



Vestnik of Geosciences **Вестник геонаук**

Октябрь
October
2023,
№ 10 (346)

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

Главный редактор А. М. Асхабов

Зам. главного редактора И. Н. Бурцев

Зам. главного редактора О. Б. Котова

Ответственный секретарь И. В. Козырева

Chief Editor A. M. Askhabov

Deputy Chief Editor I. N. Burtsev

Deputy Chief Editor O. B. Kotova

Executive Secretary I. V. Kozyreva

Редакционный совет

Л. Н. Андричева, Сыктывкар, Россия
А. И. Антошкина, Сыктывкар, Россия
Т. М. Безносова, Сыктывкар, Россия
М. А. Богдасаров, Брест, Беларусь
М. А. Т. М. Брокманс, Тронхейм, Норвегия
Д. А. Бушнев, Сыктывкар, Россия
Ю. Л. Войтеховский, Апатиты, Россия
А. Д. Гвишиани, Москва, Россия
В. А. Жемчугова, Москва, Россия
А. В. Журавлев, Сыктывкар, Россия
В. А. Каширцев, Новосибирск, Россия
М. Комак, Любляна, Словения
С. В. Кривовичев, Санкт-Петербург, Россия
С. К. Кузнецов, Сыктывкар, 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
В. Н. Пучков, Екатеринбург, Россия
Д. Ю. Пуцаровский, Москва, Россия
А. М. Пыстин, Сыктывкар, Россия
Ш. Сан, 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. Voytekhovsky, Apatity, Russia
A. D. Gvishiani, Moscow, Russia
V. A. Zhemchugova, Moscow, Russia
A. V. Zhuravlev, Syktyvkar, Russia
V. A. Kashirtcev, Novosibirsk, Russia
M. Komac, Ljubljana, Slovenia
S. V. Krivovichev, St. Petersburg, Russia
S. K. Kuznetsov, Syktyvkar, 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
V. N. Puchkov, Yekaterinburg, 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, Ekaterinburg, 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

Пятилетний импакт-фактор
РИНЦ журнала (2022) – 0.324



SCIENTIFIC JOURNAL

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

Former title:

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Five-year RSCI
impact factor (2022) – 0.324

geo.komisc.ru/vestnik

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

Структурные особенности докембрийских образований Приполярного и Полярного Урала: сравнительный анализ
И. Л. Потанов, К. С. Попвасев, А. М. Пыстин3

Structural features of Precambrian formations of Subpolar and Polar Urals: comparative analysis
I. L. Potanov, K. S. Popvasev, A. M. Pystin3

Два эпизода надсубдукционного интрузивного магматизма в пределах Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы
В. Л. Андреичев, А. А. Соболева, Е. Г. Довжикова, Ю. Л. Ронкин 15

Two episodes of subduction-related intrusive magmatism within the Pechora zone of the Pechora Basin basement
V. L. Andreichev, A. A. Soboleva, E. G. Dovzhikova, Yu. L. Ronkin 15

Метабазиты р. Лунвож (Средний Тиман): петрография, минералогия, петрохимия
А. М. Шмакова 26

Metabasites along the Lunvozh river (Middle Timan): petrography, mineralogy, petrochemistry
A. M. Shmakova 26

Образование углеводородных газов доманиковым сланцем при пиролизе в автоклаве в присутствии воды
Д. А. Бушнев, Н. С. Бурдельная, А. А. Ильченко, Я. Д. Сенникова 37

Formation of hydrocarbon gases in domanik shale during hydrous pyrolysis
D. A. Bushnev, N. S. Burdelnaya, A. A. Ilchenko, Ya. D. Sennikova 37

Геолого-геоморфологическое районирование бассейна р. Сейды (восток Большеземельской тундры) на основе цифровой модели рельефа ArticDEM
В. А. Исаков 42

Geological and geomorphological zoning of the Seyda river basin (east of the Bolshezemelskaya tundra) based on the ArticDEM digital elevation model
V. A. Isakov 42

Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область)
С. А. Игловский, А. В. Баженов, Е. Ю. Яковлев 51

Specific spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of the city of Polyarnyye Zori (Murmansk region)
S. A. Iglovsky, A. V. Bazhenov, E. Y. Yakovlev 51

Хроника, события, факты. История науки**Chronicle, events, facts. History of Science**

15-й Международный конгресс по прикладной минералогии: трудный путь из Белгорода в Чэнду 57

The 15th International Congress for Applied Mineralogy: a hard way from Belgorod to Chengdu 57

Проект РФФИ-NSFC: рабочий семинар в Юго-Западном университете науки и технологий (Мяньян) и полевой выезд на рудник Баймулин-Линьхуа (провинция Сычуань) 59

RSF-NSFC project: workshop at the Southwest University of Science and Technology (Mianyang) and field trip to the Baimulin-Linhua mine (Sichuan province) 59

Полевая экскурсия в Национальный парк Цзяньмэнь 62

Field trip to Jiangmen National Park 62

Славный путь геолога-нефтяника (к 70-летию Н. А. Малышева) 63

Glorious path of a petroleum geologist (N. A. Malyshev's 70th anniversary) 63

Правила
оформления
статей



Vestnik
article
Formatting



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.122:551.71(234.851)

DOI:10.19110/geov.2023.10.1

Структурные особенности докембрийских образований Приполярного и Полярного Урала: сравнительный анализ

И. Л. Потапов, К. С. Попвасев, А. М. Пыстин

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
ilpotapov@geo.komisc.ru; kspovasev@geo.komisc.ru; ampystin@geo.komisc.ru

Изучены структурные особенности пород докембрийского разреза Приполярного (верховье р. Кожым) и Полярного Урала (бассейн р. Харбей). Установлено, что структурный облик рассматриваемых образований сформировался в результате проявления нескольких этапов деформации. Общими для докембрия этих районов являются деформации и сопровождающие их метаморфические преобразования пород в раннем протерозое, связанные с орогенными процессами, приведшими к объединению Волго-Уралии и Сарматии, и позднее – с развитием тиманид и уралид. На Полярном Урале установлены метки более раннего этапа структурно-метаморфического преобразования пород (возможно, позднеархейского).

Ключевые слова: Приполярный и Полярный Урал, докембрий, структурный анализ, этап деформации.

Structural features of Precambrian formations of Subpolar and Polar Urals: comparative analysis

I. L. Potapov, K. S. Popvasev, A. M. Pystin

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The structural features of the rocks of the Precambrian section of the Subpolar (upper reaches of the Kozhim River) and Polar Urals (Kharbey River basin) have been studied. We revealed that the structural appearance of the formations under consideration resulted from several stages of deformation. The Precambrian of these regions is characterized by deformations and accompanying metamorphic transformations of rocks in the Early Proterozoic, associated with orogenic processes resulting from the unification of Volga-Uralia and Sarmatia and later with the development of the timanides and uralides. We found markers of an earlier stage of structural-metamorphic transformation of rocks (possibly Late Archean) in the Polar Urals.

Keywords: Subpolar and Polar Urals, Precambrian, structural analysis, stage of deformation.

В северной части Урала докембрийские образования представлены главным образом верхним протерозоем. Относительно небольшие выходы нижнедокембрийских полиметаморфических комплексов (сотни и первые тысячи кв. км), выделенные в основном по структурно-метаморфическим признакам, приурочены к Кожимскому (на Приполярном Урале) и Собскому (на Полярном Урале) поперечным поднятиям (рис. 1).

Стратиграфические взаимоотношения нижне- и верхнедокембрийских толщ установлены в северной части Ляпинского антиклинория на Приполярном Урале и юго-западной части Харбейско-Марункеуского антиклинория на Полярном Урале. При этом раннепротерозойский возраст нижних частей докембрийского разреза корректно обоснован только на Приполярном Урале. Здесь для зерен гранулитоморфного циркона (округлые полифасеточные кристаллы) из гранат-биотитовых гнейсов няртинского метаморфического комплекса по 44 локальным U-Pb (LA-SF-ICP-MS)-изотопным определениям получен возраст 2127 ± 31 млн лет,

интерпретируемый как время проявления раннего этапа метаморфизма пород, а следовательно как верхний возрастной рубеж протолитов метаморфических образований (Пыстина и др., 2019). На Полярном Урале изотопно-геохронологическое обоснование раннепротерозойского возраста нижних частей докембрийского разреза ограничивается единичными Pb-Pb- и U-Pb-датировками циркона из гнейсов и кристаллических сланцев харбейского метаморфического комплекса (Краснобаев, 1986; Пыстина, Пыстин, 2002). Поэтому вопрос о возрасте первичного субстрата метаморфитов остается спорным. В последние годы U-Pb-возрастные определения по циркону и другие изотопно-геохронологические данные открывают возможность для иных интерпретаций этих образований. Так, А. Л. Коновалов и О. В. Удоратина с соавторами (Коновалов и др., 2016; Удоратина и др., 2023) оценивают максимально возможный возраст протолитов метаморфических пород харбейского комплекса как позднеархейский, а Н. С. Уляшева с соавторами (Уляшева

Для цитирования: Потапов И. Л., Попвасев К. С., Пыстин А. М. Структурные особенности докембрийских образований Приполярного и Полярного Урала: сравнительный анализ // Вестник геонаук. 2023. 10 (346). С. 3–14. DOI: 10.19110/geov.2023.10.1

For citation: Potapov I. L., Popvasev K. S., Pystin A. M. Structural features of Precambrian formations of Subpolar and Polar Urals: comparative analysis. Vestnik of Geosciences, 2023, 10 (346), pp. 3–14, doi: 10.19110/geov.2023.10.1

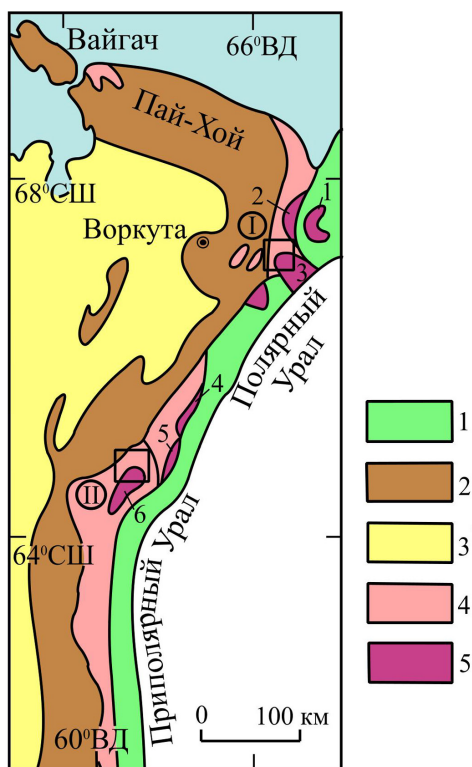


Рис. 1. Схема геологического строения северной части Урала.

Условные обозначения: 1, 2 — палеозойские и мезозойские отложения: 1 — вулканогенно-осадочные, 2 — преимущественно карбонатно-терригенные; 3 — кайнозойские отложения, 4 — слабо-метаморфизованные верхнедокембрийские комплексы, 5 — глубокометаморфизованные нижнедокембрийские и предположительно нижнедокембрийские комплексы (1 — малыкский, 2 — марункеуский, 3 — харбейский, 4 — хордьюский, 5 — неркаюский, 6 — няртинский (никотайшорский)). Римские цифры в кружочках: I — Собское поперечное поднятие, II — Кожимское поперечное поднятие. Черные прямоугольники — районы работ

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the northern part of the Urals. *Legend:* 1, 2 — Paleozoic and Mesozoic deposits: 1 — volcanic-sedimentary, 2 — predominantly carbonate-terrigenous; 3 — Cenozoic deposits, 4 — weakly metamorphosed Upper Precambrian complexes, 5 — deeply metamorphosed Lower Precambrian and presumably Lower Precambrian complexes (1 — Malyk, 2 — Marunkeu, 3 — Kharbey, 4 — Khordyu, 5 — Nerkeyu, 6 — Nyarin (Nikolayshor)). Roman numerals in circles: I — Sob transverse uplift, II — Kozhim transverse uplift. Black rectangles — areas of work

и др., 2022) — не древнее рубежа среднего-позднего рифея.

Тем не менее залегание рифейских вулканогенно-осадочных базальных отложений, представленных на Полярном Урале верхнехарбейской свитой, на глубокометаморфизованных породах харбейского комплекса со стратиграфическим, структурным и метаморфическим несогласием дает основание отнести глубокометаморфизованные толщи к доверхнехарбейским образованиям. А наличие в них упоминавшихся выше единичных раннепротерозойских датировок — к разрезу нижнего протерозоя (Стратиграфические..., 1993; Пыстина, Пыстин, 2002; Государственная..., 2014 и др.).

Целью настоящей статьи является установление структурных особенностей разных частей докембрийского разреза в опорных участках Ляпинского и Харбейско-Марункеуского антиклинориев (в верховье рр. Кожым и Харбей соответственно), сравнительный анализ структур рассматриваемых участков и получение структурных критериев для оценки стратиграфической позиции отдельных стратиграфических подразделений приполярно-полярноуральского докембрия.

Методика исследований

Основу структурных исследований составили полевые наблюдения различных структурных форм в естественных обнажениях горных пород на опорных участках с отбором ориентированных образцов для микроструктурных измерений. При проведении полевых работ и пробоотборе особое внимание уделялось изучению обнажений с диагностируемыми первичными (деформационными) элементами (геометрические формы геологических объектов, контакты геологических тел, слоистость) и обнажений, где видны взаимоотношения структурных элементов разных генераций. Дальнейшая обработка макро- и микроструктурных данных выполнялась с применением стандартных мето-

дов морфолого-геометрического анализа форм (Методы..., 2001). Микроструктурные исследования выполнялись с использованием универсального четырехосного столика Федорова на поляризационном микроскопе.

Принятые в работе обозначения ряда структурных элементов следующие: F — складки, B — шарниры, S — сланцеватость, D — деформации. Каждой генерации элементов присваивался подстрочный индекс, соответствующий порядку образования. За самый ранний этап образования структурного элемента принималась генерация n, соответствующая первичной плоскостной неоднородности (контактам тел, слоистости, флюидальности и т. п.). Для удобства сопоставления структурных элементов в рассматриваемых породах Приполярного и Полярного Урала обозначение этапа деформации (D) дополнено буквенным индексом k или h соответственно (по первой букве названия рек, протекающих на опорных участках — Кожым и Харбей).

Результаты исследований

Приполярный Урал

В соответствии со схемой, принятой Четвертым Уральским межведомственным стратиграфическим совещанием (Стратиграфические..., 1993), и изданными госгеолкартами м-ба 1 : 1 000 000 (Государственная..., 2001; Государственная..., 2007) в приполярноуральском разрезе северной части Ляпинского антиклинория, в ядре Хобеизской антиклинали выделяется нижнепротерозойский няртинский комплекс. Выше залегают верхнепротерозойские образования, представленные (снизу вверх) маньхобеинской, щокурьюнской, пуйвинской, хобеинской, мороинской, саблегорской и лаптопайской свитами.

В последнее десятилетие были получены геологические и изотопно-геохронологические данные, свидетельствующие о том, что маньхобеинская и щоку-



рынская свиты, как и няртинский комплекс, относятся к дорифейским образованиям (Пыстин, Пыстина, 2019). При этом маньхобеинская свита не имеет самостоятельного стратиграфического значения, поскольку выделена на месте низкотемпературных диафторитов по метаморфическим породам, аналогичным тем, которыми сложен няртинский комплекс. Таким образом, верхнепротерозойский разрез Приполярного Урала начинается не с маньхобеинской, а с пуйвинской свиты, как это ранее предполагали М. В. Фишман с Б. А. Голдиным (1963) и В. Н. Пучков (1975). Установленные минимальные возрастные датировки детритовых цирконов из пород пуйвинской свиты (около 900 млн лет) свидетельствуют о том, что нижняя возрастная граница формирования базальных слоев верхнего докембрия Приполярного Урала не выходит за пределы позднего рифея (Пыстин и др., 2019). Актуализированная стратиграфическая схема докембрийских образований северной части Ляпинского антиклинория (Верхнекожимский район) приведена на рис. 2.

На карте няртинский комплекс и маньхобеинская свита выделены одним цветом, т. к. они принадлежат одному структурно-вещественному комплексу, ранее выделявшемуся как николайшорская свита (Фишман, Голдин, 1963). Граница между няртинским комплексом и «маньхобеинской свитой», которую мы в дальнейшем будем выделять в кавычках, показана линией с бегштрихами, направленными в сторону области распространения «маньхобеинской свиты» (рис. 3).

Структурные особенности докембрийских образований в верхнем течении р. Кожым

Основной объем структурных исследований был сосредоточен в верховье р. Кожым от истоков до устья крупного левого притока — р. Бол. Каталамбию, а также в бассейнах ручьев, впадающих в р. Кожым: Кожимвож, Николайшор, Игшор, Сергейшор, Хасаварка, Осею, Понью, Кузпуаю.

В составе няртинского комплекса наиболее распространены гнейсы и кристаллические сланцы. В подчиненном количестве присутствуют амфиболиты, амфиболсодержащие кристаллические сланцы, кварциты и мраморы. Слоистость в породах диагностируется редко в связи с многократным проявлением складчатости и метаморфизма. Первичные плоскостные элементы изредка удается установить в толщах переслаивания пород разного литологического состава и в кварцитах. Плоскостные структуры в метаморфитах представлены полосчатостью (иногда развивающейся по слоистости) и сланцеватостью. Полосчатость выражается в ориентированном распределении порообразующих минералов. Сланцеватость проявлена в субпараллельном расположении минералов группы слюд. В процессе становления современного структурного плана полосчатость и сланцеватость формировались неоднократно, что фиксируется в естественных обнажениях.

Наиболее ранний этап деформации (D_{n+1}^k) в породах няртинского комплекса проявляется в гнейсах и амфиболитах в виде лежащих подобных, сильно сжатых вплоть до изоклинальных складок с субгоризонтальной ориентировкой осевых плоскостей. Такие складки встречаются в центральной части няртинского комплекса (верховье р. Кожым, истоки руч. Кожимвож). Крылья складок падают на юго-запад преимущественно под небольшими углами. Шарниры погружаются на запад и северо-запад под углами до 20° . Ближе к периферийной части няртинского комплекса углы падения полосчатости и сланцеватости увеличиваются до 40° . При этом сланцеватость в северной периклиальной части имеет северное падение, в западной — западное и в восточной — восточное. На сферических диаграммах распределения элементов складок (F) и шарниров (B) приведены на рис. 4. Анализ сферических диаграмм показывает, что полюса крыльев мелких складок первой генерации F_{n+1}^{nr} ложатся на дугу с осью, погружающейся на северо-запад под углами около 70° . Шарниры этих складок B_{n+1}^{nr} имеют северо-западное погружение под углами около 30° .

Подразделения стратиграфической шкалы				Стратиграфические подразделения	
Акротема	Эонотема	Эратема	Система	Приполярный Урал Верхнекожимский район	Полярный Урал Харьбийский район
Протерозой	Верхний Рифей	RF ₃	Венд	Лаптопайская свита	Сядатинская свита
				Саблегорская свита	Немурюганская свита
			Мороинская свита	Наровейская серия	Минисейшорская свита
			Хобеинская свита		Верхнехарьбийская свита
			Пуйвинская свита Ошизская свита		
	Нижний	RF ₂ RF ₁		Щокуринская свита	Париквасьшорская свита
				Няртинский (Николайшорский) комплекс	Лаптаюганская свита
				Харьбийский комплекс	Ханмейхойская свита
			?	?	

Рис. 2. Актуализированные схемы стратиграфии докембрийских образований Приполярного и Полярного Урала
Fig. 2. Updated stratigraphic schemes of Precambrian formations of the Subpolar and Polar Urals

Второй этап деформации (D_{n+2}^k) в породах няртинского комплекса фиксируется наличием цилиндрических складок разной степени сжатости (преимущественно закрытых) с круто ориентированными осевыми поверхностями и полого залегающими шарнирами. Складки данного типа часто образуются по крыльям ранних складок. С этапом деформации D_{n+2}^k можно связать и распространение крутопадающей сланцеватости второй генерации S_{n+2}^{nr} северо-западного простирания.

рания, представляющей собой кливаж осевой плоскости (Потапов, Попвасев, 2017). На сферических диаграммах (рис. 4) плоскостные элементы складок второй генерации F_{n+2}^{nr} ложатся на дугу большого круга. Углы погружения шарниров B_{n+2}^{nr} варьируют от 5 до 25°, направление погружения — северо-западное.

На третьем этапе деформации (D_{n+3}^k) образуются подобные открытые складки третьей генерации F_{n+3}^{nr} , деформирующие крылья складок генерации F_{n+1}^{nr} . На сферических диаграммах (рис. 4) полюса плоскостных элементов складок F_{n+3}^{nr} образуют дугу большого круга с падением на юг и юго-восток. Осевые плоскости залегают субвертикально, с падением на запад и

восток. Шарниры B_{n+3}^{nr} таких складок погружаются на север под пологими углами.

В разрезе «маньхобейнской свиты» преобладают мусковитовые и двуслюдяные кристаллические сланцы, переслаивающиеся с хлорит-амфиболовыми сланцами и слюдястыми полевошпатовыми кварцитами. Среди них встречаются реликты высокотемпературных метаморфитов: гранатовых амфиболитов и гранат-слюдяных кристаллических сланцев. Структурный облик «маньхобейнской свиты» в целом схож с няртинским комплексом. Наблюдения и замеры структурных элементов пород свиты проводились по р. Кожым вблизи устья руч. Сергейшор и в районе г. Хасаварка-Из.

