU (фожазит), содержание которого, по данным количественного рентгенографического фазового анализа, не превышает 8 %.

При термической активации происходит аморфизация исходного каолина — изменение морфологии частиц, явная сегрегация зерен и образование более крупных по размеру агрегатов с увеличением температуры (рис. 3, а и б). В процессе синтеза получены кристаллы кубической формы, средний размер которых 1–1.5 мкм (более крупные — цеолит LTA, меньшие — FAU, рис. 3, с). Между кубическими кристаллами цеолитов и на их поверхности присутствуют зернистые выделения размером от десятых долей до 1 мкм, образованные удлиненными кристаллами. О. С. Травкина с соавторами (Travkina et al., 2013) указывают, что кристаллизация цеолита типа LTA включает стадию взаимодействия метакеолина с полигидрооксиком-плексами натрия. При этом на поверхности кристаллов цеолита может оставаться рентгеноаморфный алюмосиликат натрия, химический состав которого близок к составу кристаллизующегося цеолита. Учитывая высокую степень кристалличности полученных цеолитов и отсутствие на дифрактограммах диффузных гало, мы относим описываемые зернистые выделения к кристаллам гидроксидоалюмината.

Весовые отношения Al_2O_3/SiO_2 , измеренные с помощью EDS, уменьшаются по сравнению с исходным метакеолином для всех синтезированных серий образцов цеолитов и составляют ~0.82.

Сорбционная емкость полученных цеолитов была оценена в реакциях сорбции ионов Sr^{2+} из водных растворов. Для цеолитов с невысоким весовым отношением Al_2O_3/SiO_2 удаление катионов Sr^{2+} из раствора может протекать двумя способами: хемосорбции на поверхности и катионного обмена. Фиксируется образование фазы $SrO_2 \cdot (H_2O)_8$ как побочного продукта образования поверхностных комплексов с Sr^{2+} в процессе хемосорбции. В результате же катионного обмена происходит изменение параметров кристаллической решетки — увеличение межплоскостных расстояний d/n (Å): 12.191, 8.632, 7.053, 4.082, 3.691, 3.275, 2.971, 2.612.

Средний размер частиц цеолита остается неизменным после насыщения ионами Sr^{2+} (рис. 3, д). Отмечается незначительное изменение морфологии кубических кристаллов в виде скругления ребер куба. Данные химического состава, измеренные с помощью EDS, показывают, что замещение ионов натрия стронцием составило ~85–90 % (табл. 1). Сорбционная емкость составила 180 мг/г.

Сравнение рассчитанных значений сорбционной емкости цеолитов с данными для других микро- и мезопористых сорбентов (Шушков и др., 2018; Liang et al., 2019) показывает, что полученные образцы являются конкурентоспособным материалом, особенно

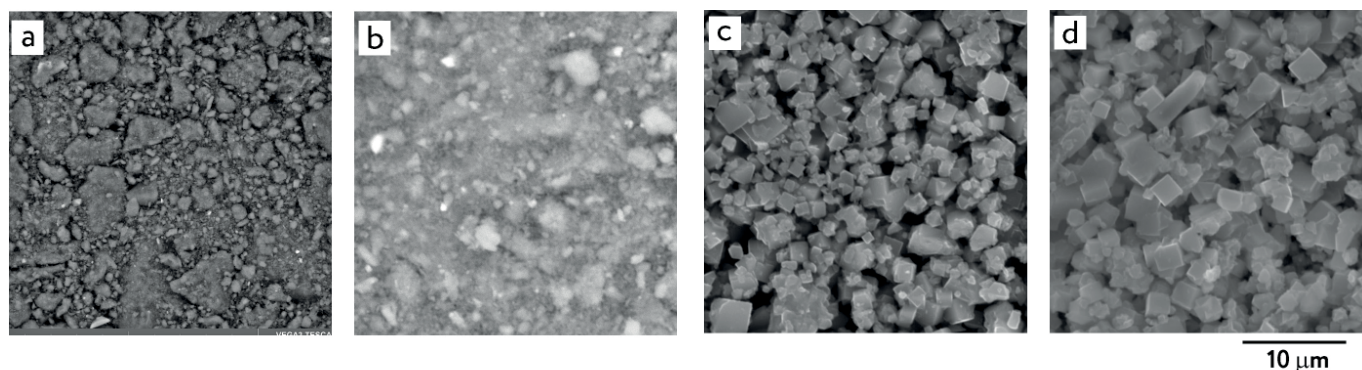


Рис. 3. СЭМ-изображения исходного (а) и термически активированного (б) каолина и образцов цеолита до (с) и после (д) сорбции ионов Sr^{2+} , режим BSE

Fig. 3. SEM images of the initial (a) and thermally activated (b) kaolin and zeolite samples before (c) and after (d) sorption of Sr^{2+} ions, BSE mode

Таблица 1. Химический состав синтезированного цеолита до и после сорбции стронция (ат. %, EDS)

Table 1. Chemical composition of as-synthesized zeolite before and after strontium uptake (at. %, EDS)

Образец Sample	O	Al	Si	Na	Sr
Синтезированный цеолит Synthesized zeolite	57.76 ± 0.05	13.87 ± 0.09	14.50 ± 0.04	12.70 ± 0.12	–
Синтезированный цеолит после насыщения стронцием Synthesized zeolite after saturation by strontium	61.18 ± 0.07	14.38 ± 0.18	15.39 ± 0.18	2.06 ± 0.16	5.47 ± 0.21

учитывая доступность исходного каолина и низкую стоимость процесса синтеза. Будучи неорганическим алюмосиликатным материалом, совместимым с большинством твердеющих матриц, синтезированные цеолиты имеют хорошие перспективы для использования в экологических технологиях (удаление ионов тяжелых металлов из воды, утилизация жидких радиоактивных отходов и др.).

Заключение

Выявлены особенности фазового состава каолина (Средний Тиман, Россия). Основной минеральной фазой в каолине является каолинит (более 98 %).

Адаптирован метод получения высококристаллических синтетических алюмосиликатов (цеолитов) из каолинового сырья (бесщелочного типа алюмосиликатного сырья).

Изучено влияние температурной активации каолина на весовое отношение $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, стимулирующей кристаллизацию синтетических алюмосиликатов (цеолитов). Установлено, что главной фазой является цеолит типа LTA, параллельно происходит формирование цеолита типа FAU (фожазита). Согласно данным графического рентгенофазового анализа, максимальное содержание фожазита не превышает 8 %. Размер полученных кубических кристаллов цеолитов варьируется в пределах 1–1.5 мкм. Между кубическими кристаллами цеолитов и на их поверхности наблюдаются зернистые выделения, образованные удлиненными

кристаллами гидроксисодалита размером от 0.1 до 1 мкм.