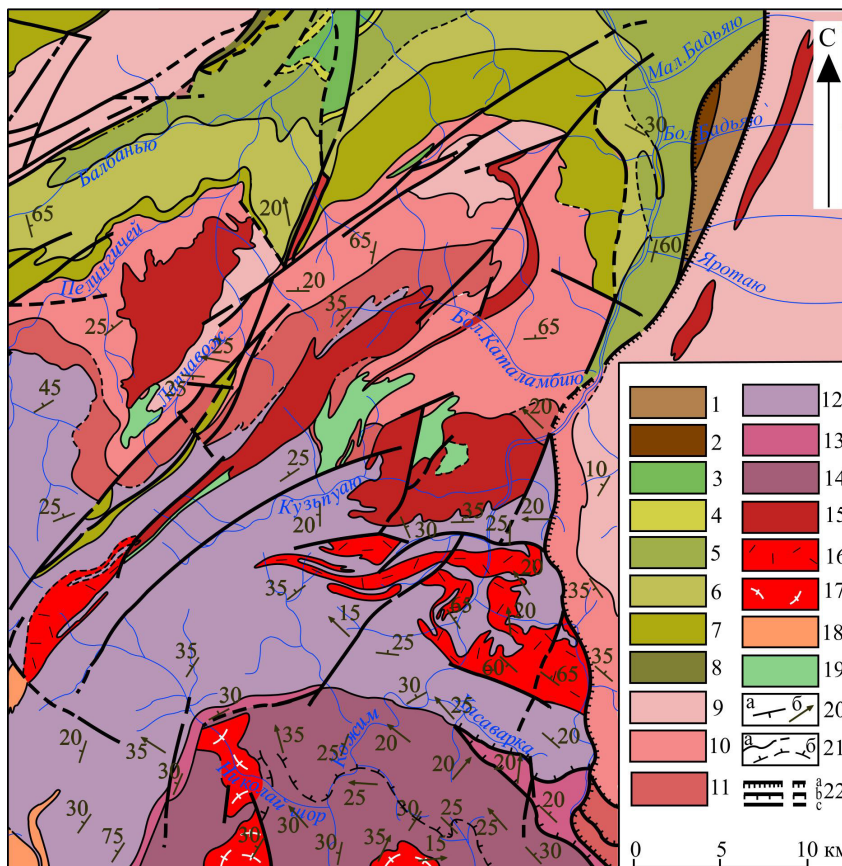


Рис. 3. Геологическая карта северной части Приполярного Урала (по А. М. Пыстину, 2021): 1 — надотамыльская свита (D_{2-3}), 2 — верхнесилурийско-нижнедевонские отложения (S_2-D_1), 3 — силурийские отложения (S_{1-2}), 4 — верхнеордовикские отложения (O_3), 5 — кожимская свита (O_2), 6 — саледская свита (O_{1-2}), 7 — обеизская свита (O_1), 8 — алькесвожская толща (ϵ_3-O_1), 9 — саблегорская свита (RF_3-V), 10 — мороинская свита (RF_3), 11 — хобейнская свита (RF_3), 12 — пуйвинская свита (RF_3), 13 — шокуринская свита (PR_1), 14 — николайшорский метаморфический комплекс, включающий няртинский метаморфический комплекс и «маньхобейскую свиту» (PR_1), 15–19 — гранитоидные комплексы: 15 — сальнеро-маньхамбовский (RF_3-V), 16 — кожимский (RF_3), 17 — николайшорский (PR_1), 18 — парнукский габбро-диоритовый комплекс (RF_3-V), 19 — хаталамбинский габбро-долеритовый комплекс (RF_3-V); 20 — элементы залегания: а — плоскостных структур (слоистости, полосчатости, сланцеватости), б — шарниров; 21 — границы геологических тел: а — стратиграфические и интрузивные, б — граница няртинского комплекса и «маньхобейской свиты»; 22 — тектонические границы: а — шарьяжи и надвиги, б — сбросы и сдвиги, в — крутопадающие дизъюнктивы

Fig. 3. Geological map of the northern part of the Subpolar Urals (after A. M. Pystin, 2021): 1 — Nadotamyl formation (D_{2-3}), 2 — Upper Silurian-Lower Devonian sediments (S_2-D_1), 3 — Silurian sediments (S_{1-2}), 4 — Upper Ordovician sediments (O_3), 5 — Kozhim formation (O_2), 6 — Saled formation (O_{1-2}), 7 — Obyiz formation (O_1), 8 — Alkesvohz formation (ϵ_3-O_1), 9 — Sablegorsk formation (RF_3-V), 10 — Moroya formation (RF_3), 11 — Khobeya formation (RF_3), 12 — Puiva formation (RF_3), 13 — Shchokurya metamorphic complex (PR_1), 14 — Nikolaishor metamorphic complex, including the Nyartin metamorphic complex and the “Mankhobey suite” (PR_1), 15–19 — granitoid complexes: 15 — Salner-Mankhambo (RF_3-V), 16 — Kozhim (RF_3), 17 — Nikolaishor (PR_1), 18 — Parnuksky gabbro-diorite complex (RF_3-V), 19 — Khatalamba gabbro-dolerite complex (RF_3-V); 20 — elements of occurrence: a — of planar structures (bedding, banding, schistosity), b — of plunges; 21 — boundaries of geological bodies: a — stratigraphic and intrusive, b — boundary of the nyartin complex and the “mankhobey suite”; 22 — tectonic boundaries: a — nodules and thrust faults, b — faults and faults dew, c — steeply dipping disjunctives



Первый этап деформации (D_{n+1}^k) с ранними складками генерации F_{n+1}^{mh} (лежачие подобные, сильно сжатые складки) устанавливается на участках, где сохранились реликты гранатовых амфиболитов и гранат-двусланцевых кристаллических сланцев. Иногда они отмечаются в кварцитах. Сферические диаграммы результатов замеров ориентировок крыльев складок F_{n+1}^{mh} и шарниров B_{n+1}^{mh} приведены на рис. 4. Полюса крыльев складок ложатся на дугу большого круга с падением на юго-восток под углом 65° . Шарниры складок погружаются на северо-запад под углом 20° .

Второй этап деформации (D_{n+2}^k) выявляется в разрезах, где кварциты встречаются в виде прослоев в кристаллосланцах. Они смяты в ассиметричные складки F_{n+2}^{mh} разной степени сжатости. Шарниры складок B_{n+2}^{mh} погружаются на северо-запад под пологими углами (рис. 4).

Третий этап деформации (D_{n+3}^k) выражается в развитии открытых складок, деформирующих крылья более ранних складок. На сферических диаграммах (рис. 4) полюса плоскостей складок F_{n+3}^{mh} образуют дугу большого круга с падением на юг под углами 70° . Шарниры погружаются на север под углами до 30° .

Щокуринская свита существенно карбонатная. В нижней части разреза преобладают слюдяные мраморы и известковые слюдяные кристаллические сланцы. Подчинённое значение имеют слюдяные и амфиболсодержащие сланцы и полевошпатовые кварциты. Складчатые структуры хорошо прослеживаются в верховьях руч. Хасаварка и в среднем течении руч. Николайшор.

Реликты раннего этапа деформации (D_{n+1}^k) устанавливаются только в кварцитах и глыбовых развалах мраморов на водоразделе в истоках руч. Хасаварка. В сланцах они практически не сохраняются. На сферических диаграммах (рис. 4) полюса крыльев складок F_{n+1}^{sc} ложатся на дугу большого круга с осевыми плоскостями, падающими на северо-восток. В целом характер реликтовых складок щокуринской свиты и вышеохарактеризованных образований схож. Отличие заключается в том, что шарниры складок B_{n+1}^{sc} погружаются пологими углами на юго-восток, в противоположную сторону в сравнении с шарнирами B_{n+1}^{sc} в породах няртинского комплекса и «маньхобейнской свиты». Это связано с тем, что изученные обнажения щокуринской свиты преимущественно находятся в северо-восточной части Хобеизской антиклинали, тогда как разрезы няртинского комплекса и щокуринской свиты — в западной и центральной частях вышеупомянутой структуры.

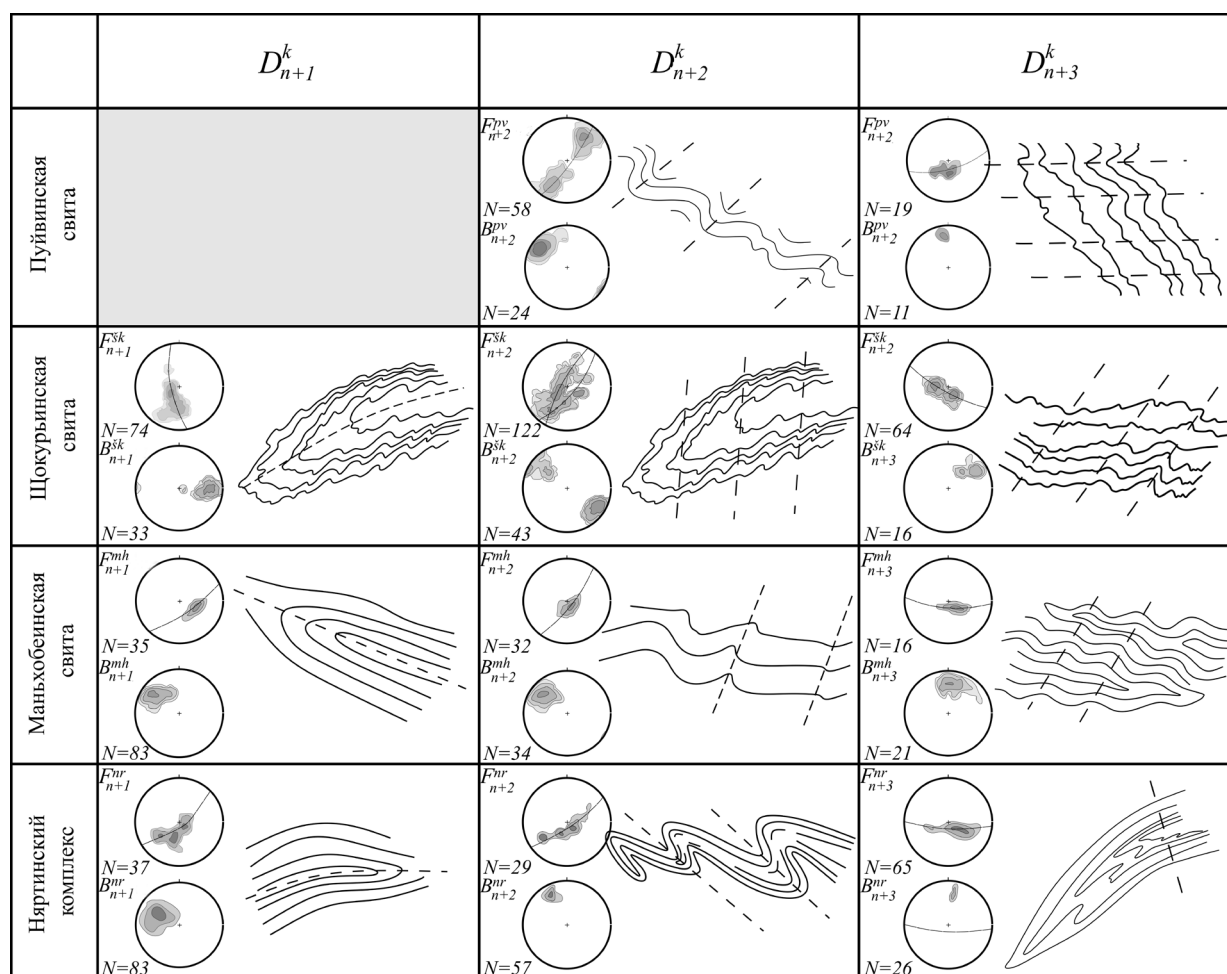


Рис. 4. Соотношения структур для метаморфических комплексов Приполярного Урала с этапами деформаций: F — сферические диаграммы для складок, B — сферические диаграммы для шарниров, равноугольная сетка, нижняя полусфера. N — число замеров структурных элементов

Fig. 4. Correlations of structures for metamorphic complexes of the Subpolar Polar Urals with stages of deformation: F — spherical diagrams for folds, B — spherical diagrams for plunges, equiangular mesh, lower hemisphere. N — number of measurements of structural elements

Второй этап деформации (D_{n+2}^k) проявляется в образовании асимметричных, преимущественно закрытых складок F_{n+2}^{sc} . Складки устанавливаются в толщах переслаивания кварцитов и сланцев, а также в полосчатых кварцитах и мраморах. Шарниры складок B_{n+2}^{sc} погружаются на северо-запад и юго-восток под углами около 20° . На сферической диаграмме (рис. 4) ориентировки крыльев мелких складок F_{n+2}^{sc} ложатся на две дуги большого круга. Рисунок одной дуги (западное поле развития щокурьинской свиты) схож со складками второй генерации F_{n+2}^{sc} в няртинском комплексе и маньхобейнской свите, рисунок другой дуги (восточное поле развития щокурьинской свиты), напротив, отличается от них, что, очевидно, связано с влиянием более поздних деформаций. Шарниры складок B_{n+2}^{sc} при пологом погружении ($0-30^\circ$) отличаются направлением погружения: на северо-восток в западном поле развития щокурьинской свиты и на юго-восток в восточном поле развития щокурьинской свиты.

Третий этап деформации (D_{n+3}^k) в породах щокурьинской свиты приводит к формированию подобных открытых (в центральной и западной частях развития свиты) и лежащих открытых, реже закрытых симметричных складок F_{n+3}^{sc} (в восточной части). Данный тип складок связан с распространением сланцеватости S_{n+3}^{sc} , которая параллельна осевым плоскостям вышеописанных складок. На сферических диаграммах (рис. 4) полюса крыльев складок F_{n+3}^{sc} образуют пояс с двумя максимумами. Один из них совпадает с узором, наблюдаемым на соответствующих диаграммах для пород няртинского комплекса и «маньхобейнской свиты». Шарниры складок B_{n+3}^{sc} полого погружаются на север.

Пуйвинская свита сложена преимущественно хлорит-мусковит-альбит-кварцевыми сероцветными парасланцами, переслаивающимися с зелеными ортосланцами. Из-за интенсивно проявившегося кливажа осевой плоскости во многих участках развития этой свиты первичные взаимоотношения пород и складчатые структуры являются утраченными. Поэтому свита воспринимается как монотонная толща с моноклиальным залеганием пород.

Фрагменты первичных плоскостных структур и складок относительно хорошо фиксируются только в тех разрезах, где отмечаются прослои метапорфиров, хорошо выделяющиеся белым цветом на фоне серого и зеленовато-серого сланцевого окружения (Пыстин, Пыстин, 2002). Основные участки развития метапорфиров приурочены к южному обрамлению Кожимского гранитного массива (левый берег р. Кожым ниже устья руч. Хасаварка и правобережье руч. Хасаварка).

На этапе деформации (D_{n+2}^k), являющимся наиболее ранним для отложений пуйвинской свиты, образуются закрытые асимметричные складки F_{n+2}^{pv} с шарнирами B_{n+2}^{pv} , полого погружающимися на северо-запад (рис. 4). Параллельно осевой поверхности складок проявляется кливаж в виде полосчатости, подчеркнутой тонкими кварцевыми и гранат-кварцевыми прожилками. На стереографической диаграмме для пуйвинской свиты (рис. 4) полюса крыльев складок ложатся на дугу большого круга, а шарниры B_{n+2}^{pv} концентрируются в компактной области.

Второй для пуйвинской свиты этап деформации (D_{n+3}^k) обусловлен образованием концентрических ле-

жащих открытых и закрытых симметричных микро-складок F_{n+3}^{pv} (кренуляционный кливаж) в результате пересечения двух генераций сланцеватости: ранней (S_{n+2}^{pv}) и поздней (S_{n+3}^{pv}). Сланцеватость S_{n+3}^{pv} параллельна осевым поверхностям складок F_{n+3}^{pv} и падает на северо-запад под пологими углами. Шарниры B_{n+3}^{pv} складок F_{n+3}^{pv} погружаются на север и северо-запад под пологими углами.

Полярный Урал

В соответствии со схемой, принятой Четвертым Уральским межведомственным стратиграфическим совещанием (Стратиграфические..., 1993) в докембрийском разрезе Харбейско-Марункеуского антиклинория выделяются (снизу вверх): раннепротерозойские марункеуская, лаптаюганская, ханмейхойская и париквасьшорская свиты. К рифейской части разреза относятся верхнехарбейская, минисейшорская, лаптяхинская, кузьшорская, немурюганская и нюдапаатарская свиты. Завершающая верхнепротерозойский разрез войважтинская свита относится к венду.

При проведении последующих геолого-съемочных и картосоставительских работ стратиграфическая схема докембрийских образований Харбейско-Марункеуского антиклинория многократно претерпевала изменения. Для рассматриваемого нами района (бассейн р. Харбей) в качестве рабочей основы может быть принята схема, утвержденная при подготовке к изданию госгеолкарты масштаба 1 : 200 000 (Государственная..., 2014). В этой схеме в нижней части докембрийского разреза выделяется харбейский метаморфический комплекс раннепротерозойского возраста, включающий (снизу вверх) ханмейхойскую, лаптаюганскую и париквасьшорскую свиты. Верхнедокембрийский разрез начинается с няровейской серии среднерифейского возраста, состоящей из верхнехарбейской и минисейшорской свит. Выше залегают немурюганская свита верхнего рифея и сядатинская свита вендского возраста.

Недавно нами получен конкордантный U-Pb (LA-SF-ICP-MS)-возраст зерен циркона из риолитов, залегающих в нижней части немурюганской свиты — 658 ± 2 млн лет, что подтверждает верхнерифейский возраст этого стратиграфического подразделения (Пыстин и др., 2023). Первые результаты датирования детритовых цирконов из пород нижней части минисейшорской свиты показали, что она сформировалась не раньше второй половины позднего рифея, поэтому выделение ее в качестве среднерифейского стратона является ошибочным (Уляшева и др., 2019). Полученные позднее датировки детритовых цирконов из метаалевролитов верхнехарбейской свиты показали сходство возрастного спектра с соответствующим спектром цирконовых датировок из пород минисейшорской свиты, а также практически аналогичное значение возможного нижнего возрастного рубежа образования терригенных пород — около 700 млн лет назад (Пыстин и др., 2023). С учетом того, что проба из метаалевролитов верхнехарбейской свиты отобрана в 150 м выше ее подошвы, а верхний возраст ограничивается датировкой немурюганских риолитов, был сделан вывод о том, что породы няровейской серии были сформированы в узком возрастном интервале в конце позднего рифея около 750—650 млн лет назад (Пыстин и др., 2023). Актуализирован-

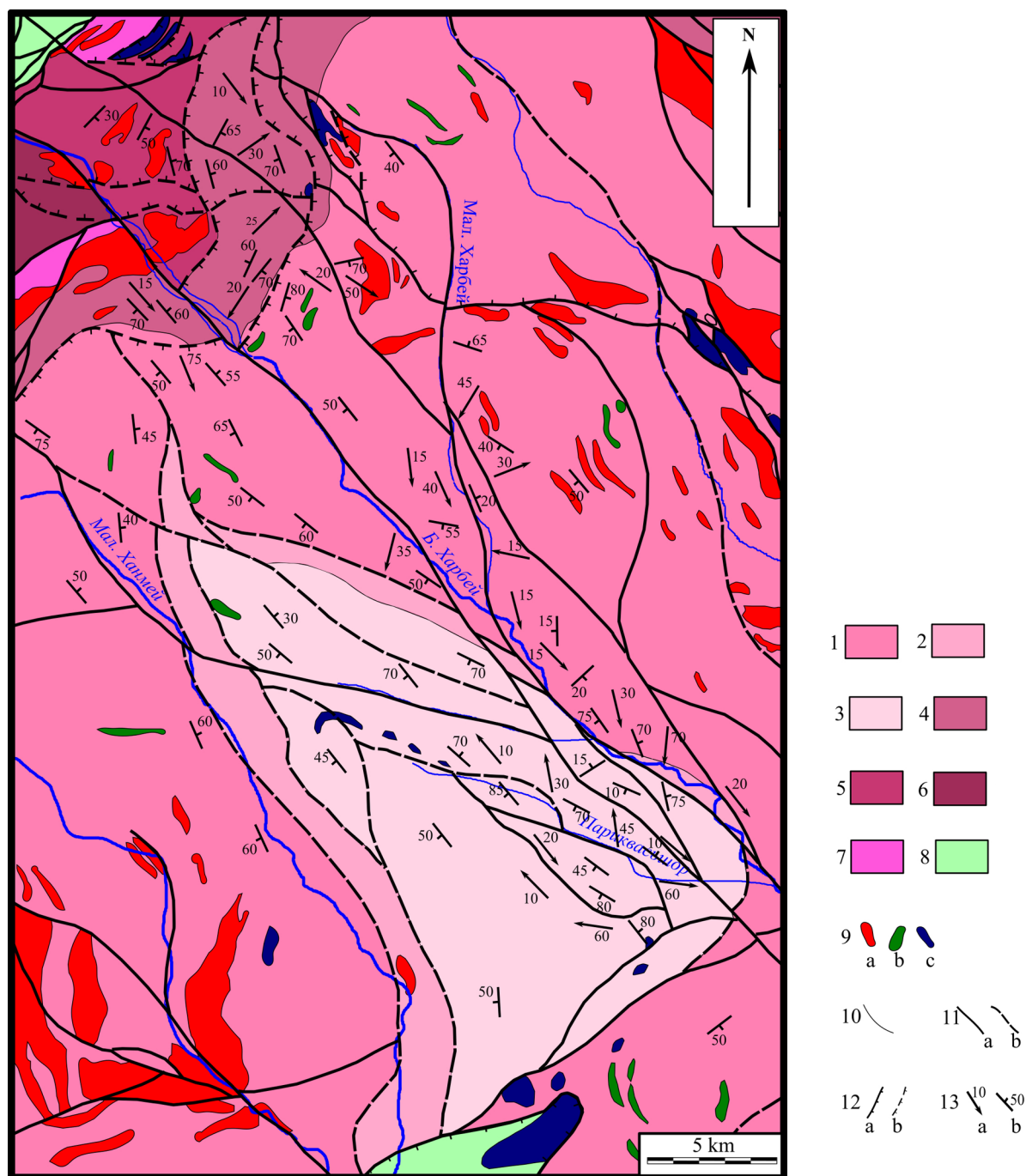


Рис. 5. Схематическая геологическая карта Полярного Урала в бассейне р. Харбей (по Государственная..., 2014 с дополнениями). Условные обозначения: 1–3 — харбейский метаморфический комплекс: 1 — париквасьшорская свита (PR_1), 2 — лаптаюганская свита (PR_1), 3 — ханмейхойская свита (PR_1); 4, 5 — няровейская серия: 4 — верхнехарбейская свита (RF_3), 5 — минисейшорская свита (RF_3); 6 — нерасчлененные отложения няровейской серии (RF_3); 7 — немурюганская свита (RF_3); 8 — отложения палеозоя, нерасчлененные; 9 — интрузии: а — граниты, б — метагаббро, с — метапериidotиты; 10 — границы стратиграфических подразделений и магматических тел; 11 — разломы: а — главные, б — второстепенные; 12 — надвиги: а — главные, б — второстепенные; 13 — элементы структур: а — шарниры (цифрами обозначены углы погружения), б — плоскостные (цифрами обозначены углы падения)

Fig. 5. Schematic geological map of the Polar Urals in the basin of Kharbey river (according to State..., 2014 with additions). Legend: 1–3 — Kharbey metamorphic complex: 1 — Parikvas'shor suite (PR_1), 2 — Laptayugan suite (PR_1), 3 — Khanmeikhoy suite (PR_1); 4–5 — Nyarovey series: 4 — Verkhnekharbey suite (RF_3), 5 — Miniseyshor suite (RF_3); 6 — undifferentiated deposits of the Nyarovey Group (RF_3); 7 — Nemuryugan suite (RF_3); 8 — Paleozoic deposits, undivided; 9 — intrusions: a — granites, b — metagabbro, c — metaperidotites; 10 — boundaries of stratigraphic units and igneous bodies; 11 — faults: a — main, b — secondary; 12 — thrusts: a — main, b — secondary; 13 — structural elements: a — lunges (numbers indicate immersion angles), b — planar (numbers indicate angles of incidence)

ная стратиграфическая схема докембрийских образований Харбейского района Полярного Урала приведена на рис. 2, геологическая карта юго-западной части Харбейско-Марункеуского антиклинория с уточненным возрастом пород няровейской серии — на рис. 5.

Структурные особенности докембрийских образований в бассейне р. Харбей

В ходе исследований нами были изучены структурные особенности ханмейхойской и париквасьшорской свит, относящихся соответственно к нижней и верхней частям харбейского комплекса, а также верхнехарбейской свиты, залегающей в основании рифейского разреза. Непосредственно в полевых условиях проводились замеры структурных элементов по ручьям Ольховый и Хабинсово-Шор, по рекам Мал. Харбей и Мал. Ханмей и их притокам, на обоих берегах р. Бол. Харбей, на водоразделе в районе среднего течения руч. Париквасьшор. Изучение структурных свойств няровейской серии выполнялось в бассейнах ручьев Молибденитовый, Свинцовый, Сланцевый, Скалистый, Каскадный, Медный.

Ханмейхойская свита представлена амфиболитами, амфиболовыми и двуслюдяными плагиогнейсами и кристаллическими сланцами, гранитизированными и мусковитизированными разновидностями этих пород, а также низкотемпературными диафторитами по ним (Государственная..., 2014).

Поскольку амфиболиты ханмейхойской свиты представляют собой массивные и практически нерас-

слоенные породы, то информацию о складках удается получить в основном при изучении гнейсов и сланцев, среди которых встречаются прослои амфиболитов. Складки также можно наблюдать в амфиболитах, содержащих прослои и линзы гнейсов, мигматитов и кварц-полевошпатовых образований.

Полосчатость и первичная сланцеватость отложений ханмейхойской свиты в районе нижней части ручья Мал. Харбей и его притоков падает по азимутам 175—210° под углами от 30 до 55°, в бассейне ручья Париквасьшор отмечены как северо-восточные азимуты падения 65—85° под углами 30—80°, так и юго-западные под углами от 5 до 50°. Полученные данные о складчатых структурах ханмейхойской свиты позволяют выделить четыре основных этапа деформаций.

В первый этап деформации (D_{n+1}^h) формируются наиболее ранние из наблюдаемых в ханмейхойской свите складки F_{n+1}^{hn} — концентрические сжатые, иногда закрытые, с падением крыльев в основном на юго-запад под углами 40—60°, осевые поверхности складок круто падают на запад и юго-запад. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок ложатся вдоль дуги большого круга северо-восточного простирания, шарниры B_{n+1}^{hn} погружаются главным образом на юго-запад под углами от 30 до 80°, протягиваясь по дуге большого круга в небольшом отрезке.

Со вторым этапом (D_{n+2}^h) связано образование крупных, сильно сжатых подобных складок F_{n+2}^{hn} с круто падающими осевыми поверхностями. Крылья скла-

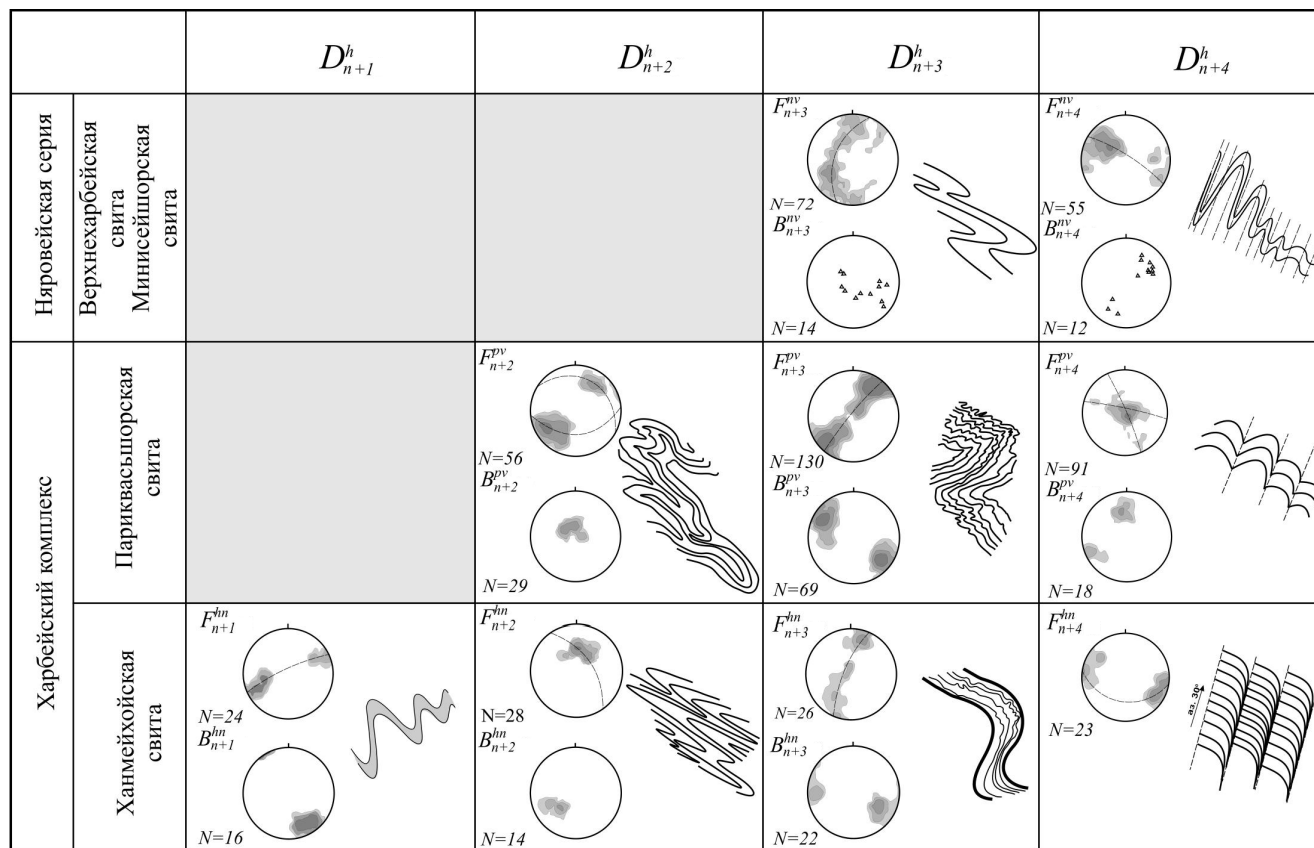


Рис. 6. Соотношения структур для метаморфических комплексов Полярного Урала с этапами деформаций: F — сферические диаграммы для складок, B — сферические диаграммы для шарниров, равноугольная сетка, нижняя полусфера. N — число замеров структурных элементов

Fig. 6. Correlations of structures for metamorphic complexes of the Polar Urals with stages of deformation: F — spherical diagrams for folds, B — spherical diagrams for plunges, equiangular mesh, lower hemisphere. N — number of measurements of structural elements



док погружаются на юг, юго-запад и северо-восток под углами от 55 до 85°. Осевые поверхности имеют крутое падение как на северо-восток, так и на юго-запад. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок ложатся вдоль дуги большого круга юго-восточного простирания, шарниры B_{n+2}^{hn} погружаются на юго-запад под средними углами в компактной области.

В ходе третьего этапа деформаций (D_{n+3}^h) образуются цилиндрические, лежащие, асимметричные, подобные, чаще закрытые, реже открытые складки F_{n+3}^{hn} , в замках которых иногда видны мелкие складки волочения. Крылья круто падают на юго-запад и северо-восток. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок ложатся вдоль дуги большого круга, шарниры B_{n+3}^{hn} погружаются по азимутам от 100 до 120° под углами от 10 до 40°, и также по азимутам от 265 до 285° под углами от 5 до 20°.

Четвертый этап деформаций (D_{n+4}^h) фиксируется наличием асимметричных опрокинутых, реже лежащих, открытых или закрытых складок F_{n+4}^{hn} с осевыми поверхностями, падающими на запад и восток под малыми углами. Шарниры погружаются под пологими углами на север и юг. Ближе к контакту с породами норовейской серии, в районе ручьев Каскадный и Скалистый, углы погружения осевых поверхностей и крыльев складок становятся более крутыми. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок F_{n+4}^{hn} распределяются по дуге большого круга юго-восточного простирания.

Париквасьшорская свита представлена кристаллическими сланцами, гнейсами, амфиболитами и кварцитами. В отличие от ханмейхойской свиты, здесь практически везде наблюдается переслаивание слоев разного состава, а неравномерная их мощность обуславливает большое разнообразие морфологии складок.

Простирание плоскостных элементов в породах париквасьшорской свиты в основном северо-западное, в южной части участка — субширотное, зеркала полосчатости и ранней сланцеватости падают на северо-восток и юго-запад под углами от 60 до 90°.

Наиболее ранний, по нашим наблюдениям, этап деформации пород париквасьшорской свиты фиксируется сжатыми, иногда изоклинальными асимметричными складками с круто погружающимися осевыми поверхностями. Крылья складок круто падают на северо-восток и юго-запад. Шарниры погружаются на северо-запад и юго-восток под углами от 40 до 85°, нередко можно наблюдать их ундуляцию под воздействием поздних деформаций. Складки этой генерации четко прослеживаются на откартированном нами участке в районе озера Вазей-Ты, где хорошо видно четкое северо-западное простирание их крыльев и осевых поверхностей (Потапов, Пыстин, 2020). Сопоставление складчатой структуры пород париквасьшорской и ханмейхойской свит показывает, что рассматриваемая генерация складок сопоставима со складками F_{n+2}^{hn} . Поэтому для этого этапа деформации и его структурных элементов мы использовали обозначение $n+2$ (D_{n+2}^h , F_{n+2}^{ps} , S_{n+2}^{ps} , B_{n+2}^{ps}), а для последующих этапов — $n+3$ и $n+4$. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок F_{n+2}^{ps} распределяются по дугам большого круга, шарниры B_{n+2}^{ps} — по дугам, совпадающим с распределением полюсов складок генерации F_{n+3}^{ps} , что ука-

зывает на то, что складки F_{n+2}^{hn} образовались раньше складок следующего этапа деформации.

Следующий этап деформации — (D_{n+3}^h) — в породах париквасьшорской свиты маркируется по асимметричным, чаще открытым лежащим, реже закрытым складкам F_{n+3}^{ps} , осложненным в ядерных частях более мелкими асимметричными складками волочения. Они главным образом развиты по субвертикальным крыльям складок F_{n+2}^{ps} . Осевые поверхности складок F_{n+3}^{ps} падают под углами 5—30° на север и юг, осевой кливаж наблюдается редко. Шарниры B_{n+3}^{ps} погружаются на северо-запад и юго-восток под углами от 0 до 30°. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок F_{n+3}^{ps} распределены по дуге большого круга, часть полюсов крыльев, в основном закрытых асимметричных мелких складок, распределяются по дуге малого круга, а их шарниры распределены внутри сферического треугольника. То есть мелкие складки ориентируются в виде дивергентного веера, осложняя крупные складки.

Генерация F_{n+4}^{ps} представлена мелкими асимметричными, опрокинутыми, иногда лежащими, открытыми, реже закрытыми или сжатыми складками. Осевые поверхности, параллельные поздней сланцеватости S_{n+4}^{ps} , падают на запад и восток под углами от 10 до 40°. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок F_{n+4}^{ps} распределяются по двум дугам большого круга юго-восточного и восточного простирания. Шарниры B_{n+4}^{ps} погружаются на север и юго-запад под углами 5—20°.

В породах верхнехарбейской свиты проявлена сланцеватость двух направлений. Первая из них, более ранняя, распространена в обнажениях пород в низовьях руч. Скалистый и в верховьях руч. Сланцевый. Для нее характерно падение плоскостей по азимуту 190—220° и 0—50° под углами 50—80°. Вторая (поздняя) разновидность сланцеватости распространена в породах по ручьям Молибденитовый, Свинцовый, Сланцевый, Медный, Каскадный и имеет ориентировки падения по азимуту от 80 до 125°, с углами падения от 30 до 50°. В районе руч. Каскадный углы падения сланцеватости достигают 70—90°.

Для верхнехарбейской свиты наиболее ранние складки F_{n+3}^{nv} , образованные в ходе третьего деформационного этапа (D_{n+3}^h), развиты по первичной сланцеватости, а также по прослоям метапесчаников и металевролитов, имеют ориентировки, согласные сланцеватости северо-восточного и юго-восточного простирания (рис. 6). Осевые поверхности ранних асимметричных подобных сжатых или закрытых складок F_{n+3}^{nv} падают на юг и юго-запад под средними и малыми углами. На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок F_{n+3}^{nv} распределяются по дуге большого круга северо-восточного простирания, шарниры B_{n+3}^{nv} мелких складок погружаются на юго-восток и северо-запад под углами от 50 до 60°, реже 10—15°, при этом область их погружения совпадает с распределением полюсов складок генерации F_{n+4}^{nv} .

Образованная в ходе следующего деформационного этапа (D_{n+4}^h) генерация F_{n+4}^{nv} представлена асимметричными подобными сжатыми складками с осевыми поверхностями, падающими на юго-восток под крутыми углами и погружающимися на северо-восток и юго-запад шарнирами B_{n+4}^{nv} под углами 20—30°.

На стереографических диаграммах (рис. 6) полюса крыльев складок F_{n+4}^{nv} распределяются по дуге большого круга юго-восточного простирания. Простирание осевых поверхностей в целом совпадает с ориентировкой осложненного разломами контакта ханмейхойской и верхнехарьейской свит.

Обсуждение результатов

Приведенные выше результаты структурных исследований показывают, что в докембрийском разрезе как Приполярного, так и Полярного Урала выделяются две группы структурно-вещественных комплексов. Первая включает высокометаморфизованные образования, в разной степени претерпевшие средне- и низкотемпературный диафторез. Структурный рисунок таких комплексов сформирован в результате поэтапных масштабных деформаций. Широко распространены подобные сильно сжатые, вплоть до изоклинальных, складки, которые, в свою очередь, смяты в складки различной степени сжатости. К таким образованиям на Приполярном Урале относятся породы няртинского комплекса, «маньхобеинской» и щокурьинской свит, на Полярном Урале — стратиграфические подразделения, составляющие харьейский комплекс. Вторую группу составляют слабометаморфизованные толщи, залегающие на глубокометаморфизованных образованиях со стратиграфическим, структурным и метаморфическим несогласием. Породы относительно слабо деформированы. Отмечается развитие малоамплитудных складок разной степени сжатости. Ранний этап деформаций в слабометаморфизованных толщах коррелируется со вторым-третьим этапами структурного преобразования глубокометаморфизованных пород. Приведенные данные подтверждают принадлежность двух выделенных групп структурно-вещественных комплексов Приполярного и Полярного Урала к разным структурным этапам и являются дополнительным аргументом в пользу необходимости корректировки существующих схем стратиграфии докембрия этих районов.

Ранний этап деформации (D_{n+1}^k) в высокометаморфизованных образованиях Приполярного Урала (няртинского комплекса, «маньхобеинской» и щокурьинской свит) связан с орогенными процессами, сопровождавшими объединение Волго-Уралии и Сарматии. Это эндогенное событие, имевшее место 2.2—2.0 млрд лет назад (Bogdanova et al., 2008), проявилось также в метаморфизме пород, достигавших условий высокотемпературных стадий амфиболитовой фации и, возможно, гранулитовой фации (Пыстин, 1991; Пыстина, Пыстин, 2002). На Полярном Урале с этим этапом деформации коррелируются ранние структурные преобразования пород париквасьшорской свиты, залегающей в верхней части харьейского комплекса. Р-Т-параметры метаморфизма пород были ниже, чем на Приполярном Урале: соответствовали низким ступеням амфиболитовой фации. При этом ранний этап деформации пород париквасьшорской свиты для нижней части харьейского комплекса (ханмейхойской и, вероятно, лаптаюганской свит) был вторым. Это может указывать на более древний возраст субстрата метаморфитов ханмейхойской и лаптаюганской свит (возможно, позднеархейский) и более раннее прояв-

ление первого этапа деформации в породах харьейского комплекса (D_{n+1}^h). Реальность наличия архейских субстанций в кристаллических комплексах Полярного Урала подтверждается присутствием в малыкском метаморфическом комплексе, расположенном к востоку от харьейского (рис. 1), метабазитов, возраст которых по результатам U-Pb-изотопного датирования цирконов 2736 ± 42 млн лет (Душин и др., 2008). Кроме того, в парасланцах верхнехарьейской свиты присутствуют сопоставимые по возрастным параметрам (около 2700 млн лет) слабоокатанные детритовые цирконы, поступление которых в осадочный бассейн отложения могло происходить из близрасположенных первичных источников сноса (Пыстин и др., 2023).

Следующий этап деформации (D_{n+2}^k и D_{n+3}^k) был общим для пород всего докембрийского разреза и первым для рифейских образований как на Приполярном, так и на Полярном Урале и сопровождался метаморфизмом пород, который для ранее метаморфизованных дорифейских комплексов был повторным. На Приполярном Урале, где степень изученности метаморфизма пород более высокая, показано, что этот процесс проявился зонально в Р-Т-условиях от низких ступеней амфиболитовой и всего интервала эпидот-амфиболитовой фации в ядре Хобеизской антиклинали до высоких и средних ступеней зеленосланцевой фации на крыльях этой структуры (Тимонина, 1980; Пыстин, 1991; Попвасев, 2022). Деформация пород и их метаморфизм связаны с развитием орогена тиманид-протоуралид.

Последний из выделенных этапов деформации (kD_{n+3} и hD_{n+4}) привел к усложнению структурного рисунка всех рассматриваемых стратиграфических подразделений: деформации крыльев и осевого кливажа-сланцеватости ранее сформированных складок, появлению поздней сланцеватости в зонах развития разрывных нарушений, в том числе на границах нижнего и верхнего структурных этажей. При этом на Приполярном Урале наиболее масштабным изменениям были подвержены ранее глубокометаморфизованные и дислоцированные породы, слагающие краевые части ядра Хобеизской антиклинали (верхние уровни няртинского комплекса, «маньхобеинская» и щокурьинская свиты). На Полярном Урале, напротив, низкотемпературный диафторез и поздняя сланцеватость в ранее глубокометаморфизованных породах проявились не столь значительно. Кроме того, в породах нижних частей харьейского комплекса (ханмейхойская свита), судя по результатам Sm/Nb- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -датирования амфиболитов (Уляшева и др., 2022) и U/Pb (LA-ICP-MS)-датирования цирконов из плагиомигматитов (Удоратина и др., 2023), проявился предшествующий низкотемпературному диафторезу высокотемпературный метаморфизм в возрастном интервале около 390—350 млн лет назад. Время завершения высокотемпературных преобразований в породах харьейского комплекса (350 млн лет назад) может быть принято за нижний возрастной рубеж проявления низкотемпературных метаморфических изменений и связанных с ними структурных преобразований пород (D_{n+3}^k и D_{n+4}^k). Представляется очевидным, что поздние деформации и сопровождающие их метаморфические изменения докембрийских толщ связаны с развитием Уральского орогена.



Выводы

Таким образом, изучение структурных особенностей докембрийских образований Приполярного и Полярного Урала на опорных участках Ляпинского и Харбейско-Марункеуского антиклинориев (в верховье рр. Кожым и Харбей соответственно) с использованием имеющихся сведений по метаморфизму пород, а также новых изотопно-геохронологических данных приводит к заключению, что структурный облик приполярно-полярноуральского докембрия сформировался в результате проявления нескольких этапов деформации. Общими для докембрия рассматриваемых районов Приполярного и Полярного Урала являются деформации и сопровождающие их метаморфические преобразования пород в раннем протерозое, связанные с орогенными процессами, приведшими к объединению Волго-Уралии и Сарматии, и позднее — с развитием тиманид и уралид. На Полярном Урале установлены метки более раннего этапа структурно-метаморфического преобразования пород (возможно, позднеархейского). Кроме того породы харбейского комплекса, в отличие от няртинского комплекса и других полиметаморфических образований Приполярного Урала, испытали высокотемпературные метаморфические изменения пород в возрастном интервале около 390–350 млн лет назад (Уляшева и др., 2022; Удоратина и др., 2023).

Практические результаты проведенных исследований заключаются в получении дополнительных аргументов для обоснования представления о принадлежности «маньхобеинской» и щокуринской свит Приполярного Урала к образованиям дорифейского структурного этажа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ. Проект № 22-27-00119.