Оценена сорбционная способность синтезированного цеолита в реакциях сорбции ионов стронция из водных растворов, которая реализуется посредством хемосорбции и катионного обмена. Сорбционная емкость по Sr^{2+} составила 180 мг/г, что превышает показатели известных сорбентов. Полученный цеолит является конкурентноспособным материалом и может применяться в качестве альтернативы в экологически приемлемых технологиях.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Геонаука».

Литература / References

- Володченко А. Н. Алюмосиликатное сырье для получения автоклавных отделочных материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. 2017. № 2. С. 172–177. DOI: 10.12737/24429
- Volodchenko A. N. Aluminosilicate raw materials for the production of autoclaved finishing materials. Bulletin of the V. G. Shukhov Belgorod State Technological University, 2017, No. 2, pp. 172–177. (in Russian)
- Горбачев Б. Ф., Красникова Е. В. Состояние и возможные пути развития сырьевой базы каолинов, огнеупорных и тугоплавких глин в Российской Федерации // Строительные материалы. 2015. № 4. С. 6–17.

- Gorbachev B. F., Krasnikova E. V. Status and possible development paths of the raw material base of kaolins, refractory and refractory clays in the Russian Federation. *Construction Materials*, 2015, No. 4, pp. 6–17. (in Russian)
- Лебедев М. С., Потапова И. Ю., Лютенко А. О. Особенности состава алюмосиликатного сырья с точки зрения его использования для получения дорожно-строительных материалов // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2013. № 5. С. 70–74.
- Lebedev M. S., Potapova I. Yu., Lyutenko A. O. Features of the composition of aluminosilicate raw materials from the point of view of its use for the production of road construction materials. *Actual Problems of Humanitarian and Natural Sciences*, 2013, No. 5, pp. 70–74. (in Russian)
- Лихникевич Е. Г., Пермякова Н. А., Рогожин А. А. Отечественное каолиновое сырье: технологические перспективы // Современные проблемы комплексной и глубокой переработки природного и нетрадиционного минерального сырья (Плаксинские чтения — 2023): материалы международной конференции, Москва, 2–5 октября 2023 года. М.: Спутник +, 2023. С. 153–155.
- Likhnikovich E. G., Permyakova N. A., Rogozhin A. A. Domestic kaolin raw materials: technological prospects. Current problems of complex and deep processing of natural and non-traditional mineral raw materials (Plaksin Readings — 2023): Proceedings of the international conference, Moscow, October 2–5, 2023. Moscow: Sputnik +, 2023, pp. 153–155. (in Russian)
- Салдин В. А., Бурцев И. Н., Симакова Ю. С., Шеболкин Д. Н., Груздев Д. А. Изъюрьельское проявление нижнекаменноугольных каолинов Южного Тимана: характер залегания, текстурные особенности // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2023. № 2. С. 68–80. DOI: 10.19110/1994-5655-2023-2-68-80
- Sal'din V. A., Burtsev I. N., Simakova Yu. S., Shebolkin D. N., Gruzdev D. A. Izyurelskoye occurrence of Lower Carboniferous kaolins of Southern Timan: occurrence nature and textural features. *Proceedings of Komi SC UB RAS*, 2023, No. 2, pp. 68–80. (in Russian)
- Шушков Д. А., Шуктомова И. И., Рачкова Н. Г., Харжа М. Пористость и сорбционные свойства цеолитов, синтезированных из угольной золы уноса // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2018. № 3. С. 32–37. DOI: 10.19110/2221-1381-2018-3-32-37
- Shushkov D. A., Shuktomova I. I., Rachkova N. G., Kharzha M. Porosity and sorption properties of zeolites synthesized from coal fly ash. *Vestnik of IG Komi SC UB RAS*, 2018, No. 3, pp. 32–37. (in Russian)
- Ayele L., Pérez-Pariente J., Chebude Y., Díaz I. Synthesis of zeolite A from Ethiopian kaolin // *Microporous and Mesoporous Materials*. 2015. V. 215. P. 29–36. DOI: 10.1016/j.micromeso.2015.05.022
- Derbe T., Temesgen S., Alem M. A Short Review on Synthesis, Characterization, and Applications of Zeolites // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2021. P. 1–17. DOI: 10.1155/2021/6637898
- Gladyshev S. V., Dyussenova S., Bakhshyan A., Imangaliyeva L., Abikak, Y. B. Hydrochemical processing of fine kaolinite fraction of high-siliceous bauxite with preliminary chemical activation // *Engineering Journal of Satbayev University*. 2024. V. 146. No. 5. P. 10–17. DOI: 10.51301/ejsu.2024.i5.02
- Irma M., Foo K. Y., Susilawati S., Yusof E. N., Nishiyama N., Sabar S. Advancements in zeolite and zeolite-based sorbents: Modification strategies in mitigating nitrogen-containing pollutants from water and wastewater // *Inorganic Chemistry Communications*. 2025. No. 172. 113715. DOI: 10.1016/j.inoche.2024.113715
- Khazipova A. N., Travkina O. S., Agliullin M. R., Pavlova I. N., Kutepov B. I., Dyakonov V. A. Modification of the physicochemical properties of high-crystallinity granular Y zeolite by steam heating and acid treatment // *Petroleum Chemistry*. 2021. No. 61(3). P. 284–291. DOI: 10.1134/S0965544121030026
- Kotova O. B., Ustyugov V. A., Sun S., Ponaryadov A. V. Mullite production: phase transformations of kaolinite, thermodynamics of the process // *Journal of Mining Institute*. 2022. V. 254. P. 129–135. DOI: 10.31897/PMI.2022.43
- Liang J., Li J., Li X., Liu K., Wu L., Shan G. The sorption behavior of CHA-type zeolite for removing radioactive strontium from aqueous solutions // *Separation and Purification Technology*. 2019. V. 230. P.115–874. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.115874
- Lipin V., Sofronova E. Low-Quality Aluminum-Containing Raw Materials: Experience, Problems and Prospects. In: Tomsett, A. (eds) *Light Metals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-36408-3_4
- Liu J., Xu Y., Zhang W., Ye J.Y., Wang R. Solidification performance and mechanism of typical radioactive nuclear waste by geopolymers and geopolymer ceramics: A review // *Progress in Nuclear Energy*. 2024. V.169. 105106. DOI: 10.1016/j.pnucene.2024.105106
- Travkina O. S., Kutepov B. I., Pavlov M. L. Studies of the solid-liquid phase mass transfer during the LTA type zeolite crystallization from metakaolin // *Journal of materials physics and chemistry*. 2013. No.1(1). P. 1–3. DOI: 10.12691/jmpc-1-1-1