Литература/ References

- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист Q-40, 41 — Воркута. Объяснительная записка / Н. Г. Берлянд, В. М. Богомазов, Г. М. Важенин и др. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2001. 342 с.
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000. Sheet Q-40, 41 — Vorkuta. Explanatory letter. N. G. Berlyand, V. M. Bogomazov, G. M. Vazhenin et al. St. Petersburg, VSEGEI map factory, 2001, 342 p. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000. Лист Q-41 — Воркута. Объяснительная записка / М. А. Шишкин, А. П. Астапов, Н. Б. Кабатов и др. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2007. 541с.
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000. Sheet Q-41 — Vorkuta. Explanatory letter. M. A. Shishkin, A. P. Astapov, N. B. Kabatov and others. St. Petersburg: VSEGEI map factory, 2007, 541 p. (in Russian)
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. 2-е изд. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII (Обской). Объяснительная записка / В. А. Душин, О. П. Сердюкова, А. А. Малюгин и др. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 384 с.
- State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. Series Polar-Urals. Sheet Q-42-VII, VIII. Explanatory note. V. A. Dushin, O. P. Serdukova, A. A. Malugin et al. St. Petersburg: VSEGEI, 2014, 384 p. (in Russian)
- Душин В. А., Бурмако П. Л., Ронкин Ю. Л. и др. Состав и новые возрастные датировки метагабброидов малыкского комплекса на Полярном Урале // Структурно-вещественные комплексы и проблемы геодинамики докембрия фанерозойских орогенов: Материалы Междун. науч. конф. (III Чтения памяти С. Н. Иванова). Екатеринбург, 2008. С. 27—29.
- Dushin V. A., Burmako P. L., Ronkin Yu. L. et al. Composition and new age dating of metagabbroids of the Malyk complex in the Polar Urals. Structural-material complexes and problems of geodynamics of the Precambrian Phanerozoic orogens: Proceedings of the International Scientific Conference (The 3rd Readings in memory of S. N. Ivanov). Ekaterinburg, 2008, pp. 27—29. (in Russian)
- Коновалов А. Л., Лохов К. И., Черкашин А. В., Вакуленко О. В. О тектонической границе между метаморфическими сланцевыми и кристаллическими образованиями позднего протерозоя Харбейского антиклинория (Полярный Урал) // Региональная геология и металлогения. 2016. № 68, С. 5—20.
- Konovalov A. L., Lokhov K. I., Cherkashin A. V., Vakulenko O. V. On the tectonic boundary between metamorphic shale and crystalline formations of the Late Proterozoic Kharbey anticlinorium (Polar Urals). Regional Geology and Metallogeny, No. 68, 2016, pp. 5—20. (in Russian)
- Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. М.: Наука, 1986. 152 с.
- Krasnobaev A. A. Zircon as an indicator of geological processes. Moscow: Nauka, 1986, 152 p. (in Russian)
- Методы структурного анализа полиметаморфических комплексов / А. И. Мельников, Е. П. Васильев, Л. З. Резницкий и др. / Под ред А. И. Сизых. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 160 с.
- Methods of structural analysis of polymetamorphic complexes. A. I. Melnikov, E. P. Vasiliev, L. Z. Reznitsky et al. Edited by A. I. Sizykh. Moscow: Internet Engineering, 2001, 160 p. (in Russian)
- Попвасев К. С. Минералогия и P-T условия образования амфиболитов няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты Приполярного Урала // Вестник Пермского университета. Геология. 2022. Т. 21. № 3. С. 216—228. DOI: 10.17072/psu.geol.21.3.216
- Popvasev K. S. Mineralogy and P-T conditions for the formation of amphibolites of the Nyarta metamorphic complex and the Mankhobein formation of the Subpolar Urals. Bulletin of Perm University, Geology, 2022, V. 21, No. 3, pp. 216—228. (in Russian)
- Потанов И. Л., Попвасев К. С. Структурная эволюция докембрийских пород северной части Приполярного Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 10. С. 9—20.
- Potapov I. L., Popvasev K. S. Structural evolution of Precambrian rocks of the northern part of the Subpolar Urals. Vestnik of IG Komi SC UB RAS, 2017, No. 10, pp. 9—20. (in Russian)
- Потанов И. Л., Пыстин А. М. Структурная эволюция пород париквасьшорской свиты харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал) // Известия

- Коми НЦ УрО РАН. Серия «Науки о Земле». № 6 (46). Сыктывкар, 2020. С. 49–60.
- Potapov I. L., Pystin A. M. Structural evolution of rocks of the Parikkavasshorsk suite of the Kharbey metamorphic complex (Polar Urals). Proc. Komi SC UB RAS. Earth Science Series. No. 6 (46), Syktyvkar, 2020, pp. 49–60. (in Russian)
- Пучков В.Н. Структурные связи Приполярного Урала и смежной части Русской платформы. Л.: Наука, 1975. 208 с.
- Puchkov V. N. Structural connections of the Subpolar Urals and the adjacent part of the Russian Platform. Leningrad: Nauka, 1975, 208 p. (in Russian).
- Пыстин А. М. Карта метаморфизма Приполярного и южной части Полярного Урала / Коми НЦ УрО АН СССР. Сыктывкар, 1991. 20 с. (Науч. докл.).
- Pystin A. M. Map of metamorphism of the Subpolar and southern parts of the Polar Urals. Series of preprints "Scientific reports". Komi SC UB USSR AS. Syktyvkar, 1991, 20 p. (in Russian)
- Пыстин А. М., Пыстина Ю. И. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект // Труды КарНЦ РАН. Геология докембрия. 2019. № 2. С. 34–52. DOI: 10.17076/geo904
- Pystin A. M., Pystina Yu. I. Precambrian of the Subpolar Urals: chronostratigraphic aspect. Proceedings of the Karelian RC RAS, Precambrian Geology, 2019, No. 2, pp. 34–52. (in Russian)
- Пыстин А. М., Пыстина Ю. И., Хубанов В. Б. Первые результаты U-Pb датирования детритовых цирконов из базальных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала. Докл. АН, 2019. Т. 488. № 2. С. 54–57. doi:10.31857/S0869-56524882172-175
- Pystin A. M., Pystina Yu. I., Khubanov V. B. First results of U-Pb dating of detrital zircons from basal deposits of the Upper Precambrian of the Subpolar Urals. Dokl. AS, 2019, V. 488, No. 2, pp. 54–57. (in Russian)
- Пыстин А.М. Геологическое наследие Б.А. Голдина. Вестник геонаук. 2021. № 12. С. 51–60. doi:10.19110/geol.2021.12.5
- Pystin A. M. Geological heritage of B. A. Goldin. Vestnik of Geosciences, 2021, No. 12, pp. 51–60. (in Russian)
- Пыстин А. М., Гракова О. В., Пыстина Ю. И. и др. Результаты U-Pb (LA-SF-ICP-MS)-датирования цирконов из базальных отложений верхнего докембрия Приполярного и Полярного Урала // Стратиграфия докембрия: проблемы и пути решения. Материалы VIII Российск. конф. по проблемам геологии докембрия. СПб.: Свое издательство, 2023. С. 129–131.
- Pystin A. M., Grakova O. V., Pystina Yu. I. et al., Results of U-Pb (LA-SF-ICP-MS) dating of zircons from basal deposits of the Upper Precambrian of the Subpolar and Polar Urals. Precambrian Stratigraphy: problems and solutions. Mater. VIII Russian conf. on problems of Precambrian geology. St. Petersburg: Svoe publishing house, 2023, pp. 129–131. (in Russian)
- Пыстина Ю. И., Пыстин А. М. Цирконовая летопись уральского докембрия. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2002. 167 с.
- Pystina Yu. I., Pystin A. M. Zircon chronicle of the Ural Precambrian. Yekaterinburg: Publishing house of the UB RAS, 2002, 167 p. (in Russian)
- Пыстина Ю. И., Пыстин А. М., Хубанов В. Б. Нижний докембрий в структуре палеозойда на Приполярном Урале // Докл. АН, 2019. Т. 486. № 5. С. 72–76. doi: 10.31857/S0869-56524865572-576
- Pystina Yu. I., Pystin A. M., Khubanov V. B. Lower Precambrian in the Paleozoic structure in the Subpolar Urals. Dokl. AS, 2019, V. 486, No. 5, pp. 72–76. (in Russian)
- Стратиграфические схемы Урала (докембрий, палеозой). Екатеринбург: Уралгеолком, 1993.
- Stratigraphic diagrams of the Urals (Precambrian, Paleozoic). Yekaterinburg: Uralgeolkom, 1993. (in Russian)
- Тимошина Р. Г. Петрология метаморфических пород Приполярного Урала. Л.: Наука, 1980. 102 с.
- Timonina R. G. Petrology of metamorphic rocks of the Subpolar Urals. Leningrad: Nauka, 1980. 102 p. (in Russian)
- Удуратина О. В., Уляшева Н. С., Хубанов В. Б. и др. Плагиомигматиты ханмейхойской свиты (харбейский метаморфический комплекс, Полярный Урал): новые данные // Геодинамика и минерогения Северной Евразии: Материалы VI Межд. науч. конф. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского университета, 2023. С. 530–533.
- Udoratina O. V., Ulyasheva N. S., Khubanov V. B. et al. Plagiomigmatites of the Khanmeikhoi Formation (Kharbei metamorphic complex, Polar Urals): new data). Geodynamics and minerageny of Northern Eurasia. Proc. VI Int. Scientific conf. Ulan-Ude: Buryat University Publishing House, 2023, pp. 530–533. (in Russian)
- Уляшева Н.С., Пыстина Ю.И., Пыстин А. М. и др. Первые результаты U-Pb LA-SF-ICP-MS-датирования детритовых цирконов из среднерифейских (?) терригенных отложений Полярного Урала // Докл. РАН. 2019. Т. 485. № 4. С. 488–492.
- Ulyasheva N. S., Pystina Yu. I., Pystin A. M. et al. First results of U-Pb LA-SF-ICP-MS dating of detrital zircons from Middle Riphean (?) terrigenous deposits of the Polar Urals). Dokl. Earth Sciences, 2019, V. 485, No. 4, pp. 488–492. (in Russian)
- Уляшева Н. С., Серов П. А., Травин А. В. Sm/Nd- и $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -изотопно-геохронологические исследования амфиболитов ханмейхойской свиты харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал) // Докл. РАН. Науки о земле. 2022. Т. 506. № 2. С. 194–201.
- Ulyasheva N. S., Serov P. A., Travin A. V. Sm/Nd- and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -isotope-geochronological studies of amphibolites of the Khanmeikhoi Formation of the Kharbei metamorphic complex (Polar Urals). Dokl. Earth Sciences, Geosciences, 2022, V. 506, No. 2, pp. 194–201. (in Russian)
- Фишман М. В., Голдин Б. А. Гранитоиды центральной части Приполярного Урала. Л.: Наука, 1963. 105 с.
- Fishman M. V., Goldin B. A. Granitoids of the central part of the Subpolar Urals). Leningrad: Nauka, 1963, 105 p. (in Russian)
- Bogdanova S. V., Bingen B., Gorbatshev R. et al. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia. Precambrian Research, 2008. No. 160. pp. 23–45.

Поступила в редакцию / Received 20.09.2023



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.93:552.32 (470.1)

DOI:10.19110/geov.2023.10.2

Два эпизода надсубдукционного интрузивного магматизма в пределах Печорской зоны фундамента Печорской синеклизы

В. Л. Андреичев¹, А. А. Соболева¹, Е. Г. Довжикова², Ю. Л. Ронкин³¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
andreichev@geo.komisc.ru; aa_soboleva@mail.ru² Ухтинский государственный технический университет, Ухта³ Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург

U-Pb (SIMS, SHRIMP-RG)-возрасты циркона из интрузивных пород Печорской зоны Большеземельского мегаблока фундамента Печорской синеклизы, вскрытых двумя скважинами на глубинах ~ 4.5 км, свидетельствуют о двух эпизодах островодужного магматизма. Первый имел место в конце рифея, а второй приурочен к границе раннего и позднего венда. Возраст габбро-диоритов из скв. 1-Северный Савинобор, интерпретируемых как производные начальной стадии развития островной дуги, составляет 673 ± 7 млн лет. Позднеостроводужные плагиограниты скв. 1-Новая имеют возраст 564 ± 5 млн лет и предшествуют орогенным гранитоидам Припечорской разломной зоны с U-Pb-возрастами 555–544 млн лет.

Ключевые слова: Печорская синеклиза, Печорская зона, неопротерозой, фундамент, габбродиориты, плагиограниты, циркон, U-Pb-возраст.

Two episodes of subduction-related intrusive magmatism within the Pechora zone of the Pechora Basin basement

V. L. Andreichev¹, A. A. Soboleva¹, E. G. Dovzhikova², Yu. L. Ronkin³¹ Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar² Ukhta State Technical University, Ukhta³ Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Yekaterinburg

The Pechora Basin is the largest tectonic structure of the Pechora Plate. It is located between the Timan and the Cis-Ural Foredeep. The Upper Precambrian sedimentary-metamorphic and igneous rocks of the basement are completely overlain by a sedimentary cover, therefore, the geological structure of the basement is known only on the basis of geophysical data and core samples from boreholes up to 5 km deep. The basement has a heterogeneous structure. It includes complexes of the Late Precambrian passive margin of the East European continent, which compose the Timan megablock (Izhma zone with Timan adjoining from the southwest) and formations formed in an active margin geodynamic setting combined into the Bolshezemel megablock (Pechora and Bolshezemel zones). The boundary between megablocks is the Pripechora fault (suture) zone. The age of igneous rocks of the basement is debatable; therefore, U-Pb (SIMS) studies of single zircon grains are undertaken to specify it. The article presents petrogeochemical data and U-Pb (SIMS, SHRIMP-RG) ages of zircon grains from plutonic rocks of the Pechora zone belonging to the Bolshezemel megablock drilled by two boreholes at depths of ~ 4.5 km. The obtained results indicated two episodes of island-arc magmatism. The first took place at the end of the Riphean, and the second was confined to the Early–Late Vendian boundary. The age of gabbro-diorites from the 1-Severny Savinobor borehole, interpreted as early island-arc rocks, is 673 ± 7 Ma. Late island-arc plagiogranites from the 1-Novaya borehole yield the age of 564 ± 5 Ma and precede the orogenic granitoids of the Pripechora fault zone which are dated (U-Pb) to 555–544 Ma.

Keywords: Pechora Basin, Pechora zone, Neoproterozoic, basement, gabbro-diorites, plagiogranites, zircon, U-Pb age.

Введение

Возраст осадочно-метаморфических и магматических комплексов, слагающих верхнедокембрийский фундамент Тимано-Печорского сегмента литосферы, отождествляемого с Печорской (Тимано-Печорской) плитой, длительное время остается предметом дискуссий. Его актуальность обусловлена наблюдаемым в на-

учной литературе последних лет повышенным интересом к реконструкции докембрийского этапа развития Арктического сектора Земли, а корректное решение в немалой степени зависит от обоснования возраста структурно-вещественных комплексов современными прецизионными методами изотопной геохронологии.

В настоящее время при изотопном датировании магматических, метаморфических и осадочных пород

Для цитирования: 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. 2023. 10 (346). С. 15–25. DOI: 10.19110/geov.2023.10.2

For citation: 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, 10 (346), pp. 15–25, doi: 10.19110/geov.2023.10.2

наиболее востребованным изотопным минералом-хронометром является циркон. Современная масс-спектрометрическая аппаратура позволяет проводить локальный изотопный анализ Pb нанограммовых и меньших содержаний в пределах индивидуального зерна посредством масс-спектрометрии вторичных ионов (SIMS) на ионных микрозондах. Именно такие исследования предпринимаются нами для выяснения времени проявления интрузивного магматизма в докембрийской эволюции Печорской синеклизы.

Общие сведения по геологии Печорской синеклизы

Печорская синеклиза представляет собой крупную региональную тектоническую структуру в составе Печорской плиты, занимая пространство между Тиманом и Предуральским краевым прогибом, а Тиман является юго-западным ограничением плиты и включается в ее состав (рис. 1). Гетерогенный фундамент Печорской синеклизы слагают верхнедокембрийские осадочно-метаморфические и прорывающие их позднедокембрийские магматические образования, повсеместно погребенные под ордовикско-кайнозойским платформенным чехлом. На основании геофизических данных и результатов бурения в составе фундамента Печорской плиты по вещественному составу и характеру магматизма выделяются Большеземельская, Печорская, Ижемская и Тиманская зоны. Две первые зоны объединяются в Большеземельский мегаблок, а две вторые — в Тиманский мегаблок (Дедеев и др., 1974; Белякова, 1983; Дедеев, Запорожцева, 1985; Белякова и др., 2008). Граница между мегаблоками проводится по Припечорской разломной зоне, состоящей 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). Её продолжением в приуральской части плиты является Денисовская магнитная аномалия, создаваемая телами пород базитового и ультрабазитового состава, слагающими позднедокембрийские комплексы этой части региона (Иванов и др., 1986). Связь Припечорской аномалии с изверженными породами подтверждается результатами глубокого бурения.

Мощность платформенного чехла изменяется от 4–7 км в центральных частях впадин Печорской синеклизы до 1–4 км на сводах и поднятиях, поэтому выяснение строения и геодинамического развития фундамента синеклизы затруднено по причине ограниченности геологической информации, получаемой исключительно по керну более чем 200 скважин разных категорий глубиной до 5 км (Белякова и др., 2008).

Тиманский мегаблок формируют среднерифейские(?) — верхнерифейские терригенные и в меньшей степени карбонатные породы, выходящие на поверхность в пределах Тимана. В Ижемской зоне вскрытые скважинами сланцы того же возраста, с резким несогласием перекрываемые палеозойским осадочным чехлом, вполне сопоставляются по составу протолита со сланцами Тимана. Среди интрузивных образований

преобладают гранитоиды, отдельными скважинами вскрыты монзониты, сиениты и диориты.

В Печорской зоне, включающей Припечорскую зону разломов, фундамент сложен дислоцированными верхнерифейско-вендскими (?) вулканогенными породами базальт-андезит-дацит-риолитовой известково-щелочной серии и их туфами с прослоями филлитовидных сланцев. Интрузивные образования кислого, среднего, основного и ультраосновного состава устанавливаются по геофизическим данным и по результатам бурения.

В Большеземельской зоне бурением вскрыта верхняя часть разреза фундамента, представленная верхнерифейско-вендскими (?) красноцветными и сероцветными ритмично-слоистыми терригенными и туфо-терригенными отложениями, среди которых существенна роль туффитов и кислых вулканитов. На более низких стратиграфических уровнях предполагается значительное развитие основных и ультраосновных пород. Скважинами вскрыты граниты и габбро.

Общее строение фундамента Печорской синеклизы и наблюдаемый спектр магматических пород послужили основанием интерпретировать Тиманский мегаблок как северо-восточную (в современных координатах) пассивную континентальную окраину Восточно-Европейского континента (Пучков, 1975; Гецен, 1991). Она простиралась до Припечорской зоны разломов, представляющей собой сутуру орогена Тиманид — след замыкания Печорского океана (Белякова, Степаненко, 1990, 1991; Пучков, 2005; Белякова и др., 2008) в результате аккреционных (Белякова и др., 2008) или коллизионных (Кузнецов и др., 2006, 2007) процессов. В этой зоне, а также в расположенных северо-восточнее Печорской и Большеземельской зонах обнаруживаются породы, образовавшиеся в условиях активной окраины (Белякова, Степаненко, 1991; Довжикова и др., 2000; Белякова и др., 2008).

До конца прошлого столетия суждения о возрасте магматических пород фундамента Печорской синеклизы, преимущественно гранитоидов, основывались на незначительном количестве K-Ar-возрастных определений (Акимова, 1980; Андреичев, Литвиненко, 2007; Gee et al., 2000), полученных в 70-е годы. Основная часть датировок приходилась на интервал 600–500 млн лет, что и давало основание считать породы венд-кембрийскими. Дальнейшие геохронологические исследования гранитов, а также диоритов были связаны с $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -датированием единичных зерен циркона методом ступенчатого испарения свинца (Kober, 1986, 1987) из пород Ижемской, Печорской и Большеземельской зон (Gee et al., 2000). Полученные значения возраста образуют узкий диапазон 567–551 млн лет, отвечающий границе раннего-позднего венда, которой в отечественной шкале геологического времени отводится интервал 570–555 млн лет (Стратиграфический кодекс..., 2006). При датировании индивидуальных зерен циркона по отношению радиогенных изотопов свинца отсутствует контроль конкордантности, поэтому соответствие измеренного $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -отношения (возраста) времени образования циркона и, соответственно, вмещающей его породы, остается в области предположений.