Поступила в редакцию / Received 29.10.2025



Цифровая систематизация миоспор девонского периода: разработка и опыт применения реляционной базы данных

Н. Н. Бабилова, О. П. Тельнова

Сыктывкарский государственный университет им. Питирима Сорокина, Сыктывкар, Россия

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

valmasha@mail.ru, telnova@geo.komisc.ru

В статье представлены результаты разработки реляционной базы данных «Миоспоры палеозоя» и ее применения для систематизации и анализа данных по спорам девонского периода. База данных содержит детальные морфологические описания, стратиграфические и географические привязки 190 родов и 1880 видов миоспор. Таксономическая номенклатура стандартизирована по М. В. Ошурковой (2003). Применение цифрового инструментария позволило подтвердить ранее установленные закономерности динамики видового разнообразия спор в девонском периоде. Практическая значимость исследования заключается в создании верифицированного цифрового ресурса, который можно использовать для решения стратиграфических задач, палеоэкологических, палеогеографических и палеоклиматических реконструкций, а также в образовательных целях. В дальнейшем планируется дополнение базы данных изображениями спор, что позволит реализовать функцию визуального поиска похожих спор, основанную на сопоставлении изображений методами компьютерного зрения.

Ключевые слова: база данных, миоспоры, систематика, девонский период

Digital classification of Devonian miospores: development and application of a relational database

N. N. Babikova, O. P. Tel'nova

Syktyvkar State University named after Pitirim Sorokin, Syktyvkar, Russia

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

This article presents the results of developing the «Paleozoic Miospores» relational database and its application to systematizing and analyzing data on Devonian spores. The database contains detailed morphological descriptions, stratigraphic, and geographic references for 190 genera and 1,880 myospore species. The taxonomic nomenclature was standardized according to M. V. Oshurkova (Oshurkova, 2003). The use of digital tools confirmed the previously established dynamics of changes in spore species diversity in the Devonian. The practical significance of this study lies in the creation of a verified digital resource that can be used to solve stratigraphic problems, perform paleoecological, geographic, and climatic reconstructions, and for educational purposes. Future plans include supplementing the database with spore images, which will enable the implementation of a visual search for similar spores based on image comparison using computer vision methods.

Keywords: database, miospores, systematics, Devonian period

Введение

В настоящее время цифровые базы данных становятся неотъемлемой частью научных исследований в области палеопалинологии. Внедрение баз данных позволяет систематизировать растущие массивы информации и применять методы информационно-коммуникационных технологий для каталогизации, хранения, а также качественного и количественного анализа палиноморф.

Глобальные базы объединяют разрозненные данные из тысяч публикаций, музейных коллекций и полевых исследований, что создает единую точку доступа к информации. Библиографическая база данных Palynodata содержит сведения о 122 422 видах палиноморф из 22 152 документов палинологической ли-

тературы со всего мира. База данных формировалась с 1974 по 2006 год компанией Palynodata Inc., в 2007 году авторские права были переданы Канаде. Базу данных можно скачать на сайте геологической службы Канады (White, 2008). В онлайн-режиме она доступна на сайте лаборатории палеоботаники Палеонтологического института им. А. А. Борисяка РАН (<https://paleobotany.ru>). Поиск по базе можно осуществлять по названию таксона или по данным о публикации (год, название, автор).

База данных палеоэкологии Neotoma (<https://www.neotomadb.org>) — это международная общедоступная база, содержащая данные об ископаемых голоцена, плейстоцена и плиоцена, то есть примерно за последние 5.3 миллиона лет, хотя большинство данных отно-

Для цитирования: Бабилова Н. Н., Тельнова О. П. Цифровая систематизация миоспор девонского периода: разработка и опыт применения реляционной базы данных // Вестник геонаук. 2025. 11(371). С. 47–54. DOI: 10.19110/geov.2025.11.6

For citation: Babikova N. N., Tel'nova O. P. Digital classification of Devonian miospores: development and application of a relational database. Vestnik of Geosciences, 2025, 11(371), pp. 47–54, doi: 10.19110/geov.2025.11.6

сится к последним 20 000 лет (Williams et al., 2018). Neotoma хранит данные о названиях видов, местоположении и возрасте ископаемых остатков, физические и геохимические данные из отложений, содержащих окаменелости.

Neotoma тесно сотрудничает с базой данных по палеобиологии Paleobiology Database (PBDB, <https://paleobiodb.org>), которая охватывает широкий временной диапазон до сотен миллионов лет и включает разнообразные таксоны морских и наземных животных, растений, микрофлоры, включая ископаемые споры. Все таксономические, геологические, географические, стратиграфические данные и данные о встречаемости в Paleobiology Database связаны со ссылками на библиографические описания источников, из которых эти данные были получены. Однако, несмотря на масштаб и значимость проекта, информация об ископаемых спорах в базе представлена фрагментарно: охвачены не все известные роды и виды, описания часто краткие, отсутствуют изображения и морфологические характеристики.

Региональный электронный каталог New Zealand Fossil Spores and Pollen: An Illustrated Catalogue (<https://pal.gns.cri.nz/catalog>) был составлен как справочное пособие для палеонтологов, занимающихся биостратиграфическими исследованиями доплейстоценовых отложений Новой Зеландии (Raine et al., 2011). Таксоны организованы согласно искусственной морфографической системе надродовых категорий (турм). Для каждого вида приводятся синонимия (с указанием переименований и ошибочных определений), ссылки на публикации, данные о стратиграфическом распределении, а также оригинальные изображения образцов. Каталог имеет высокую научную ценность, но охватывает только один географический регион и не предоставляет средств для поиска по морфологическим признакам, статистического анализа и сопоставления данных. Информация в каталоге представлена в виде текстов и изображений без формализованной структуры, пригодной для автоматизированной обработки.

Среди российских региональных палеопалинологических электронных ресурсов открытого доступа можно отметить геопространственную базу данных «Микулино» (<https://mikulino.ru>), разработанную на кафедре физической географии и ландшафтоведения МГУ им. М. В. Ломоносова. База охватывает 101 разрез, содержащий отложения микулинского межледникового (~115–128 тыс. лет назад), которые расположены в пределах лесной зоны Восточно-Европейской равнины. Каждому разрезу соответствуют координаты, наименование, ссылка на источник, а также данные палинологического анализа. Информация представлена в виде ГИС-проекта с возможностью перехода от точек на карте к диаграммам, стратиграфическим описаниям и интерпретациям.

Анализ современных палеоботанических, палеопалинологических цифровых ресурсов выявляет существенный пробел в области баз данных, специализирующихся на системном описании ископаемых спор палеозоя в целом и девонского периода в частности. Существующие ресурсы либо ориентированы на более молодые стратиграфические интервалы, либо, будучи общепалеонтологическими, не представляют детальной информации о морфологии спор, их

стратиграфическом и географическом распространении.

В связи с этим создание специализированной базы данных, содержащей структурированную информацию о морфологических признаках родов и видов миоспор девонского периода, является актуальной задачей. Такая база позволит систематизировать разрозненные данные и обеспечит возможность проведения статистического анализа и выполнения сравнительных исследований.

Материалы и методы

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ 1315-р «Об утверждении Концепции технологического развития до 2030 года» доцентом кафедры прикладной информатики ИТНиИТ СыктГУ им. Питирима Сорокина Н. Н. Бабиковой и ведущим научным сотрудником Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН О. П. Тельновой проводятся совместные междисциплинарные исследования. В настоящее время завершены работы по подразделу проекта «Проблемы и перспективы цифровой трансформации процесса диагностики палинологических объектов с целью стратиграфических построений». В рамках исследования предполагается разработка информационной системы «Диагностика девонских спор» с учетом результатов анализа проблемы цифровизации палинотратиграфических данных (Бабенко и др., 2021; Babenko, Telnova, 2022; Тельнова и др., 2024). К участию в исследовании привлекаются студенты СыктГУ в рамках прохождения производственной практики и выполнения дипломных работ.

Студенткой направления подготовки «Прикладная информатика» СыктГУ М. А. Шестаковой (научный руководитель Н. Н. Бабикова, научный консультант О. П. Тельнова) была разработана реляционная база данных «Миоспоры палеозоя» на базе СУБД SQLite (Шестакова, 2025). База данных проектировалась так, чтобы стать частью информационной системы «Диагностика девонских спор». Было принято решение формировать базу данных не только для девонского периода, но и для всего палеозоя, чтобы иметь возможность проследить изменения родового и видового разнообразия девонских спор в последующих геологических периодах.

База данных содержит детальное описание морфологии родов спор, типовой вид и перечень видов для каждого рода, для родов и видов указаны размеры, стратиграфическое и географическое распределение, библиографические данные источников, в которых виды были впервые описаны. Концептуальная диаграмма БД показана на рис. 1.

Номенклатура родов и видов в базе данных соответствует списку родов и видов в фундаментальной монографии М. В. Ошурковой (2003), содержащей наиболее полный перечень таксонов в русскоязычной литературе. Морфологические признаки формировались на основе данной монографии, а также монографии О. П. Тельновой (2007) и ее консультаций. Тестирование БД показало, что каждый род можно однозначно идентифицировать по морфологическим признакам, представленным в базе данных.

Названия родов и видов, стратиграфическое распространение верифицировались сопоставлением с



базой данных Palynodata. Для 174 из 190 родов, представленных в БД, имеются библиографические описания в Palynodata. Из оставшихся 16 родов 14 описаны как новые в монографии (Ошуркова, 2003): Ancamp-totrilletes Oshurkova, gen. nov.; Anreticulispora Oshurkova, gen. nov.; Conperiplecospora Oshurkova, gen. nov.; Cyclo-pileatispora Oshurkova, 1999; Foveoretusispora Oshurkova,

gen. nov.; Kedomonoletes Oshurkova, gen. nov.; Mixtatispora Oshurkova, gen. nov.; Reticuliretusispora Oshurkova, gen. nov.; Rugulispora Oshurkova, gen. nov.; Staplin-zonaletes Oshurkova, nomen nov.; Tuberculaletes Oshurkova, gen. nov.; Tuberculiretusispora Oshurkova, gen. nov.; Tuberculispora Oshurkova, gen. nov.; Vermiculispora Oshurkova, gen. nov. Еще 2 рода — Chano-