Таким образом, неопределенность возраста интрузивного магматизма фундамента Печорской

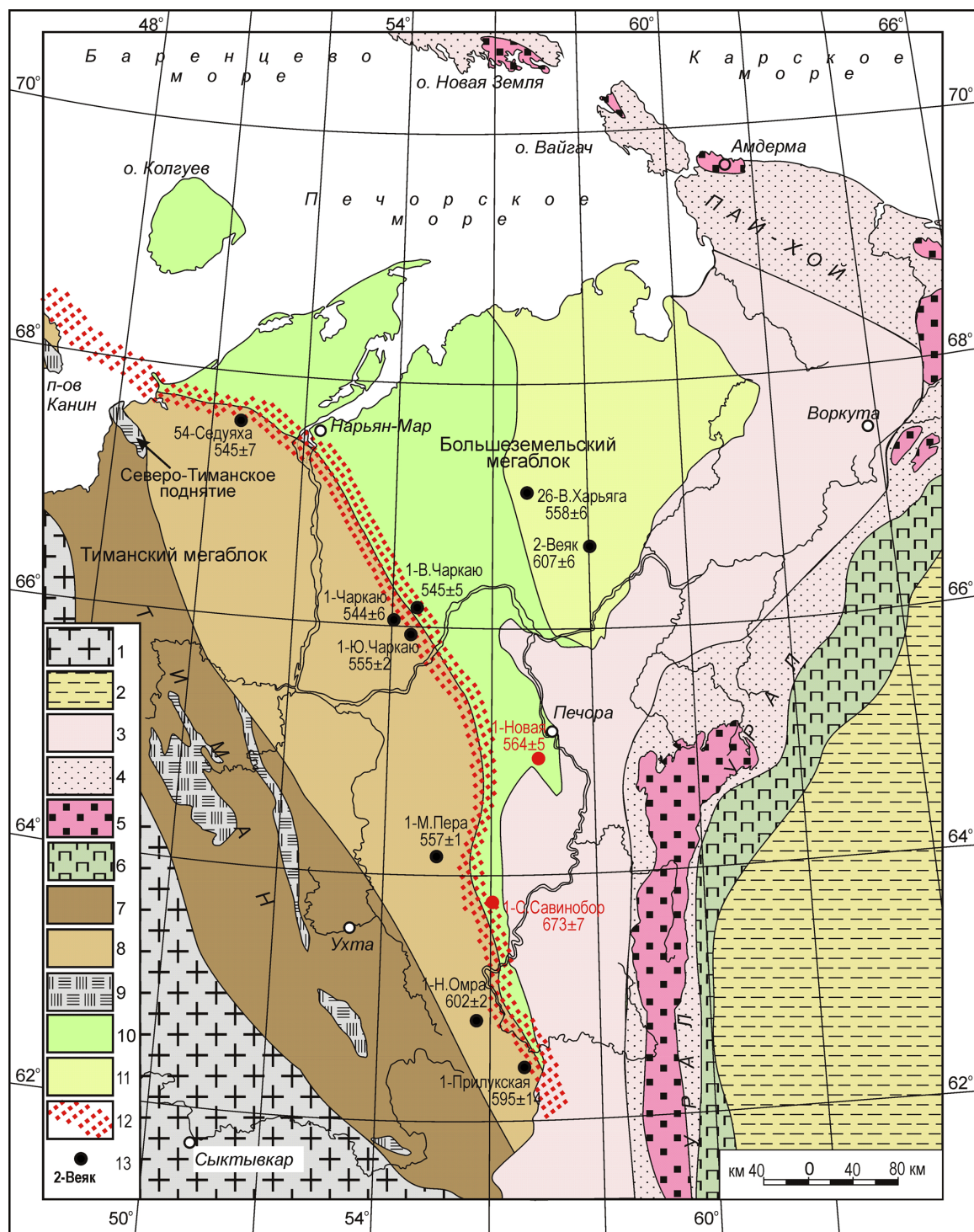


Рис. 1. Тектоническое строение фундамента Печорской синеклизы и ее обрамления (по Тимано-Печорский..., 2000; Белякова и др., 2008):

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; 7–12 — фундамент Печорской плиты: 7 — Тиман, 8 — Ижемская зона, 9 — выходы на поверхность комплексов фундамента, 10 — Печорская зона, 11 — Болшеземельская зона, 12 — Припечорская зона разломов (северо-западная часть — Чаркаю-Пылецкий разлом, юго-восточная часть — Илыч-Чикшинский разлом); 13 — скважины, вскрывшие интрузивные породы

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; 7–12 — basement of the Pechora plate: 7 — Timan, 8 — Izhma zone, 9 — exposures of the basement, 10 — Pechora zone, 11 — Bolshezemel zone, 12 — Pripechora fault zone (northwestern part — Charkayu-Pylemets fault, southeastern part — Ilych-Chikshino fault); 13 — boreholes that reached intrusive rocks

синеклизы сохраняется, и для ее разрешения необходимы дополнительные аргументы. С этой целью нами были предприняты U-Pb (SIMS)-исследования циркона и получены современные возрастные данные по гранитоидам из разных зон.

В Ижемской зоне возраст цирконов из гранитов в скв. 1-Нижняя Омра составил 602 ± 2 млн лет, в скв. 1-Прилуцкая — 595 ± 14 млн лет, а в скв. 11-Малая Пера — 557 ± 1 млн лет (Андреичев и др., 2014б). Гранитоиды Припечорской разломной зоны, вскрытые скважинами 1-Чаркаю, 1-Южная Чаркаю, 1-Восточная Чаркаю и 54-Седюха, объединяются в чаркаюский комплекс гранодиоритов и амфибол-биотитовых гранитов. По цирконам из всех скважин получены близкие значения возраста в интервале 555–544 млн лет (Андреичев и др., 2014а; Андреичев и др., 2017), свидетельствующие об их формировании при завершении тиманского тектогенеза в позднем венде. Сопоставимые результаты были получены по цирконам из гранитоидов Большеземельской зоны. Возраст цирконов из гранодиоритов в скв. 2-Веяк составил 607 ± 6 млн лет, а в гранитах из скв. 26-Восточная Харъяга — 558 ± 6 млн лет (Андреичев и др., 2023).

В настоящем сообщении мы приводим первые геохимические и U-Pb-данные по интрузивным породам из скважин 1-Северный Савинобор и 1-Новая, пробуренных в Печорской зоне (рис. 1).

Методы исследования

Концентрации петрогенных элементов, представленных в виде оксидов, определены методом традиционного химического анализа («мокрой химии») в ТП НИЦ (Ухта). Определения содержаний элементов-примесей выполнены методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН (Екатеринбург), процедуры опубликованы (Ронкин и др., 2005).

U-Pb-датирование индивидуальных зерен циркона было выполнено на вторично-ионном микрозонде обратной геометрии SHRIMP-RG, принадлежащем Стэнфордскому университету и Геологической службе США, согласно стандартным процедурам (Ireland, Gibson, 1998; Coble et al., 2018). Катодолюминесцентные изображения цирконов были получены в той же лаборатории на сканирующем электронном микроскопе JEOL LV 5600, оснащенный катодолюминесцентным детектором. Обработка полученных аналитических данных проведена с использованием программы SQUID-2 (Ludwig, 2009). При построении диаграмм с конкордией в координатах $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ использовалась программа ISOPLOT/Ex (Ludwig, 2012). Отношения Pb/U нормированы на значение $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.0668$ в стандартном цирконе TEMORA, что соответствует возрасту 416.75 млн лет (Black et al., 2003).

Петрогеохимическая характеристика пород

В скв. 1-Северный Савинобор в интервале 4123–4744 м (забой) вскрыты диориты, на отдельных участках переходящие в габбродиориты и амфиболовые габбро, которые секутся телами микродиоритов и плагиогранитов с видимой мощностью от первых дециметров до 1–2 м. Диориты (рис. 2, а) — средне- и мелкозернистые массивные породы, сложенные зональным плагиоклазом состава An_{45-55} в центральных частях зерен и An_{45-30} по краям (40–60 об. %), зеленой роговой обманкой (20–35 об. %), кварцем (5–10 об. %), биотитом (0–10 об. %). Структура породы гипидиоморфнозернистая. Из вторичных минералов развиты хлорит, эпидот, клиноцоизит, карбонат, лейкоксен; из аксессуарных — апатит, магнетит, гранат, циркон, титанит. Габбродиориты и амфиболовые габбро отличаются более высокими содержаниями темноцветных минералов. Химический состав пород представлен в табл. 1. Согласно петрохимической классификации породы относятся к семействам

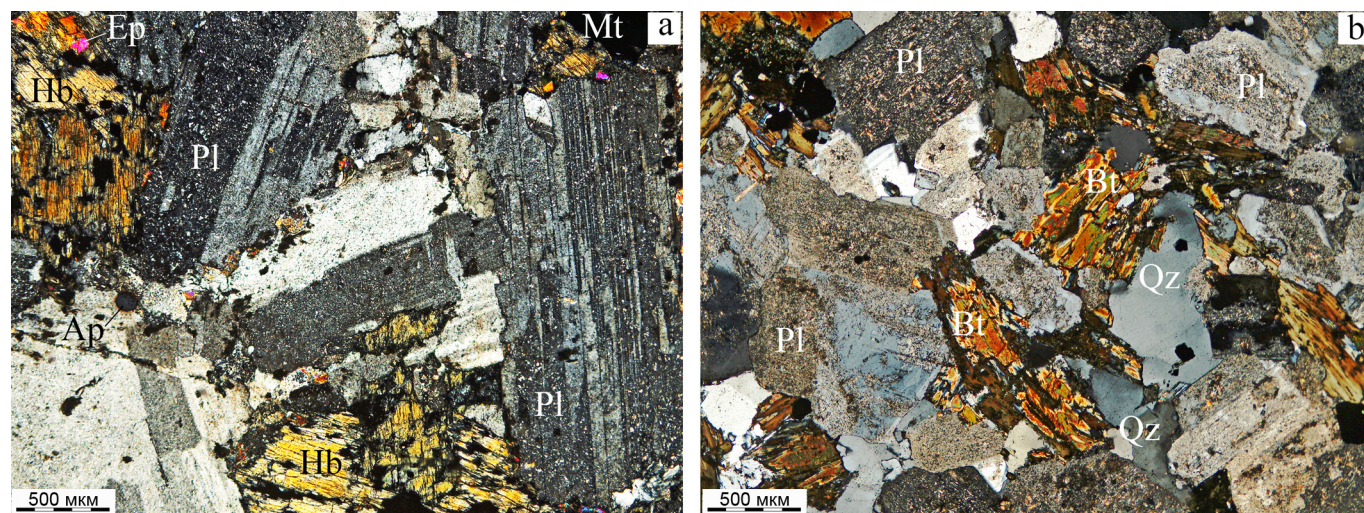


Рис. 2. Микрофотографии шлифов габбродиорита из скв. 1-Северный Савинобор, обр. 37 (а) и плагиогранита из скв. 1-Новая, обр. 67 (б), с анализатором. Pl — плагиоклаз, Qz — кварц, Hb — роговая обманка, Bt — биотит, Ap — апатит, Mt — магнетит, Ep — эпидот

Fig. 2. Cross-polarized thin-section photomicrographs of gabbrodiorite from 1-Severny Savinobor borehole, sample 37 (a) and plagiogranite from 1-Novaya borehole, sample 67(b). Pl — plagioclase, Qz — quartz, Hb — hornblende, Bt — biotite, Ap — apatite, Mt — magnetite, Ep — epidote

**Таблица 1.** Содержания петрогенных оксидов в интрузивных породах Печорской зоны, мас. %**Table 1.** Main oxide contents in plutonic rocks of Pechora zone, wt. %

Скважина / Borehole	1-Северный Савинобор / 1-Severny Savinobor						1-Новая 1-Novaya
Глубина, м / Depth, m	4247—4250	4283—4289	4474—4486	4533—4546	4579—4586	4638—4644	4500—4501
№ обр. / Sample No.	33	34	37	38	39	40	67
SiO ₂	52.62	52.54	53.12	53.58	52.50	52.69	70.72
TiO ₂	0.50	0.60	0.60	0.50	0.70	0.65	0.52
Al ₂ O ₃	19.43	19.10	18.84	18.82	19.00	19.07	13.16
Fe ₂ O ₃	5.56	5.18	5.08	2.05	4.07	3.89	1.67
FeO	2.74	3.45	3.17	5.18	4.78	4.37	1.43
MnO	0.17	0.18	0.17	0.10	0.18	0.17	0.04
MgO	5.00	5.90	5.00	5.34	4.94	4.54	1.57
CaO	8.12	5.88	7.42	5.04	6.79	7.50	2.24
Na ₂ O	3.24	3.40	3.24	3.62	3.37	3.67	5.18
K ₂ O	0.60	0.62	0.72	0.55	0.68	0.70	1.16
P ₂ O ₅	0.10	0.20	0.20	0.15	0.18	0.16	0.18
П.п.п. / LOI	1.51	2.87	2.03	4.62	3.18	2.22	1.60
Сумма / Sum	99.59	99.92	99.59	99.55	100.37	99.63	99.47

Таблица 2. Содержания элементов-примесей в интрузивных породах Печорской зоны, г/т**Table 2.** Trace element contents in plutonic rocks of Pechora zone, ppm

Компонент Component	1-С. Савинобор 1-S. Savinobor	1-Новая 1-Novaya	Компонент Component	1-С. Савинобор 1-S. Savinobor	1-Новая 1-Novaya
	37	67		37	67
Li	12.20	6.29	Ce	19.99	78.72
Be	0.66	1.39	Pr	2.57	8.14
Sc	16.85	5.59	Nd	11.28	28.18
V	132.61	38.28	Sm	2.71	4.71
Cr	14.35	171.11	Eu	0.97	1.16
Co	18.88	10.70	Gd	2.66	3.42
Ni	11.81	101.35	Tb	0.41	0.46
Cu	34.78	39.31	Dy	2.58	2.53
Zn	66.05	34.73	Ho	0.53	0.47
Ga	16.14	13.08	Er	1.58	1.31
Ge	1.00	0.71	Tm	0.23	0.18
Rb	10.36	22.74	Yb	1.55	1.16
Sr	311.38	359.80	Lu	0.24	0.17
Y	9.32	8.59	Hf	0.77	1.83
Zr	11.88	42.26	Ta	0.14	1.40
Nb	1.88	12.23	W	0.19	1.54
Mo	0.38	1.54	Tl	0.07	0.11
Ag	0.32	1.15	Pb	4.03	5.98
Cd	0.04	0.04	Bi	0.02	0.39
Sn	0.64	0.58	Th	1.01	15.81
Sb	0.17	0.47	U	0.25	4.45
Te	0.004	0.18	K/Rb	579	423
Cs	1.87	0.44	Rb/Sr	0.03	0.06
Ba	223.15	294.25	Rb/Ba	0.05	0.08
La	8.64	45.70	Ga/Al	1.58	1.88

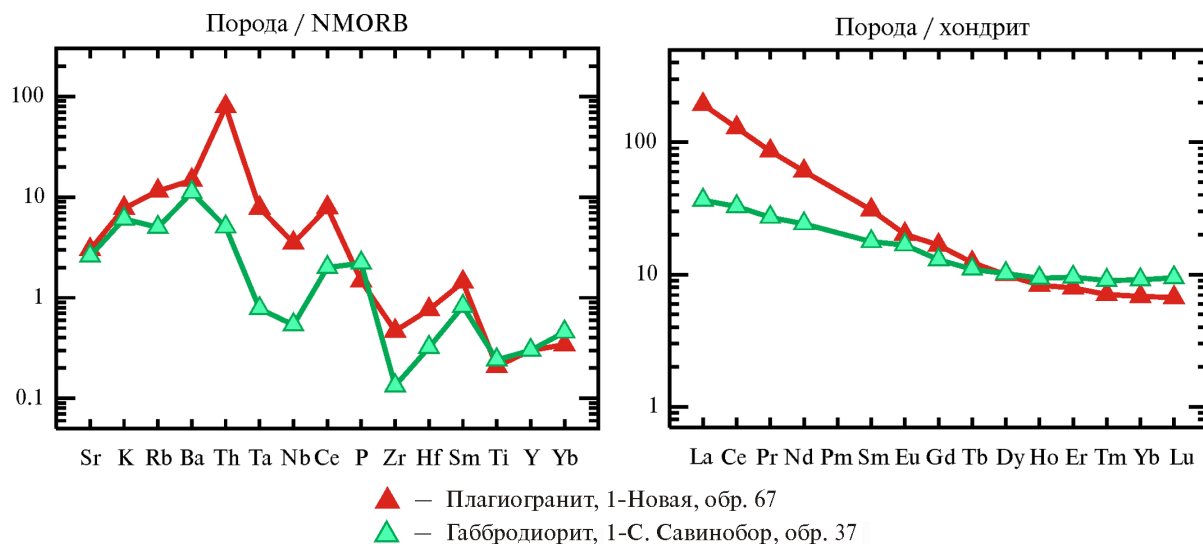


Рис. 3. Мультиэлементная диаграмма (Pearce, 1982) и графики хондрит-нормированного (Sun, McDonough, 1989) распределения редкоземельных элементов для габбродиоритов скв. 1-Северный Савинобор (обр. 37) и плагиигранитов скв. 1-Новая (обр. 67)

Fig. 3. Trace element spider diagrams (Pearce, 1982) and chondrite-normalized rare earth element patterns (Sun, McDonough, 1989) for gabbrodiortite from the 1-Severny Savinobor borehole (sample 37) and plagiogranite from the 1-Novaya borehole (sample 67)

габброидов (габбро) и диоритов (габбродиориты и диориты).

Содержания и характер распределения элементов-примесей (табл. 2, рис. 3) в исследованных габбродиоритах (обр. 37, инт. 4474—4480 м) типичны для пород, образовавшихся в геодинамической обстановке незрелой островной дуги (Белякова и др., 2008). Для габбродиоритов характерны несколько повышенные по сравнению со средним составом нормальных толетовых базальтов срединно-океанических хребтов (NMORB) (Pearce, 1982) содержания крупноионных литофильных элементов — K (0.6 %), Rb (10 г/т), Ba (223 г/т), Sr (311 г/т), а также Th (1.01 г/т) при заметном обеднении высокочарядными литофильными элементами — Ce (19.99 г/т), Sm (2.71 г/т), Yb (1.55 г/т), Y (9 г/т), Ta (0.14 г/т), Nb (1.88 г/т), Ti (0.33 %), Zr (12 г/т), Hf (0.77 г/т) и низких концентрациях Ni (12 г/т) и Cr (14 г/т). Также типично невысокое суммарное содержание редких земель (56 г/т), небольшое обогащение легкими редкими землями относительно тяжелых ($La_N/Yb_N = 4.0$) и отсутствие дефицита европия.

В скв. 1-Новая в интервале 4230—4501 м (забой) вскрыты амфиболовые габбро, прорванные гранодиоритами и плагиигранитами. Плагииграниты (рис. 2, б), из которых исследовались зерна циркона (обр. 67, инт. 4500—4501 м), имеют среднезернистую гипидиоморфнозернистую структуру и массивную текстуру. Они состоят из ксеноморфных зерен кварца и субидиоморфных табличек плагииоклаза (в примерно равных соотношениях), листочков биотита (10—15 об. %) и хлорита. Зерна плагииоклаза имеют зональное строение: более кальциевые ядра сильно сосюритизированы, в неизмененных внешних зонах (An_{30-35}) отмечаются полисинтетические двойники. Биотит образует листочки размером 0.5—1.5 мм, плеохроирующие от красно-коричневого (Ng) до светло-желтовато-коричневого (Np). Его индивиды в разной степени хлоритизированы с выделением мелких зерен титанита и магнетита; по периферии некоторых чешуек развит сери-

цит. Встречается парагенезис «хлорит + эпидот» (по биотиту), это позволяет предположить, что внутри выделений биотита до замещения могли сохраняться реликты амфибола. Аксессуары представлены апатитом, титанитом и цирконом. По петрохимической классификации породы отвечают плагиигранитам.

Содержания и характер распределения элементов-примесей (табл. 2, рис. 3) типичны для гранитов, образовавшихся в глубинных частях зрелой островной дуги (Белякова и др., 2008). Характерно обогащение породы по сравнению с составом NMORB крупноионными литофильными элементами (K, Rb, Ba, Th) при невысоких концентрациях высокочарядных элементов (тяжелых REE, Ta, Nb, Ti, Y, Zr, Hf). При достаточно высоком суммарном содержании редких земель (176 г/т) характерно их дифференцированное распределение с заметным обогащением легкими редкими землями относительно тяжелых ($La_N/Yb_N = 28.3$). Отсутствие дефицита европия свидетельствует о том, что в очаге на этапе образования плагиигранитной магмы не происходило фракционирование плагииоклаза. Низкие содержания Ba (294 г/т), Rb (23 г/т), высокие концентрация Sr (360 г/т) и величина отношения K/Rb (423) при низких Rb/Sr (0.06) Rb/Ba (0.08) типичны для гранитов М-типа (по Whalen et al., 1987). По содержаниям Nb (13 г/т), Th (16 г/т) и U (4 г/т) рассматриваемые плагииграниты близки к гранитам I-типа.

U-Pb-возраст циркона

Скв. 1-Северный Савинобор. Исследовались цирконы из габбродиоритов (обр. 37, гл. 4474—4480 м). Кристаллы светло-розовые, прозрачные, с гладкими блестящими гранями длиной 0.1—0.2 мм при коэффициенте удлинения (K_y) 1—3 (преобладают зерна с K_y 1.5—2). Зёрна гиацинтового габитуса, в некоторых зёрнах со слабо и нормально развитой призмой, кроме пирамиды {111}, хорошо развиты дополнительные грани более вытянутых пирамид {221} или {331}.



Отмечаются черные и красно-коричневые включения. Католюминесцентные изображения (рис. 4) демонстрируют наличие в большинстве зерен хорошо проявленной секториальной и пятнистой зональности. В зерне 7 наблюдается четкая эвгдральная осциллирующая зональность.

Результаты аналитических измерений 11 зерен приведены в табл. 3 и на рис. 5. Во всех зернах по отношению $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ получены однородные значения возраста в интервале 660–710 млн лет, образующие

кластер с конкордантным возрастом 673 ± 7 млн лет.