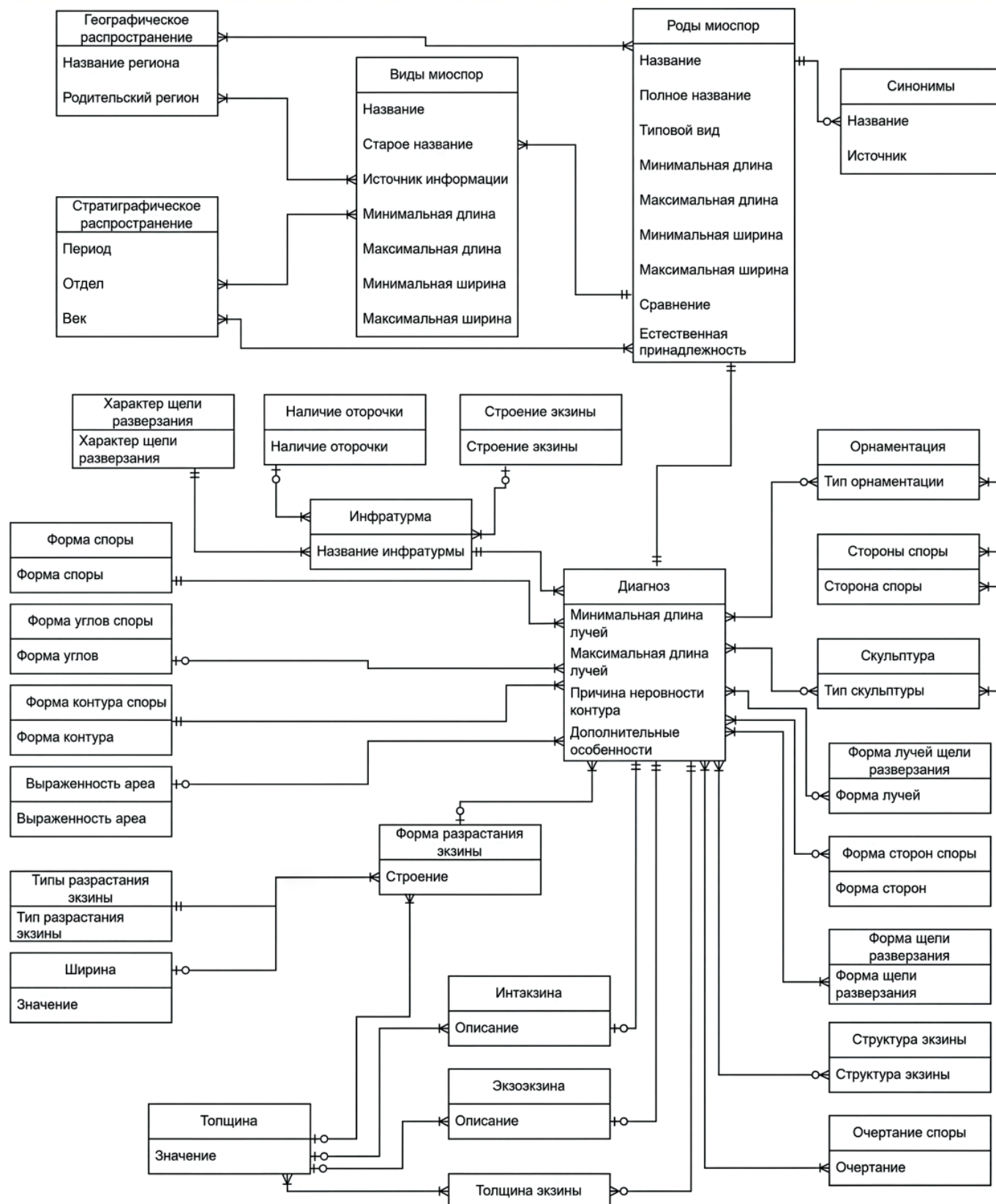


Рис. 1. Концептуальная схема базы данных

Fig. 1. Conceptual diagram of the database

vejisporites Virbickas, 1983; Pygmaeisorites Virbickas, 1983 — описаны в Палеонтологическом атласе пермских отложений Печорского угольного бассейна (Молин и др., 1983).

Результаты и обсуждение

В процессе тестирования БД были выявлены неточности в описании родов в монографии М. В. Ошурковой:

- для 2 родов (*Calamospora*, *Punctatisporites*), 6 видов (*Calamospora minutissima* (Naum.) Lub.; *Calamospora hyalina* (Naum.), Oshurkova, comb. nov.; *Calamospora obsuletes* (Naum.); *Punctatisporites naumovae* Oshurkova, nom. nov.; *Punctatisporites incrassatus* (Naum.) Oshurkova, comb. nov.; *Punctatisporites krystofovichii* (Naum.) Oshurkova, comb. nov.) в стратиграфическом распространении указан нижний кембрий (с. 55, с. 60), что неверно, так как известно, что первые наземные растения появились в силуре;

- в описании родов *Cyclogranisorites* (с. 66), *Endosporites* (с. 203), *Vallatisporites* (с. 181) в стратиграфическом распространении отсутствует девон, но в списке видов для этих родов имеются виды, в стратиграфическом описании которых девон присутствует;

- для родов *Streelisporea* (с. 139), *Punctatisporites* (с. 59) в стратиграфическом распространении указан силур, но в списке видов для этих родов нет ни одного вида, для которого силур присутствует в стратиграфическом распространении.

База данных содержит структурированную информацию о 190 родах и 1880 видах миоспор палеозоя (классификация палеозойских миоспор и количественное содержание таксонов представлено в таблице 1).

База данных содержит сведения только о спорах, которые появились в девоне, карбоне и перми. В описании стратиграфического распространения рода и/или вида указаны все геологические периоды, в которых существование родов/видов продолжалось. Представлены 99 родов и 509 видов девонского периода, 45 родов и 1072 вида карбона, 90 родов и 289 видов пермского периода (в пермское время происходит уменьшение видового разнообразия споровых и увеличение видов голосеменных растений).

Из 99 девонских родов 27 родов встречаются только в этом периоде. В таблице 2 представлено распределение этих родов по отделам и ярусам.

Наиболее «долгоживущие» рода девонских спор:

- 7 периодов (девон – палеоген): *Iugisporis*, *Leiotriletes*, *Trachytriletes*, *Tuberculiretusispora*, *Stenozotriletes*;

- 6 периодов (девон – мел): *Acanthotriletes*, *Apiculatisporis*, *Microreticulatisporites*, *Punctatisporites*;

- 5 периодов (девон – юра): *Calamospora*, *Camptotriletes*.

Рассматривая продолжительность существования родов, необходимо учитывать следующие факторы: обсуждаются дисперсные споры, таксономия которых построена только на морфологических признаках, т. е. без привязки к их продуцентам, а также широко распространенное явление полиморфизма. Таким образом, несмотря на четкую сменяемость флористических комплексов в процессе эволюции, на протяжении всей истории растительного мира, так же как в животном

мире, существовали долгоживущие таксоны. Факт «долгожительства» можно объяснить сохранением относительно стабильных экологических условий существования таксона. Например, род *Араукария* — очень древние хвойные деревья — появились на Земле 150–240 млн лет назад (триас), их по праву считают «живыми ископаемыми».

Из 509 видов спор, характерных для девонского периода, только 6 видов выходят за пределы девона: *Apiculatisporis erinaceus* (Naum.) Pot. et Kr. (девон; карбон нижний); *Auroaspora multiplex* Turnau (девон верхний, фаменский ярус; карбон нижний, турнейский ярус); *Crassisporea spinogranulata* Wang (девон верхний; карбон нижний); *Radiizonates camarusus* Wang (девон верхний; карбон нижний); *Radiizonates irregulatus* Wang (девон верхний; карбон нижний); *Radiizonates regulatus* Wang (девон верхний; карбон нижний). Все 6 видов нижнекарбонный порог не переступили. Таким образом, для девонского периода характерна оригинальная флора, даже фрагменты которой в настоящее время не встречаются (фактически уже не встречаются со среднего палеозоя).

Видами-индикаторами, которые распространены только в одном ярусе, являются 370 видов (72 % от всех девонских). Лохковский ярус представлен 2 видами: *Breconisporites breconensis* Rich. et al. и *Emphanisporites microratus* Rich. et List. Пражский ярус представлен 4 видами: *Breconisporites glaber* (Arch.) Rich. et al., *Costaspora decorata* All., *Emphanizonotriletes salantaicus* (Arch.) Arch., *Gravisporites mirandum* (Arch.) Oshurkova, comb. nov. Индикаторами эмского яруса являются 18 видов, эйфельского яруса — 31 вид, живетского яруса — 116 видов, франского яруса — 112 видов, фаменского яруса — 87 видов.

Видовое разнообразие в девоне растет: на рис. 2 показано общее количество видов для каждого яруса. Можно отметить увеличение в 2 раза числа видов при переходе от эйфельского к живетскому ярусу и сокращение числа видов на границе франского и фаменского ярусов. Резкий рост числа видов происходит в пограничном стратиграфическом интервале девона и карбона.

Известно, что рубеж франского и фаменского веков — уровень массового вымирания морских организмов (Кельвассерский кризис). По палинологическим данным в разрезах Южного Тимана зафиксирован экосистемный кризис и в растительных сообществах, развивавшийся длительное время, но пик событий приурочен к пограничному интервалу (Маршалл и др., 2011). Результаты, полученные при помощи цифрового инструментария, соответствуют результатам подсчетов (Тельнова, 2005), выполненных вручную (рис. 3).

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность применения разработанной цифровой базы данных для анализа и систематизации палинологической информации:

- автоматизированная проверка в процессе ввода данных и тестирования базы позволяет выявлять внутренние противоречия, опечатки и неточности в первичных источниках, повышая общее качество данных;

Таблица 1. Классификация палеозойских миоспор и количественное содержание таксонов
Table 1. Classification of Paleozoic myospores and quantitative content of taxa

Турма Turma	Кол-во родов Quantity of genera	Кол-во видов Quantity of species	Супрасубтурма Suprasubturma	Кол-во родов Quantity of genera	Кол-во видов Quantity of species	Субтурма Subturma	Кол-во родов Quantity of genera	Кол-во видов Quantity of species	Инфратурма Infraturma	Кол-во родов Quantity of genera	Кол-во видов Quantity of species
Triletes	164	1764	AcavatiTriletes	121	1343	AzonoTriletes	69	948	Apiculati	28	445
									Muromati	12	138
						ZonoTriletes	52	395	Mixtati	11	98
									Laevigati	6	187
									Foveolati	6	51
									Complexati	6	29
			AzonoCavatiTriletes	1	6	Crassiti	16	135			
						Zonati	14	91			
						Cingulati	10	55			
						Auriculati	5	80			
						Patinati	4	16			
						Tricrassati	3	18			
Monoletes	16	80	CavatiTriletes	43	421	ZonoCavatiTriletes	42	415	Tuberculornati	1	6
									Pseudosacciti	14	122
						AzonoMonoletes	10	48	Zonacavati	12	117
									Cingulicavati	6	111
									Cingulizonacavati	5	41
									Patinacavati	3	19
			AcavatoMonoletes	15	67	Crassitudicavati	2	5	Sculptatomoleteti	8	33
						AzonoCavatiMonoletes	5	19	Crassomoleteti	2	9
									Zonomonoleteti	2	4
						CavatoMonoletes	1	13	Cingomoleteti	1	6
									Zonasacciti	1	13
Hilates	1	12	AcavatiHilates			Archaeosacciti					
									Epitygmati	1	12
Aletes	9	24				ZonoCavatiHilates	7	21	Pseudosaccihilati	3	6
									Muroraleti	2	8
						AzonAletes	2	3	Psilonapiti	2	7
						ZonAletes	2	3	Apiculaleti	2	3



Таблица 2. Роды, которые встречаются только в девонском периоде

Table 2. Genera found only in the Devonian

№ п/п	Род Genus	Нижний девон Lower Devonian			Средний девон Middle Devonian		Верхний девон Upper Devonian	
		Ярусы / Stages						
		лохковский Lochkovian	пражский Pragian	эмский Emsian	эйфельский Eifelian	живетский Givetian	франский Frasnian	фаменский Famennian
1	Bullatisporites							
2	Elenisporis							
3	Foveoretusispora							
4	Streelispora							
5	Breconisporites							
6	Conperiplecospora							
7	Emphanisporites							
8	Devonomonoletes							
9	Rhabdosporites							
10	Samarisporites							
11	Acinosporites							
12	Ancamptotriletes							
13	Biornatispora							
14	Corystisporites							
15	Rimosisporis							
16	Ancyrospora							
17	Hystricosporites							
18	Membrabaculisporis							
19	Contagisporites							
20	Archaeotriletes							
21	Cornispora							
22	Kedomonoletes							
23	Emphanizonosporites							
24	Clivosispora							
25	Lanatisporis							
26	Sinuosisporis							
27	Synorisporites							

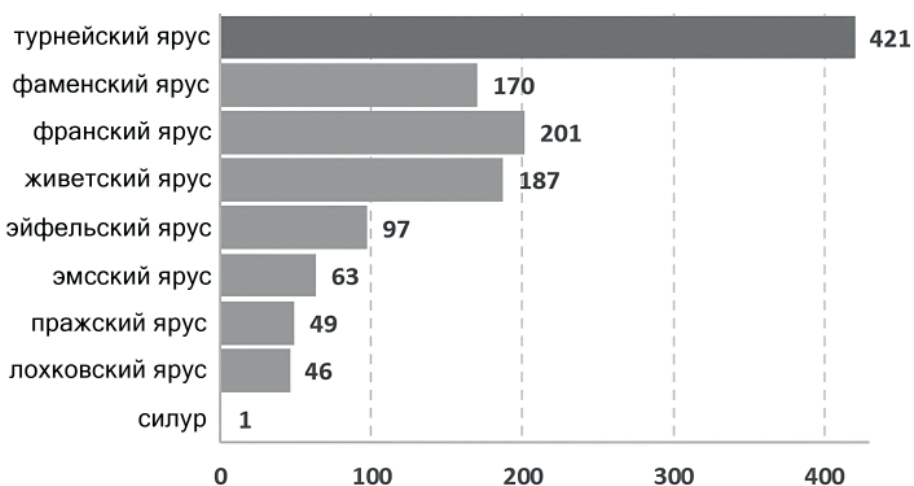


Рис. 2. Основные изменения количества видов спор в девонском периоде (анализ цифровой БД)

Fig. 2. Major changes in the number of spore species in the Devonian period (analysis of a digital database)