Скв. 1-Новая. Анализировались зерна циркона из плагиогранитов (обр. 67, гл. 4500–4501 м). Кристаллы светло-розовые, прозрачные, с гладкими блестящими гранями. Размер 0.1–0.3 мм, в среднем 0.15–0.2 мм, $K_y = 1.5–5$, обычно 2–3. Зерна гиацитного габитуса, одно с острой пирамидой {331} — обломок (около 0.3 мм) головки крупного кристалла. Содержат мелкие красно-коричневые включения. На католюминесцентных изображениях (рис. 6) в большинстве

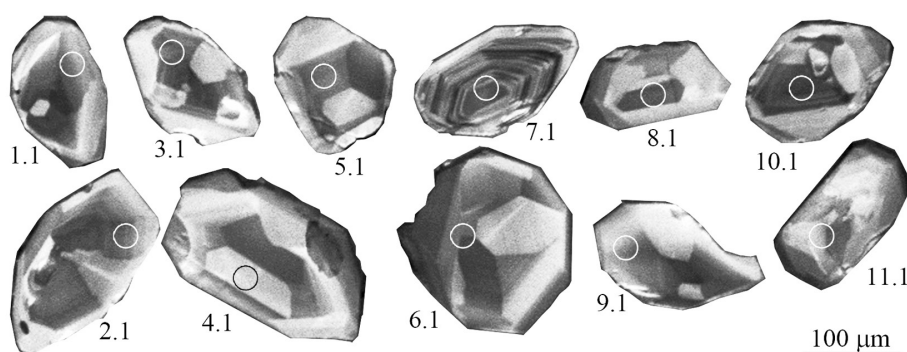


Рис. 4. Католюминесцентные изображения кристаллов циркона с номерами датированных зерен и аналитических кратеров из габбродиоритов скв. 1-Северный Савинобор

Fig. 4. Cathodoluminescence images of zircons with numbers of dated grains and analytical craters from gabbrodiorite, borehole 1-Severny Savinobor

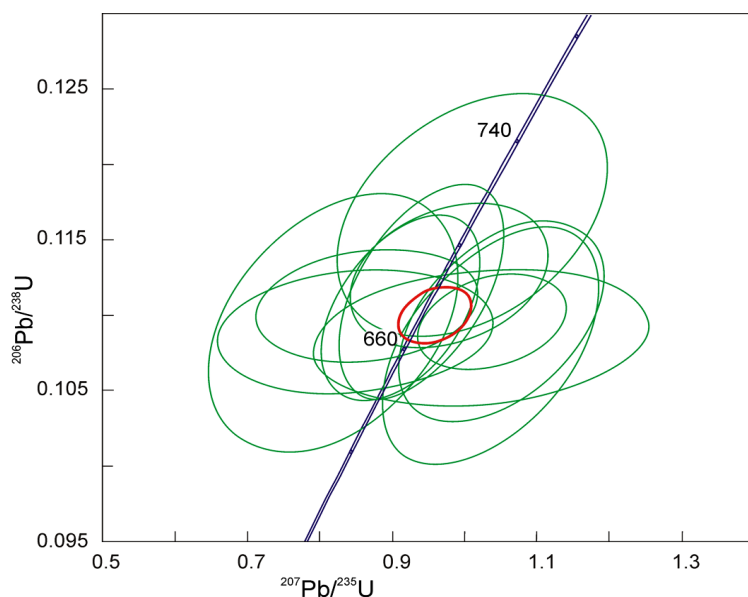


Рис. 5. Диаграмма с конкордией для циркона из габбродиоритов скв. 1-Северный Савинобор. Возраст — 673 ± 7 млн лет (2σ , $n = 11$, $\text{СКВО} = 1.3$)

Fig. 5. Concordia diagram for zircons from gabbrodiorite, the 1-Severny Savinobor borehole. Age is 673 ± 7 Ma (2σ , $n = 11$, $\text{MSWD} = 1.3$)

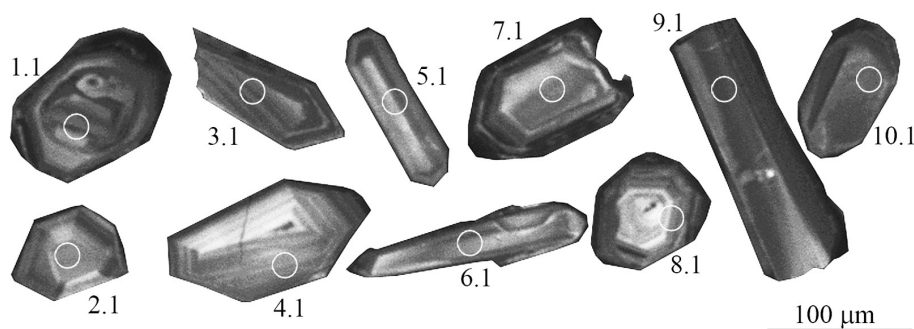


Рис. 6. Католюминесцентные изображения кристаллов циркона с номерами датированных зерен и аналитических кратеров из плагиогранитов скв. 1-Новая

Fig. 6. Cathodoluminescence images of zircons with numbers of dated grains and analytical craters from plagiogranite, the 1-Novaya borehole

Таблица 3. Результаты U-Pb-изотопных исследований цирконовых зерен из интрузивных пород Печорской зоны
Table 3. Results of U-Pb dating of zircon grains from plutonic rocks of Pechora zone

Зерно, кратер Grain, spot	$^{206}\text{Pb}_c$, %	Содержания, мкг/г Content, ppm			$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	Изотопные отношения $\pm$ % (1 σ) Isotope ratios $\pm$ % (1 σ)			Rho	Возраст $\pm$ 1 σ , млн лет Age $\pm$ 1 σ , Ma			D, %
		$^{206}\text{Pb}^*$	U	Th		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	
скв. 1-Северный Савинобор (габбродиорит, обр. 37, инт. 4474–4480 м) / 1-Severnny Savinobor (gabbrodiortite, sample 37, 4474–4480 m)													
11.1	н.п.о.	4.3	47	36	0.78	0.1078 $\pm$ 3.0	1.020 $\pm$ 5.0	0.0686 $\pm$ 4.0	0.6	660 $\pm$ 19	714 $\pm$ 25	887 $\pm$ 82	8
3.1	0.52	3.0	32	17	0.53	0.1082 $\pm$ 1.6	0.996 $\pm$ 6.2	0.0667 $\pm$ 6.0	0.3	663 $\pm$ 10	702 $\pm$ 31	829 $\pm$ 125	6
6.1	0.96	3.8	41	15	0.38	0.1087 $\pm$ 1.5	0.825 $\pm$ 8.5	0.0550 $\pm$ 8.4	0.2	665 $\pm$ 10	611 $\pm$ 38	413 $\pm$ 187	–8
7.1	0.56	4.8	51	28	0.56	0.1093 $\pm$ 3.2	0.801 $\pm$ 7.1	0.0531 $\pm$ 6.3	0.4	669 $\pm$ 20	597 $\pm$ 32	334 $\pm$ 144	–11
1.1	н.п.о.	6.7	71	48	0.69	0.1094 $\pm$ 2.5	1.037 $\pm$ 4.5	0.0687 $\pm$ 3.7	0.6	669 $\pm$ 16	722 $\pm$ 23	889 $\pm$ 77	8
2.1	н.п.о.	9.1	96	55	0.59	0.1094 $\pm$ 1.1	1.025 $\pm$ 2.9	0.0679 $\pm$ 2.7	0.4	669 $\pm$ 7	716 $\pm$ 16	866 $\pm$ 56	7
10.1	0.31	7.7	81	40	0.51	0.1104 $\pm$ 2.3	0.902 $\pm$ 4.3	0.0593 $\pm$ 3.6	0.5	675 $\pm$ 15	653 $\pm$ 20	576 $\pm$ 78	–3
8.1	0.61	4.7	49	36	0.76	0.1104 $\pm$ 1.4	0.844 $\pm$ 6.7	0.0554 $\pm$ 6.5	0.2	675 $\pm$ 9	621 $\pm$ 31	429 $\pm$ 146	–8
5.1	0.15	6.1	64	33	0.53	0.1114 $\pm$ 2.6	0.924 $\pm$ 4.6	0.0602 $\pm$ 3.7	0.6	681 $\pm$ 17	665 $\pm$ 22	608 $\pm$ 81	–2
4.1	н.п.о.	6.7	69	64	0.95	0.1125 $\pm$ 1.7	0.965 $\pm$ 3.7	0.0622 $\pm$ 3.3	0.5	687 $\pm$ 11	686 $\pm$ 18	681 $\pm$ 70	0
9.1	н.п.о.	4.6	46	25	0.56	0.1165 $\pm$ 2.8	0.989 $\pm$ 4.6	0.0616 $\pm$ 3.6	0.6	710 $\pm$ 19	698 $\pm$ 23	659 $\pm$ 78	–2
скв. 1-Новая (плаггиогранит, обр. 67, инт. 4500–4501 м) / 1-Novaya (plagiogranite, sample 67, 4500–4501 m)													
10.1	1.08	15.1	336	116	0.36	0.0524 $\pm$ 4.6	0.400 $\pm$ 6.5	0.0553 $\pm$ 4.6	0.7	329 $\pm$ 15	342 $\pm$ 18	423 $\pm$ 102	4
6.1	0.55	22.1	295	130	0.46	0.0869 $\pm$ 0.8	0.714 $\pm$ 2.5	0.0596 $\pm$ 2.4	0.3	537 $\pm$ 4	547 $\pm$ 11	589 $\pm$ 52	2
5.1	н.п.о.	9.4	126	89	0.73	0.0870 $\pm$ 1.9	0.732 $\pm$ 2.9	0.0610 $\pm$ 2.2	0.7	538 $\pm$ 10	558 $\pm$ 12	637 $\pm$ 46	4
9.1	0.35	22.1	292	177	0.63	0.0882 $\pm$ 1.4	0.690 $\pm$ 2.6	0.0567 $\pm$ 2.2	0.5	545 $\pm$ 7	533 $\pm$ 11	479 $\pm$ 48	–2
1.1	0.39	25.7	332	215	0.67	0.0902 $\pm$ 1.4	0.733 $\pm$ 2.4	0.0589 $\pm$ 2.0	0.6	557 $\pm$ 7	558 $\pm$ 10	563 $\pm$ 43	1
8.1	0.43	18.1	234	80	0.35	0.0901 $\pm$ 5.1	0.696 $\pm$ 6.0	0.0560 $\pm$ 3.1	0.9	556 $\pm$ 27	536 $\pm$ 25	453 $\pm$ 69	–4
4.1	0.18	8.8	112	99	0.92	0.0916 $\pm$ 1.5	0.756 $\pm$ 3.0	0.0599 $\pm$ 2.6	0.5	565 $\pm$ 8	572 $\pm$ 13	597 $\pm$ 57	1
2.1	0.09	8.8	112	101	0.94	0.0921 $\pm$ 1.5	0.763 $\pm$ 2.7	0.0601 $\pm$ 2.3	0.5	568 $\pm$ 8	576 $\pm$ 12	607 $\pm$ 50	1
7.1	0.05	16.0	202	112	0.57	0.0921 $\pm$ 0.8	0.731 $\pm$ 1.8	0.0576 $\pm$ 1.6	0.4	568 $\pm$ 4	557 $\pm$ 8	514 $\pm$ 36	–2
3.1	н.п.о.	19.8	249	130	0.54	0.0924 $\pm$ 0.8	0.748 $\pm$ 1.8	0.0587 $\pm$ 1.6	0.4	570 $\pm$ 4	567 $\pm$ 8	555 $\pm$ 35	–1

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта составляет 0.5 %. $^{206}\text{Pb}_c$ и $^{206}\text{Pb}^*$ — обыкновенный и радиогенный свинец, н.п.о. — ниже предела определения (≤ 0.04 %). Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb . D — дискордантность: $D = 100 \times (\text{возраст } ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1$. 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 0.5 %. $^{206}\text{Pb}_c$ and $^{206}\text{Pb}^*$ — common and radiogenic lead; н.п.о. — below the limit of determination (≤ 0.04 %). Isotope ratios and $^{206}\text{Pb}^*$ content are corrected using measured ^{204}Pb . Rho is the error correlation coefficient of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ versus $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$. D is discordance: $D = 100 \times [\text{age } (^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U})/\text{age } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$.

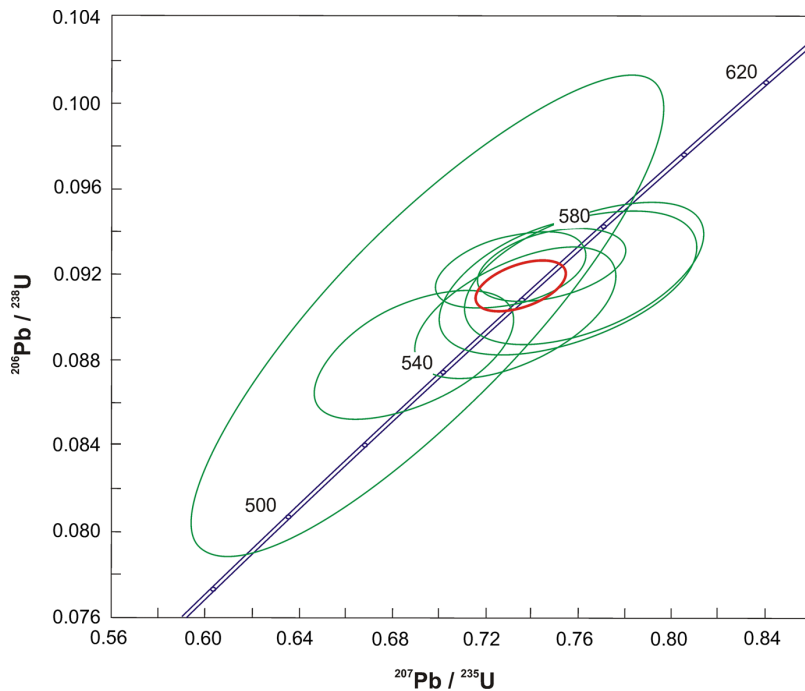


Рис. 7. Диаграмма с конкордией для циркона из плагиогранитов скв. 1-Новая.

Возраст 564 ± 5 млн лет (2σ , $n = 7$, СКВО = 2.2)

Fig. 7. Concordia diagram for zircons from plagiogranite, the 1-Novaya borehole.

Age is 564 ± 5 Ma (2σ , $n = 7$, MSWD = 2.2)

зерен циркона видна эвгедральная осцилляционная зональность с достаточно широкими зонами роста. Зональность внутренней части зерна 1 нарушена. В центральных частях зерен 4 и 8 наблюдаются черные включения. В зерне 10 зональность выражена слабо.

Результаты аналитических измерений в 10 зернах приведены в табл. 3. Положение семи фигуративных точек на графике (рис. 7) определяет кластер, соответствующий конкордантному возрасту 564 ± 5 млн лет. Из расчета исключены аналитические данные по зернам 10.1, 6.1 и 5.1. Заметим, что аналогичный возраст, равный 565 ± 8 млн лет, был установлен ранее при Pb-Pb (Pb-evaporation)-датировании единичных зерен циркона из пробы диорита в этой же скважине (Gee et al., 1998).

Закключение

Таким образом, новые геохимические данные и первые U-Pb (SIMS)-датировки цирконов из интрузивных пород Печорской зоны Большеземельского мегаблока фундамента Печорской синеклизы указывают на два эпизода островодужного магматизма. Возраст цирконов из габбродиоритов в скв. 1-Северный Савинобор, интерпретируемых как производные начальной стадии развития островной дуги, составляет 673 ± 7 млн лет, что соответствует завершению рифея. Позднеостроводужные плагиограниты скв. 1-Новая имеют возраст 564 ± 5 млн лет (граница раннего-позднего венда) и предшествуют орогенным гранитоидам Припечорской разломной зоны с U-Pb (SIMS)-возрастами 555–544 млн лет. Новые датировки в сочетании с полученными ранее свидетельствуют о том, что в пределах Большеземельского мегаблока фундамента Печорской синеклизы представлены магматические породы, формировавшиеся в надсубдукционной обстановке в позднем рифее — венде. Установленные эпизоды ранне- и позднеостроводужного, а затем коллизионного магматизма соответствуют последовательной континентализации этого сегмента земной коры.

Авторы выражают благодарность М. А. Коблу (Стэнфордский университет, США) за помощь в получении и обработке данных U-Pb-датирования цирконов, а также признательны рецензентам, чьи предметные и конструктивные замечания способствовали существенному улучшению статьи.

Исследование выполнено по теме «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и 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).

Литература / References

- Акимова Г. Н. Геохронология докембрия Тимана // Сов. геология. 1980. № 12. С. 71–85.
 Akimova G.N. Geochronology of the Precambrian 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. Isotope geochronology of granitoid magmatism in the basement of the Pechora syncline. Syktyvkar: Geoprint, 2007, 68 p. (in Russian)
 Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г. Первые U-Pb-данные о возрасте гранитоидного магматизма фундамента Печорской синеклизы // ДАН. 2014а. Т. 458. № 5. С. 559–566. DOI: 10.7868/S0869565214290192
 Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G. First U-Pb data on the age of granitoid magmatism in the basement of the Pechora syncline. Doklady Earth Sciences, 2014a, V. 458, No. 5, pp. 559–566. (in Russian)
 Андреичев В. Л., Соболева А. А., Довжикова Е. Г., Ларионов А. Н., Пресняков С. Л., Миллер Э. Л., Кобл М. А. Возраст гранитоидного магматизма фундамента Ижемской зоны Печорской синеклизы: первые U-Pb данные // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геологического

- съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014б. Т. II. С. 101—103.
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Larionov A. N., Presnyakov S. L., Miller E. L., Koble M. A. Age of granitoid magmatism in the basement of the Izhem zone of the Pechora syncline: first U-Pb data. *Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proc. of the 16th Geological Congress of the Komi Republic*. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2014b, V. II, pp. 101—103. (in Russian)
- 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. 2017. Т. 474. № 3. С. 321—326. DOI: 10.7868/S0869565217150129
- Andreichev V. L., Soboleva A. A., Dovzhikova E. G., Miller E. L., Koble M. A., Larionov A. N., Vakulenko O. V., Sergeev S. A. Age of granitoids of Pechora fault zone of the basement of the Pechora syncline: first U-Pb (SIMS) data. *Doklady Earth Sciences*, 2017, V. 474, No. 3, pp. 321—326. (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. 2023. 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., Koble M. A. Granitoids of the Bolshezemelskaya zone of the basement of the Pechora syncline: composition and U-Pb age. *Geology and geophysics*, 2023, V. 64, No. 2, pp. 180—191. (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 foundation 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. in VINITI, No. 1155—84. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Степаненко В. И. Гранитоиды фундамента Печорской синеклизы как индикаторы тектоно-магматической зональности // Докл. АН СССР. 1990. Т. 313. № 3. С. 677—681.
- Belyakova L. T., Stepanenko V. I. Granitoids of the basement of the Pechora syncline as indicators of tectono-magmatic zoning. *Doklady Earth Sciences*, 1990, V. 313, No. 3, pp. 677—681. (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 baikalides of the basement of the Pechora syncline. *Proc. AS USSR, Ser. Geol*, 1991, No. 12, pp. 106—117. (in Russian)
- Белякова Л. Т., Богацкий В. И., Богданов Б. П., Довжикова Е. Г., Ласкин В. М. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна. Ухта: ГУП РК ТП НИЦ, 2008. 288 с.
- Belyakova L. T., Bogatsky V. I., Bogdanov B. P., Dovzhikova E. G., Laskin V. M. Foundation of the Timan-Pechora oil and gas basin. *Ukhta: TP Scientific Research Center*, 2008, 288 p. (in Russian)
- 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 foundation in the junction zone of the East European Platform and the Urals. *Proc. AS USSR, Ser. Geol*, 1970, No. 8, pp. 3—14. (in Russian)
- Гецен В. Г. Геодинамическая реконструкция развития северо-востока европейской части СССР для поздне-протерозойского этапа // Геотектоника. 1991. № 5. С. 26—37.
- Getsen 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., Запорожцева И. В. Земная кора Европейского Северо-Востока СССР. Л., Наука, 1985. 98 с.
- Dedeev V. A., Zaporozhtseva I. V. Earth's crust of the European Northeast of the USSR. *Leningrad: Nauka*, 1985, 98 p. (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., Zapolnov A. K. Timan and Pechora fold systems. *Structure of the foundation of platform regions of the USSR*. Leningrad: Nauka, 1974, pp. 82—90. (in Russian)
- Довжикова Е. Г., Ремизов Д. Н., Пиис В. Л. Геодинамическая позиция магматических пород фундамента Тимано-Печорской плиты в свете новых данных // Петрография на рубеже XXI века: итоги и перспективы: Материалы Всероссийского петрографического совещания. Сыктывкар, 2000. Т. IV. С. 49—52.
- Dovzhikova E. G., Remizov D. N., Piis V. L. Geodynamic position of igneous rocks of the basement of the Timan-Pechora plate in the light of new data. *Petrography at the turn of the XXI century: results and prospects. Proc. of the All-Russian Petrographic Meeting*, Syktyvkar, 2000, V. IV, pp. 49—52. (in Russian)
- Иванов С. Н., Пучков В. Н., Иванов К. С., Самаркин Г. И., Семенов И. В., Пумпянский А. И., Дымкин А. М., Полтавец Ю. А., Русин А. И., Краснобаев А. А. Формирование земной коры Урала. М.: Наука, 1986. 248 с.
- Ivanov S. N., Puchkov V. N., Ivanov K. S., Samarkin G. I., Semenov I. V., Pumpyansky A. I., Dymkin A. M., Poltavets Yu. A., Rusin A. I., Krasnobaev A. A. Formation of the earth's crust of the Urals. *Moscow: Nauka*, 1986, 248 p. (in Russian)
- Кузнецов Н. Б., Соболева А. А., Удоратина О. В., Герцева М. В., Андреичев В. Л., Дорохов Н. С. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Статья 1. Протоуралиты, тиманиды и доордовикские гранитоидные вулcano-плутонические ассоциации севера Урала и Тимано-Печорского региона // Литосфера. 2006. № 4. С. 3—22.
- Kuznetsov N. B., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Gertseva M. V., Andreichev V. L., Dorokhov N. S. Pre-Ural tectonic evolution of the northeastern and eastern framing of the East European Platform. Article 1. Proto-Uralids, timanids and pre-ordovician granitoid volcano-plutonic associations of the north of the Urals and the Timan-Pechora region. *Lithosphere*, 2006, No. 4, pp. 3—22. (in Russian)



- Кузнецов Н. Б., Соболева А. А., Удоратина О. В., Герцева М. В., Андреичев В. Л., Дорохов Н. С. Доуральская тектоническая эволюция северо-восточного и восточного обрамления Восточно-Европейской платформы. Статья 2. Позднедокембрийско-кембрийская коллизия Балтики и Арктиды // Литосфера. 2007. № 1. С. 32—45.
- Kuznetsov N. B., Soboleva A. A., Udoratina O. V., Gertseva M. V., Andreichev V. L., Dorokhov N. S. Pre-Ural tectonic evolution of the northeastern and eastern framing of the East European Platform. Article 2. Late Precambrian-Cambrian collision of Baltica and Arctida. Lithosphere, 2007, No. 1, pp. 32—45. (in Russian)
- Костюченко С. Л. Структура и тектоническая модель земной коры Тимано-Печорского бассейна по результатам комплексного геолого-геофизического изучения // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы. М.: КМК, 1994. С. 121—133.
- Kostyuchenko S. L. Structure and tectonic model of the earth's crust in the Timan-Pechora basin based on the results of a comprehensive geological and geophysical study. Tectonics and magmatism of the East European Platform. Moscow: KMK, 1994, pp. 121—133. (in Russian)
- Оловьяншиников 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. Structure of the junction zone of the Russian and Pechora plates according to geological and geophysical data. Doklady Earth Sciences, 1996, V. 351, No. 4, pp. 209—231. (in Russian)
- Пучков В. Н. Структурные связи Приполярного Урала и Русской платформы. Л.: Наука, 1975. 208 с.
- Puchkov V. N. Structural connections of the Subpolar Urals and the Russian Platform. Leningrad: Nauka, 1975, 208 p. (in Russian)
- 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 Paleo-Ural Ocean to the Ural Orogen. Problems of Tectonics of Central Asia. Moscow: GEOS, 2005, pp. 309—342. (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 ICP-MS Element2. Information collection of scientific works of the Institute of Geography, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Yearbook 2004. Yekaterinburg: IGG UB RAS, 2005, pp. 423—433. (in Russian)
- Стратиграфический кодекс России. Издание третье. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. 96 с.
- Stratigraphic Code of Russia. Third edition. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 2006, 96 p. (in Russian)
- Тимано-Печорский седиментационный бассейн // Атлас геологических карт (литолого-фациальных, структурных и палеогеологических) / Под ред. Богацкого В. И., Ларионовой З. В. Ухта: Изд-во ТПИ НИЦ, 2000.
- Timan-Pechora sedimentation basin. Atlas of geological maps (lithological-facies, structural and paleogeological). Eds. Bogatsky V. I., Larionova Z. V. Ukhta: Publishing house TP SRC, 2000. (in Russian)
- 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.
- 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., Dovshikova 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.
- 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.1525-1314.1998.00112x.
- Kober B. Whole-grain evaporation for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations on single zircons using a double-filament thermal ion source // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. V. 93. P. 482—490.
- Kober B. Single grain evaporation combined with Pb+ emitter bedding for $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -age investigations using thermal ion mass spectrometry, and implications to zirconology // Contrib. Mineral. Petrol. 1987. V. 96. P. 63—71.
- Ludwig K. R. SQUID 2 — A User's Manual, rev. 12 Apr, 2009 // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2009. № 5. 110 p.
- Ludwig K. R. Isoplot 3.75, a geochronological toolkit for Excel // Berkeley Geochronology Center Special Publication. 2012. № 5. 75 p.
- Pearce J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate margins // Andesites / ed. R. S. Thorpe. New York: John Wiley & Sons, 1982. P. 525—548.
- Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions for mantle composition and processes // 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.
- Whalen J. B., Currie K. L., Chappell B. W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // Contrib. Miner. and Petrol. 1987. V. 95. P. 407—419. DOI: 10.1007/BF00402202.

Поступила в редакцию / Received 05.09.2023

Метабазиты р. Лунвож (Средний Тиман): петрография, минералогия, петрохимия

А. М. Шмакова

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
amshmakova@geo.komisc.ru

На территории Канино-Тиманского региона в пределах Среднего Тимана на р. Лунвож установлена небольшая дайка неизвестного возраста. В результате проведенных исследований было выяснено, что породы, слагающие это интрузивное тело, по содержанию главных породообразующих элементов соответствуют андезибазальтам. Они практически полностью перекристаллизованы и сложены хлоритом (30–40 %), карбонатами (25–40 %), альбитом (10–15 %), кварцем (10–15 %), мусковитом (5–8 %) и плагиоклазом (меньше 1 %). Акцессорные минералы представлены апатитом, монацитом и рутилом. К рудным минералам относятся пирит, халькопирит, кобальтин. По минеральному составу и петрохимическим характеристикам породы, слагающие дайковое тело на р. Лунвож, отличаются от базитов среднерифейского среднетиманского и девонского канино-тиманского комплексов, выделяемых в Канино-Тиманском регионе.

Ключевые слова: метабазиты, дайковое тело, изотопный анализ углерода и кислорода, река Лунвож, Средний Тиман.

Metabasites along the Lunvozh river (Middle Timan): petrography, mineralogy, petrochemistry

A. M. Shmakova

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

A small dike of unknown age was found on the territory of the Kanin-Timan region within the Middle Timan along the Lunvozh river. Our studies revealed that the rocks, composing this intrusive body, corresponded to basaltic andesites according to the content of the main rock-forming elements. They were almost completely recrystallized and composed of chlorite (30–40 %), carbonates (25–40 %), albite (10–15 %), quartz (10–15 %), muscovite (5–8 %) and plagioclase (less than 1 %). Accessory minerals were represented by apatite, monazite and rutile. Ore minerals included pyrite, chalcopyrite, and cobaltine. According to the mineral composition and petrochemical characteristics, the rocks composing the dike body along the Lunvozh river, differed from the basites of the Middle Riphean Middle Timan and Devonian Kanin-Timan complexes identified in the Kanin-Timan region.

Keywords: metabasites, dike body, isotope analysis of carbon and oxygen, Lunvozh river, Middle Timan.

Введение

Канино-Тиманский регион, расположенный на северо-востоке европейской части России, — это территория, включающая Тиманский кряж (Тиман) и п-ов Канин, в неотектоническом плане представляющая собой гряду, вытянутую в северо-западном направлении на 1150 км при ширине 80–160 км и являющуюся юго-западным ограничением Печорской плиты. Эта гряда образована цепочкой поднятий, в пределах которых участками выходят на поверхность метаморфизованные верхнедокембрийские осадочные толщи и прорывающие их позднедокембрийские магматические породы. В среднем-позднем рифее эта область представляла собой пассивную континентальную окраину Восточно-Европейского палеоконтинента (Пучков, 2010). В среднепозднерифейское, а затем и в девонское время в пределах Канино-Тиманского региона широко проявился внутриплитный, преимущественно базитовый магматизм (Ивенсен, 1964; Мальков, 1973; Гецен, 1975; Костюхин, Степаненко, 1987; Макеев и др., 2008; Удоратина и др., 2014; Пармузин и др., 2015).

С северо-запада на юго-восток Тиман подразделяют на Северный, Средний и Южный. Средний Тиман

включает в себя Вольско-Вымскую, гряду, Цилемское и Четласское поднятия.

В пределах Среднего Тимана к проявлениям внутриплитного базитового магматизма рифейского возраста относятся метадолериты и метагаббро, образующие силлы и дайки. Данные породы установлены на Четласском поднятии и выделяются в среднетиманский метагаббро-долеритовый комплекс ($v\beta RF_2sr$) (Пармузин и др., 2015). К продуктам девонского внутриплитного магматизма относят кимберлитовые трубки, выделяемые в умбинский кимберлитовый комплекс (iD_3um), который объединяет породы Умбинской, Средненской и Водораздельной кимберлитовых трубок (Пармузин и др., 2015). Данные породы известны на Вольско-Вымской гряде. Кроме того, на территории Вольско-Вымской гряды установлены единичные дайки долеритов, относимые к девонскому канино-тиманскому долеритовому комплексу (βD_3kt) (Проскурин, Липатов, 1963). К данному комплексу принадлежат также большие площади покровных базальтов, даек и силлов долеритов, развитых в пределах всего Канино-Тиманского региона (Проскурин, Липатов, 1963; Пармузин и др., 2015).

Для цитирования: Шмакова А. М. Метабазиты р. Лунвож (Средний Тиман): петрография, минералогия, петрохимия // Вестник геонаук. 2023. 10 (346). С. 26–36. DOI: 10.19110/geov.2023.10.3

For citation: Shmakova A. M. Metabasites along the Lunvozh river (Middle Timan): petrography, mineralogy, petrochemistry. Vestnik of Geosciences, 2023, 10 (346), pp. 26–36, doi: 10.19110/geov.2023.10.3

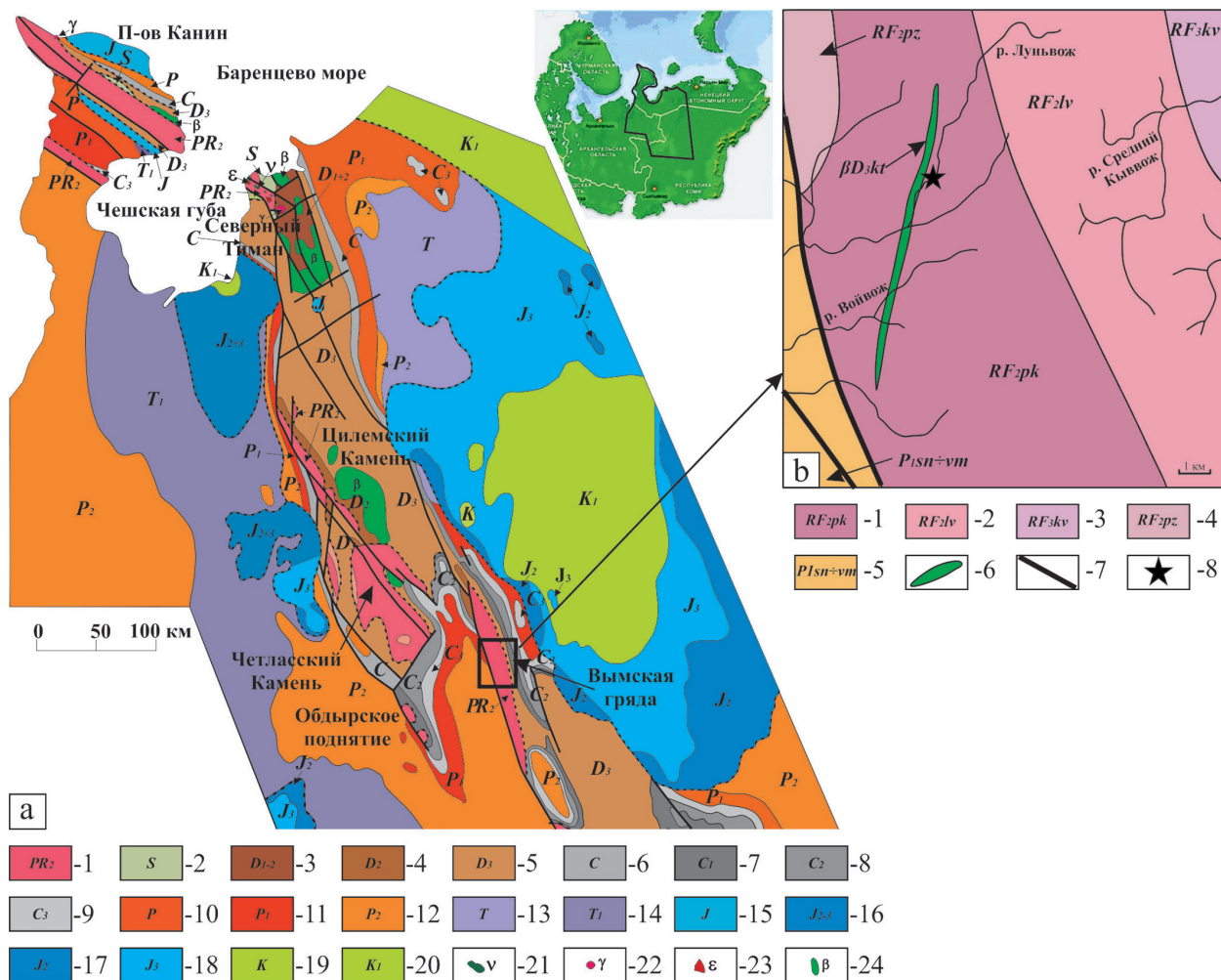


Рис. 1. Геологическая карта-схема Тимана и полуострова Канин (Оловянишников, 2004) — а; карта-схема геологического строения района работ, Вольско-Вымская гряда (Проскурин, Липатов, 1963; Пармузин и др., 2015) — б.

a: 1 — верхний протерозой (PR₂), 2 — силур (S), 3 — нижний и средний девон (D₂₋₃), 4 — средний девон (D₂), 5 — верхний девон (D₃), 6 — карбон (C), 7 — нижний карбон (C₁), 8 — средний карбон (C₂), 9 — верхний карбон (C₃), 10 — пермь (P), 11 — нижняя пермь (P₁), 12 — верхняя пермь (P₂), 13 — триас (T), 14 — нижний триас (T₁), 15 — юра (J), 16 — средняя и верхняя юра (J₂₋₃), 17 — средняя юра (J₂), 18 — верхняя юра (J₃), 19 — мел (K), 20 — нижний мел (K₁), 21 — долериты (v), 22 — гранитоиды (γ), 23 — сиениты (ε), 24 — базальты (β); **b:** 1—3 — вымская серия среднего-верхнего рифея: 1 — покьюская свита (RF₂pk), 2 — лунвожская свита (RF₂lv), 3 — кыквожская свита (RF₃kv); кислоручейская серия среднего рифея: 4 — пижемская свита (RF₂pz); 5 — пермская система, нижний отдел, синдорская, вычегодская и вымская свиты объединенные (P₁sn÷vm); 6 — дайка долеритов канино-тиманского комплекса (βD₃kt), 7 — разрывные нарушения, 8 — коренной выход дайки метабазитов на р. Лунвож

Fig. 1. Geological map-scheme of Timan and the Kanin Peninsula (Olovyanishnikov, 2004) — a; schematic map of the geological structure of the work area, Volsko-Vymskaya ridge (Proskurin, Lipatov, 1963; Parmuzin et al., 2015) — b.

a: 1 — Upper Proterozoic (PR₂), 2 — Silurian (S), 3 — Lower and Middle Devonian (D₂₋₃), 4 — Middle Devonian (D₂), 5 — Upper Devonian (D₃), 6 — Carboniferous (C), 7 — Lower Carboniferous (C₁), 8 — Middle Carboniferous (C₂), 9 — Upper Carboniferous (C₃), 10 — Permian (P), 11 — Lower Permian (P₁), 12 — Upper Permian (P₂), 13 — Triassic (T), 14 — Lower Triassic (T₁), 15 — Jurassic (J), 16 — Middle and Upper Jurassic (J₂₋₃), 17 — Middle Jurassic (J₂), 18 — Upper Jurassic (J₃), 19 — Cretaceous (K), 20 — Lower Cretaceous (K₁), 21 — dolerites (v), 22 — granitoids (γ), 23 — syenites (ε), 24 — basalts (β); **b:** 1—3 — Vym series of the Middle-Upper Riphean: 1 — Pokyu Formation (RF₂pk), 2 — Lunvozh Formation (RF₂lv), 3 — Kykvozh Formation (RF₃kv); Kistrucheykskaya series of the Middle Riphean: 4 — Pizhma Formation (RF₂pz); 5 — Permian system, lower section, Sindor, Vychegda and Vym Formations combined (P₁sn÷vm); 6 — dolerite dike of the Kanino-Timan complex (βD₃kt), 7 — faults, 8 — primary outcrop of a metabasite dike on the Lunvozh river

В западной части Вольско-Вымской гряды на р. Лунвож на дневную поверхность выходят две дайки, сложенные породами основного состава. Одна из даек, вытянутая в субмеридиональном направлении более чем на 5 км, имеет мощность 20—25 м. Она сложена темно-серыми долеритами различной степени дифференциации, относящимися к девонскому канино-тиманскому комплексу (Проскурин, Липатов, 1963). Второе дайковое тело, имеющее отличное от перво-

го северо-западное простирание, значительно меньшее по мощности (около 50 см), сложено темно-серыми измененными породами основного состава (рис. 1). На сегодняшний день нет информации о минеральном и химическом составе, структуре и возрасте пород, слагающих данное интрузивное тело. Исследуемое дайковое тело может являться спутником соседней большой девонской дайки или быть самостоятельным.

Целью данной работы является всесторонняя характеристика пород этого небольшого интрузивного тела и сопоставление с породами базитовых комплексов в Канино-Тиманском регионе.

Методы исследования

Описание и фотографирование петрографических шлифов горных пород проводилось на поляризационном микроскопе Olympus BX51. Изотопный состав углерода и кислорода измерялся по породе. Разложение карбонатов в ортофосфорной кислоте и измерение изотопного состава углерода и кислорода в режиме непрерывного потока гелия (метод CF-IRMS) производились на аналитическом комплексе фирмы ThermoFisher Scientific (Бремен, Германия), включающем систему подготовки и ввода проб GasBench II, соединенную с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения $\delta^{13}\text{C}$ даны в промилле относительно стандарта V-PDB, $\delta^{18}\text{O}$ — стандарта V-SMOW. При калибровке использованы международные стандарты NBS-18 и NBS-19. Ошибка определения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ составляет $\pm 0.15\text{‰}$ (1σ). Химический состав минералов и растровые снимки получены с помощью сканирующего микроскопа Tescom Vega 3 LMN с энергодисперсным спектрометром X-Max (аналитики — Е. М. Тропников, А. С. Шуйский) в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Геологическое положение объекта исследований

Объектом исследования является дайковое тело, которое располагается в западной части Вольско-Вымской гряды, выходя на поверхность на обоих берегах р. Лунвож в верхнем течении, ~ в 3 м выше уреза воды. Интрузив сложен породами темно-серого цвета и имеет видимую мощность ~ 50 см (рис. 2). Дайка субвертикальная, северо-западного простирания, ази-

мут простирания — 310° . Интрузив прорывает отложения похъюской свиты среднего рифея (RF_{2pk}) (рис. 1), представленные в обнажившейся части разреза серыми слоистыми метаалевролитами. Контакты с вмещающими породами похъюской свиты резкие, отмечается небольшое ороговикование и присутствие зерен карбонатов в экзоконтактовой зоне.

Петрографические и минералогические особенности пород

Текстура пород, слагающих изучаемую дайку, дикривная, линзовидно-полосчатая, обусловленная вытянутыми в одном направлении (параллельно плоскостям контакта) агрегатами хлорита. Вероятнее всего данная текстура является реликтовой флюидальной текстурой. Породы практически полностью перекристаллизованы и имеют лепидогранобластовую структуру. Сохранившиеся единичные лейсты плагиоклаза могут указывать на то, что порода могла иметь первичную офитовую или порфиоровую структуру. Реликтовые зерна плагиоклаза в породе составляют менее 1 %, остальные минералы имеют вторичное происхождение и представлены хлоритом (30–40 %), карбонатами (25–40 %), альбитом (10–15 %), кварцем (10–15 %) и мусковитом (5–8 %).

Плагиоклаз представлен единичными крупными лейстами длиной 0.6–1.2 мм и шириной до 0.3 мм, для которых характерны простые и полисинтетические двойники. Минерал частично сосюритизирован, угол погасания составляет 14–16°, что соответствует альбиту. Состав плагиоклаза отражает результаты вторичных преобразований. Карбонаты представлены анкеритом. Минерал формирует зерна неправильной и изометричной формы (0.1–0.6 мм), реже ромбоэдрические кристаллы (до 0.2 мм) (рис. 3, b–d; табл. 3), часто образующие скопления. Мусковит встречается в виде редких чешуек (от 0.1 до 0.4 мм) (рис. 3, a, c; 4, 5, c;

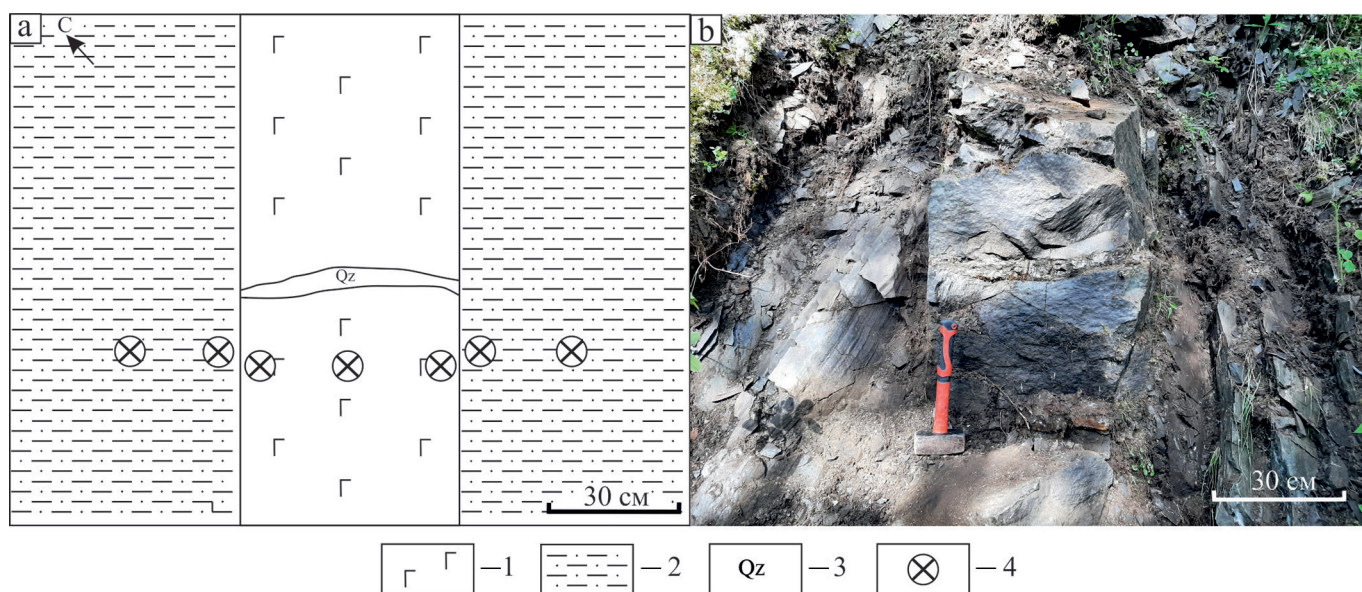


Рис. 2. Схема опробования дайки метабазитов на р. Лунвож: 1 — метаморфизованные породы основного состава, 2 — метаалевролиты, 3 — кварц, 4 — место пробоотбора

Fig. 2. Scheme of sampling of the metabasites dike on the Lunvozh River: 1 — metamorphosed mafic rocks, 2 — metasiltstones, 3 — quartz, 4 — sampling site



табл. 1). Кварц представлен зернами неправильной формы размером от 0.05 до 0.2 мм. Ксеноморфные выделения альбита, вероятно образовавшиеся при перекристаллизации плагиоклаза, имеют размеры от 25 до 100 мкм (рис. 4, 5; табл. 1). Хлорит выполняет межзерновое пространство и представлен в виде мелких чешуек, по химическому составу соответствующих рипидолиту и пикнохлориту (рис. 4, 5, b; табл. 1). В породе отмечаются кварцевые прожилки мощностью 0.4–7 мм, ориентированные поперек директивной текстуры (ширина до 0.4 мм) (рис. 3, e, f). Их наличие в дайке может свидетельствовать о том, что породы испытали тектоническое воздействие. Одна из наиболее крупных кварцевых жилок мощностью 7 мм содержит