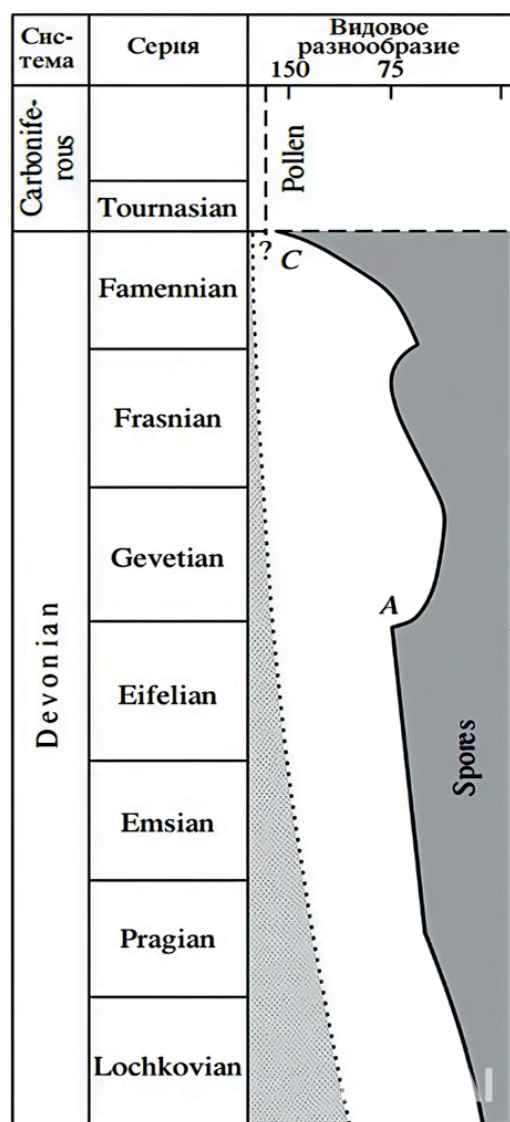


Рис. 3. Эволюционные тренды спор древнейших наземных растений (результаты ручных расчетов): фрагмент рисунка из статьи (Тельнова, 2005)

Fig. 3. Evolutionary trends in the spores of the oldest land plants (results of manual calculations): fragment of a figure from the article (Telnova, 2005)

— возможность быстрого поиска в базе данных облегчает и ускоряет палеопалинологические исследования;

— применение цифрового инструментария позволило подтвердить и уточнить ранее установленную динамику изменения родового и видового разнообразия спор в девонском периоде: увеличение в 2 раза числа видов на границе эйфельского и живетского ярусов, сокращение разнообразия на рубеже франского и фаменского ярусов, резкий рост числа видов на границе девона и карбона;

— определены 27 родов спор, которые встречаются исключительно в девонском периоде, и 370 видов спор, которые являются индикаторами конкретных ярусов девона (72 % от всех видов, распространенных в девоне);

— установлено, что только 6 видов спор переходят из девонского периода в нижний карбон, что подтверждает уникальность девонской флоры;

— определены долгоживущие роды, которые распространены от девонского периода до юрского, мелового, а 5 родов даже до палеогена.

Практическая значимость исследования заключается в создании верифицированного цифрового ресурса, который можно использовать для решения стратиграфических задач, палеоэкологических, географических и климатических реконструкций, а также в образовательных целях.

База данных «Миоспоры палеозоя» разрабатывалась как часть информационной системы «Диагностика девонских спор», но может быть использована и для создания интерактивной обучающей программы для студентов и молодых специалистов-палинологов. Реляционные БД позволяют проводить поиск по любой комбинации имеющихся полей. Например, если в процессе диагностики пользователь определил несколько морфологических признаков, он может создать запрос «найти все трехлучевые споры округлого очертания со скульптурой в виде бородавок на дистальной стороне и гладкой проксимальной стороной» и получить список всех подходящих родов спор.

Внедрение методов машинного обучения расширит поисковый функционал системы: позволит не только осуществлять точный поиск по заданным дескрипторам, но и выявлять таксоны со сходной морфологией. Планируемое дополнение базы данных изображениями позволит реализовать функцию визуального поиска, основанную на сопоставлении изображений спор методами компьютерного зрения.

Исследования проводились в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР №122040600008-5).

Литература / References

- Бабенко В. В., Котелина Н. О., Тельнова О. П. Программно-информационное обеспечение палеопалинологической задачи // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2021. № 1(38). С. 27–42. DOI 10.34130/1992-2752_2021_1_27
- Babenko V. V., Kotelina N. O., Telnova O. P. Software and information support for the paleopalynological problem. Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2021, No. 1(38), pp. 27–42. (in Russian)
- Маршалл Д. Е. А., Тельнова О. П., Ветошкина О. С. Экосистемный кризис на рубеже франского и фаменского веков (Южный Тиман) // Докл. АН. 2011. Т. 440. № 6. С. 791–794.
- Marshall J. E. A., Telnova O. P., Vetoshkina O. S. Ecosystem Crisis at the Frasnian–Famennian Boundary (Southern Timan). Doklady Earth Sciences, 2011, V. 440, part 2, pp. 1396–1398.
- Палеонтологический атлас пермских отложений Печорского угольного бассейна / В. А. Молин, А. Б. Вирбицкас, Л. М. Варюхина, Н. В. Калашников, С. К. Пухонто, Л. А. Фефилова, В. А. Гуськов, Г. П. Канев. Л.: Наука, 1983. 325 стр.
- Paleontological atlas of Permian deposits of the Pechora coal basin. V. A. Molin, A. B. Virbitskas, L. M. Varyukhina, N. V. Kalashnikov, S. K. Pukhonto, L. A. Fefilova, V. A. Guskov, G. P. Kanev. Leningrad: Nauka, 1983, 325 pp. (in Russian)

- Ошуркова М. В. Морфология, классификация и описания формародов миоспор позднего палеозоя / М-во природ. ресурсов Рос. Федерации, Рос. акад. наук, Всерос. науч.-исслед. геол. ин-т им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003. 377 с.
- Oshurkova M. V. Morphology, classification and descriptions of form-genera of the Late Paleozoic. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, RAS, A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2003, 377 p. (in Russian)
- Тельнова О. П. Эволюционные тренды спор древнейших наземных растений // Доклады Академии наук. 2005. Т. 401, № 3. С. 373–377.
- Telnova O. P. Evolutionary trends of spores of the oldest land plants. Doklady Earth Sciences, 2005, V. 401, No. 3, pp. 373–377. (in Russian)
- Тельнова О. П. Миоспоры из средне-верхнедевонских отложений Тимано-Печорской провинции. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 136 с.
- Telnova O. P. Miospores from the Middle-Upper Devonian deposits of the Timan-Pechora province. Yekaterinburg: UB RAS, 2007, 136 p. (in Russian)
- Тельнова О. П., Бабикова Н. Н., Котелина Н. О. Актуальность и возможности цифровой трансформации процесса диагностики девонских спор // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVIII Геологического съезда Республики Коми, Сыктывкар, 10–12 апреля 2024 года. Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2024. С. 199–201.
- Telnova O. P., Babikova N. N., Kotelina N. O. Relevance and possibilities of digital transformation of the process of diagnostics of Devonian spores. Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proceedings of the 18th Geological Congress of the Komi Republic, Syktyvkar, April 10–12, 2024. Syktyvkar: Komi SC UB RAS, 2024, pp. 199–201. (in Russian)
- Шестакова М. А. Разработка и заполнение базы данных «Миоспоры позднего палеозоя» с использованием технологий искусственного интеллекта // Вестник Сыктывкарского университета. Серия 1: Математика. Механика. Информатика. 2025. № 1(54). С. 52–68. DOI 10.34130/1992-2752_2025_1_52.
- Shestakova M. A. Development and population of the «Late Paleozoic miospores» database using artificial intelligence technologies. Bulletin of Syktyvkar University, Series 1: Mathematics. Mechanics. Informatics, 2025, No. 1(54), pp. 52–68. (in Russian)
- Babenko V. V., Telnova O. P. Problems and Prospects of Digital Identification of Devonian Spores for the Stratigraphy // Paleontological Journal, 2022. Vol. 56. No. 9. P. 93–99. <https://doi.org/10.1134/S0031030122090040>.
- Raine J. I., Mildenhall D. C., Kennedy E. M. New Zealand fossil spores and pollen: an illustrated catalogue. 4th edition. GNS Science miscellaneous series no. 4. 2011. URL: <https://pal.gns.cri.nz/catalog/index.htm>.
- White J. M. Palynodata Inc. (2008). Palynodata Datafile: 2006 version. Geological Survey of Canada, Open File, 5793, Natural Resources Canada. <https://doi.org/10.4095/225704>.
- Williams John W., Grimm Eric C., Blois Jessica L. et al. The Neotoma Paleocology Database, a multiproxy, international, community-curated data resource // Quaternary Research (United States), 2018. Vol. 89. No. 1. P. 156–177. <https://doi.org/10.1017/qua.2017.105>.

Поступила в редакцию / Received 23.10.2025



Хроника, события, факты • Chronicle, events, facts

34-я Всероссийская научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента»

The 34th All-Russian Scientific Conference «Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-Northern Ural Segment»

On November 25–27, 2025, the 34th Scientific Conference «Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-Northern Ural Segment» was held at the N. P. Yushkin Institute of Geology Komi SC UB RAS. One hundred and twenty participants attended the conference. Sixty-seven researchers and graduate students from research and educational institutions and industrial organizations across Russia presented their papers.

25–27 ноября 2025 года в Институте геологии им. Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН прошла XXXIV научная конференция «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента». В конференции приняли участие 120 человек. Свои доклады представили 67 научных сотрудников и аспирантов из научно-исследовательских и учебных учреждений, производственных организаций России. География участников была довольно обширна — от Кольского полуострова до Иркутска: Кольский научный центр РАН (Апатиты); Санкт-Петербургский государственный университет (Санкт-Петербург); Московский государственный университет имени

М. В. Ломоносова, Сколковский институт науки и технологий, Геологический институт РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, МиМГО имени В. А. Двуреченского» (Москва); Институт геологии, Институт биологии и Институт химии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Территориальный фонд информации Республики Коми (Сыктывкар); Пермский национальный исследовательский политехнический университет (Пермь), Институт горного дела УрО РАН (Екатеринбург), Иркутский государственный университет (Иркутск).

Программой конференции были предусмотрены 45 выступлений участников в разных форматах. И. А. Перовский на пленарной лекции «Вещественный состав вторичных минеральных ресурсов предприятий лесопромышленного комплекса» рассказал, что значительные объемы некондиционного минерального сырья, которые нуждаются в утилизации, являются постоянно образующимися вторичными минеральными ресурсами и могут быть использованы для получения известкового агрохимиката.

В формате научной школы были заслушаны доклады О. С. Котик («Микроскопическое изучение органического вещества нефтегазоматеринских пород»)



Докладчики второго дня конференции

The speakers on the second day of the conference



П. А. Безносков задаёт вопрос В. Н. Панькову (доклад «К вопросу о возрасте верхнего докембрия (риффея) Тиманского кряжа»)

P. A. Beznosov is posing a question to V. N. Pankov (report «On the Age of the Upper Precambrian (Riphean) of the Timan Ridge»)

и Н. С. Смирновой («Применение ГИС в решении геологических задач»). Треть сообщений была сделана в виде онлайн-выступлений (шесть докладов) и стендовых презентаций (девять докладов).

На обсуждение были представлены новые результаты по широкому кругу направлений геологических исследований: геологическому строению территории,



А. В. Колесников выступает с пленарным докладом на тему «Биота эдиакарского типа на Среднем Урале»

A. V. Kolesnikov is delivering a plenary report on «Eidacaran-Type Biota in the Middle Urals»

палеонтологии и стратиграфии докембрия и фанерозоя, палеогеографии, геологии четвертичных отложений, геологии нефти и газа, геологии и минералогии астроблем, минералогии и петрологии, рудогенезу, переработке минерального сырья, геоинформатике.

Большой интерес вызвала серия докладов, в том числе одного пленарного — А. В. Колесникова — о палеобиоте эдиакарского типа. Остатки и следы древних организмов, обнаруженных в разных местах по всему миру, приводят к пересмотру существующих представлений о стратиграфии докембрия (в том числе и на территории Республики Коми), эволюции живых организмов.

Большое внимание привлек доклад В. И. Морковина «Особенности геологического строения Хойлинского блока Войкаро-Сыньинского массива и условия локализации хромовых руд», в котором совместно со старшими коллегами по предварительным результатам работ были сделаны выводы о необходимости адаптации методик для поисков бедных руд, не выходящих на поверхность.

В целом состоявшаяся конференция, безусловно, стала важным событием в научной жизни региона. Ежегодная встреча молодых исследователей на нашей площадке является важным и уже неотъемлемым элементом общения, профессионального диалога и обмена опытом, способствуя установлению и развитию творческих связей между регионами, институтами и производственными организациями, а также исследовательскими группами.

Конференция проведена при финансовой поддержке ООО «Минеральный партнер» (Сыктывкар). Оргкомитет благодарит С. В. Гетманцева, Е. А. Веселкова и А. В. Габова за оказанную помощь и всемерную поддержку научных исследований, проводимых в Институте геологии.

м. н. с. К. С. Попвасев

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

Компьютерная верстка:
Р. А. Шуктомов

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.12.2025. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 7. Тираж 140. Заказ 1258. 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: Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

Адрес: 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