долиту и пикнохлориту (рис. 4, 5, b; табл. 1). В породе отмечаются кварцевые прожилки мощностью 0.4–7 мм, ориентированные поперек директивной текстуры (ширина до 0.4 мм) (рис. 3, e, f). Их наличие в дайке может свидетельствовать о том, что породы испытали тектоническое воздействие. Одна из наиболее крупных кварцевых жилок мощностью 7 мм содержит

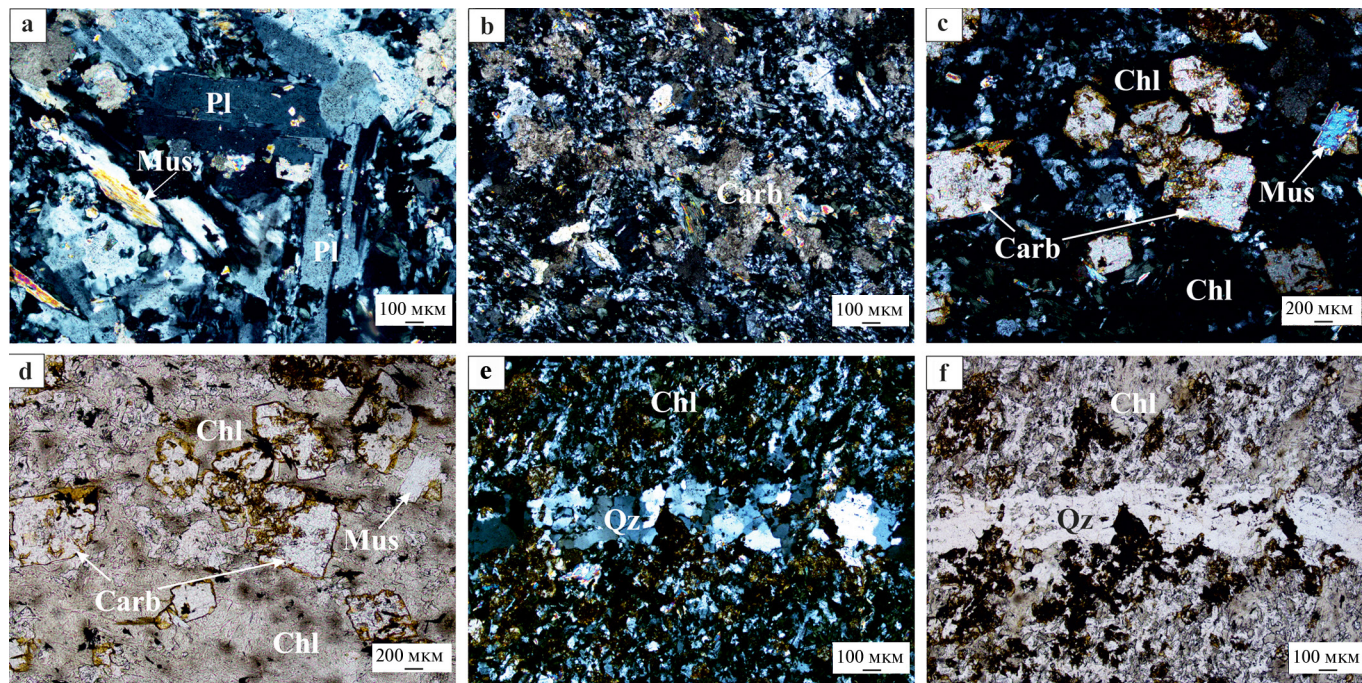


Рис. 3. Микрофотографии шлифов метабазитов дайки на р. Лунвож: а — реликтовые кристаллы плагиоклаза, б — лепидогранобластовая структура, обусловленная наличием чешуек мусковита и зерен карбонатов неправильной формы; с, d — ромбоэдрические кристаллы анкерита, е, f — кварцевая прожилка в метабазитах (а–с, е — фото с анализатором, d, f — фото без анализатора). Условные обозначения: Pl — плагиоклаз, Carb — карбонат, Chl — хлорит, Ab — альбит, Mus — мусковит, Qz — кварц

Fig. 3. Microphotographs of thin sections of metabasites dikes on the Lunvozh river: a — relict plagioclase crystals, b — lepidogranoblastic structure due to the presence of muscovite flakes and non-parville carbonate grains; c, d — rhombohedral crystals of ankerite, e, f — quartz veinlet in metabasites (a–c, e — photo with an analyzer, d, f — photo without an analyzer). Legend: Pl — plagioclase, Carb — carbonate, Chl — chlorite, Ab — albite, Mus — muscovite, Qz — quartz

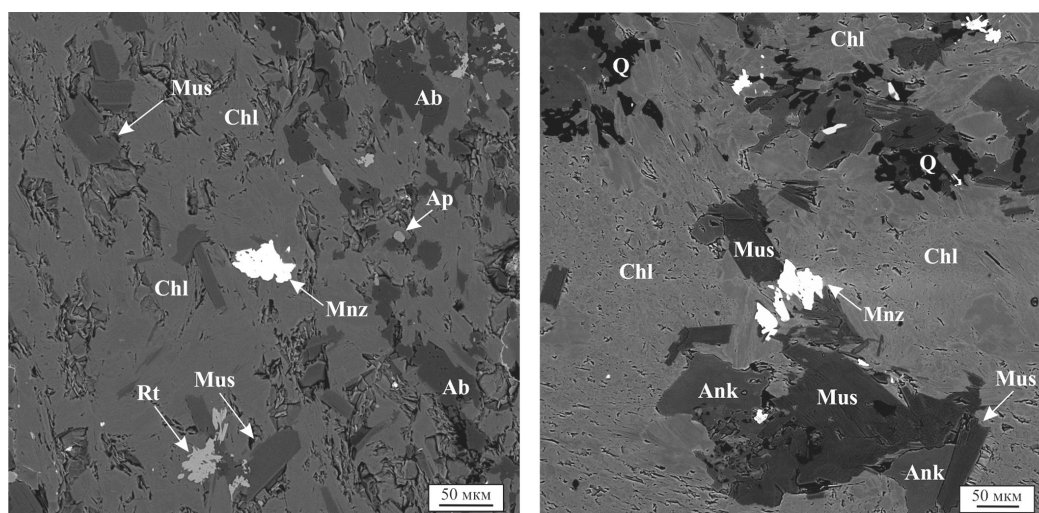


Рис. 4. Минералы метабазитов в режиме упругоотраженных электронов. Условные обозначения: Ab — альбит, Ank — анкерит, Ap — апатит, Chl — хлорит, Mnz — монацит, Mus — мусковит, Q — кварц, Rt — рутил

Fig. 4. Backscattered electron images of minerals in metabasites. Legend: Ab — albite, Ank — ankerite, Ap — apatite, Chl — chlorite, Mnz — monazite, Mus — muscovite, Q — quartz, Rt — rutile

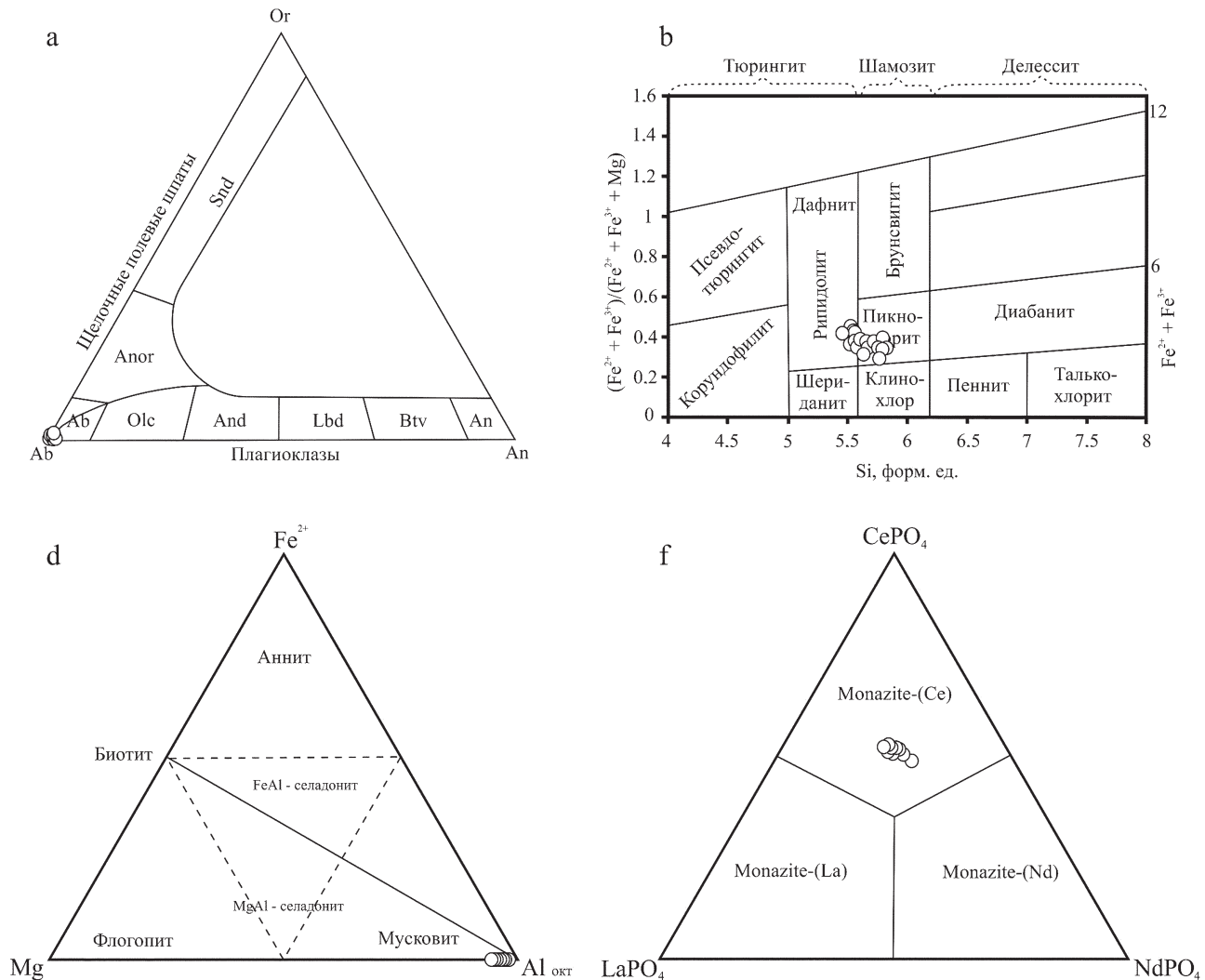


Рис. 5. Диаграммы, иллюстрирующие состав минералов метабазитов: а — тройная диаграмма Ab — Or — An для щелочных полевых шпатов и плагноклаза; б — диаграмма $(Fe^{2+}+Fe^{3+})/(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mg) - (Si)$ для хлорита (Hey, 1954); с — тройная диаграмма Mg — Fe^{2+} — $Al_{окт}$ для слюд (Васильев и др., 2012); д — тройная диаграмма $LaPO_4 - CePO_4 - NdPO_4$ для монацита (по Nickel, 1992)

Fig. 5. Diagrams illustrating the mineral composition of metabasites: a — ternary diagram Ab — Or — An for alkali feldspars and plagioclase; b — diagram $(Fe^{2+}+Fe^{3+})/(Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mg) - (Si)$ for chlorite (Hey, 1954); c — ternary diagram Mg — Fe^{2+} — $Al_{окт}$ for mica (Vasiliev et al., 2012); d — ternary diagram $LaPO_4 - CePO_4 - NdPO_4$ for monazite (Nickel, 1992)

зерна кальцита, внутри которых видны мелкие агрегаты гидроксидов железа. По данным микрозондового анализа в породе также были установлены: апатит, монацит, рутил, пирит, халькопирит и кобальтин. Апатит представлен удлиненными кристаллами с диаметром поперечного сечения до 0.03 мм. За счет примесей фтора (3.27—4.90 вес. %), минерал можно отнести к фторсодержащей разновидности — фторапатиту (табл. 2), характерной для пород магматического происхождения (Юдович, 2022). На первичное магматическое происхождение указывают и сохранившиеся призматические формы кристаллов. В апатите отсутствуют примеси Cl, однако отмечается FeO (0.18—0.84 мас. %) (рис. 4; табл. 2). Монацит встречается в виде зерен неправильной угловатой формы, размером не более 100 мкм. По химическому составу минерал относится к цериевой разновидности (рис. 4, 5, d; табл. 4). Судя по неправильной форме выделений, монацит является вторичным минералом. Возможно, при гидротермальных процессах из апатита были вынесены РЗЭ, которые в дальнейшем вошли в состав монацита.

Рутил представлен агрегатами неправильной формы, размером до 100 мкм (табл. 1, рис. 4). Данный минерал мог образоваться за счет перекристаллизации первичных титансодержащих темноцветных и рудных минералов. Из рудных минералов установлены пирит и халькопирит, которые встречаются в единичных зернах неправильной формы, размером около 100 мкм. Также отмечаются единичные зерна кобальтина изометричной формы размером от 20 до 70 мкм (табл. 5). Выделения кобальтина окаймлены кобальтсодержащим арсенопиритом.

Таким образом, в рассматриваемых породах к первичным минералам магматического генезиса можно отнести только плагноклаз и апатит. Все остальные минералы — монацит, мусковит, альбит, хлорит, кварц и рутил, а также, вероятно, рудные минералы — имеют вторичное происхождение. Судя по минеральному составу и реликтам оцитового или плагнофиновой структуры, исходными породами, скорее всего, являлись долериты или порфиновые базальты. Под воздействием гидротермальных растворов породы были практически

**Таблица 1.** Химический состав минералов дайки метабазитов на р. Лунвож (мас. %)**Table 1.** Chemical composition of minerals from the metabasites dike on the Lunvozh river (wt. %)

№ обр. Sample No.	Альбит / Albite			Хлорит / Chlorite			Мусковит / Muscovite			Рутил / Rutile		
	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5
SiO ₂	67.47	68.89	68.72	26.63	27.96	28.56	46.63	47.89	47.04	—	—	—
TiO ₂	—	—	—	—	—	—	0.11	0.16	—	98.47	95.79	97.43
Al ₂ O ₃	20.25	19.8	20.19	20.73	19.98	20.06	34.86	34.67	35.91	—	—	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0.27	0.4	—	0.24	—	0.73	0.63	—	—
FeO	0.28	—	0.17	21.4	18.6	16.88	1.09	0.67	1.25	0.49	0.29	0.87
MgO	—	—	—	17.77	20	21.91	0.92	1.16	1.04	—	—	—
CaO	0.66	0.13	0.29	—	—	—	—	—	—	0.15	—	—
Na ₂ O	10.99	11.46	11.13	—	—	—	0.52	0.32	0.47	—	—	—
K ₂ O	—	—	—	—	—	—	10.09	10.04	10.48	—	—	—
P ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.18	1.11
V ₂ O ₅	—	—	—	—	—	—	0.17	0.25	—	—	1.18	1.11
Сумма Total	99.65	100.28	100.5	86.8	86.94	87.4	94.63	95.15	96.93	99.75	97.26	99.4

полностью перекристаллизованы, наиболее ярко проявились процессы карбонатизации и хлоритизации.

Петрохимическая характеристика метабазитов

Породы, слагающие дайковое тело, содержат большое количество карбонатов и хлорита, в связи с этим достаточно велики потери при прокаливании (9.57—12.61 %). Для сопоставления рассматриваемых пород с базитами Среднего Тимана и п-ова Канин их состав был пересчитан на безводный остаток. Породы изучаемой нами дайки содержат SiO₂ от 52.92—54.14 мас. % (здесь и ниже, кроме табл. 5, концентрации оксидов в исследуемых нами породах даны в пересчете на безводный остаток). По петрохимической классификации породы соответствуют андезитобазальтам (рис. 6). По величине отношения Na₂O/K₂O (2.73—2.85) тип щелочности пород определяется как калиево-натриевый (Петрографический кодекс, 2009), за исключением одного состава (Na₂O/K₂O = 0.82), который относится к калиевому типу (табл. 6).

Судя по высоким величинам отношений FeO + Fe₂O₃/MgO относительно содержания (Na₂O + K₂O),

базиты относятся к толеитовой серии (рис. 7, б), а по отношению (FeO* + TiO₂) и MgO они сопоставимы с высокожелезистыми толеитами (рис. 7, а). По содержанию TiO₂ породы являются умеренно низкотитанистыми (TiO₂ = 1.16—1.28), а по величине коэффициента глиноземистости al^* (0.62—0.72) они относятся к низкоглиноземистым породам (Практическая..., 2017).

Таблица 2. Химический состав апатита дайки метабазитов на р. Лунвож (мас. %)**Table 2.** Chemical composition of apatites from the metabasites dike on the Lunvozh river (wt. %)

№ обр. Sample No.	Апатит / Apatite		
	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5
FeO	0.84	0.18	0.31
CaO	54.07	55.21	54.46
P ₂ O ₅	41.17	41.3	41.56
Cl	—	—	—
F	3.46	3.27	4.11
Сумма / Total	96.08	96.69	96.33

Таблица 3. Химический состав карбонатов и гидроксидов железа дайки метабазитов на р. Лунвож (мас. %)**Table 3.** Chemical composition of carbonates of the metabasites dike on the Lunvozh river (wt. %)

№ обр. Sample No.	Анкерит / Ankerite			Кальцит / Calcite			Гидроксиды железа Fe hydroxides		
	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-3	ST-1-3	ST-1-3	ST-1-3	ST-1-3	ST-1-3
SiO ₂	—	—	—	—	—	—	5.45	4.53	4.8
Al ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—	0.87	0.34	—
FeO	9.69	7.88	10.16	0.51	0.27	0.22	59.25	52.71	49.21
MnO	0.9	1.71	0.39	1.92	0.93	0.29	2.5	2.67	3.26
MgO	14.15	14.26	14	0.27	0.4	0.42	0.86	0.72	0.95
CaO	29.2	29.4	28.53	48.95	49.82	51.74	4.18	9.69	11.22
Сумма / Total	53.96	53.26	53.08	51.65	51.43	52.68	73.11	70.66	69.46

**Таблица 4.** Химический состав монацита дайки метабазитов на р. Лунвож (мас. %)**Table 4.** Chemical composition of monazites from the metabasites dike on the Lunvozh river (wt. %)

№ обр. Sample No.	Монацит / Monazite					
	ST-1-3	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-5
P ₂ O ₅	29.13	29.96	29.43	29.43	29.56	29.74
La ₂ O ₃	13.51	14.42	13.85	14.16	15.39	14.16
Ce ₂ O ₃	30.43	31.48	31.06	31.26	31.31	31.74
Pr ₂ O ₃	3.63	3.84	4.29	3.84	3.61	3.56
Nd ₂ O ₃	14.38	14.25	14.84	14.49	13.33	14.62
Sm ₂ O ₃	2.43	2.32	2.48	2.77	1.98	2.33
Gd ₂ O ₃	1.18	1.45	1.59	1.45	1	1.09
Y ₂ O ₃	1.13	0.77	1.5	1.13	1.44	1.15
ThO ₂	1.42	0.78	—	0.53	—	0.55
CaO	0.23	0.23	0.11	—	0.44	0.14
SiO ₂	0.35	0.21	0.27	0.29	0.25	0.33
FeO	0.61	0.47	0.28	0.31	—	0.67
Сумма Total	98.42	100.18	99.69	99.66	98.3	100.08

Таблица 5. Химический состав рудных минералов дайки метабазитов на р. Лунвож (мас. %)**Table 5.** Chemical composition of ore minerals of the metabasites dike on the Lunvozh river (wt. %)

№ обр Sample No.	Пирит Pyrite	Халькопирит Chalcopyrite	Кобальтин Cobaltine	
	ST-1-5	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-5
Точка / Point	ST-1-5	ST-1-4	ST-1-5	ST-1-5
S	52.4	35.03	19.06	19.4
Fe	45.85	30.72	3.96	4.4
Cu	—	33.95	—	—
Ni	0.23	—	10.47	9.11
As	0.62	—	45.14	45.25
Sb	0.61	—	—	—
Co	—	—	21.5	22.1
Сумма / Total	99.71	99.69	100.13	100.26

Изотопный состав углерода и кислорода

В породах, слагающих небольшую рассматриваемую нами дайку на р. Лунвож, отмечаются высокие содержания карбонатов, представленных ромбоздрическими и изометричными зернами анкерита, а также зернами кальцита, приуроченными к кварцевой прожилке. Поскольку количество карбонатных минералов довольно высокое, был проведен изотопный анализ углерода и кислорода для определения их происхождения и получены следующие значения: $\delta^{13}\text{C} = -15.24 \text{—} (-15.9) \text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 15.32 \text{—} 21.35 \text{‰}$.

Обсуждение результатов

Породы, слагающие дайковое тело на р. Лунвож, сильно отличаются по минеральному составу и структуре от базитов среднерифейского среднетиманского метагббро-долеритового и девонского канино-тиманского долеритового комплексов, развитых на Среднем Тимане и п-ове Канин.

Девонские долериты достаточно слабо преобразованы вторичными процессами и состоят преимущественно из неизмененных плагиоклазов и пироксенов, в единичных случаях хлоритизированных, а также титаномagnetита, халькопирита и пирита. Из акцессорных минералов встречаются апатит и циркон (Пармузин и др., 2015; Шмакова, Куликова, 2020). В некоторых случаях, как, например, в долеритах крупной дайки, выходящей на дневную поверхность на берегах р. Лунвож, плагиоклаз может быть сосюритизирован. Также в породах некоторых обнажений на р. Цильме (Средний Тиман) отмечается большое количество миндалинов, заполненных хлоритом с карбонатной каймой.

Среднерифейские базиты представлены рассланцованными метагббро и метадолеритами. Слабоизмененные породы сложены преимущественно плагиоклазом и пироксеном. Из акцессорных минералов отмечаются циркон, апатит и титанит, из рудных — магнетит и ильменит*. Часто среднерифейские базиты превращены в зеленые сланцы с реликтами оливина и пироксена. Основная масса пород сложена мелкозернистым и мелкочешуйчатым хлорит-биотитовым агрегатом с вкрапленниками магнетита и игольчатого тонкопризматического рутила. Порфириобласты состоят из хлорита и биотита (Пармузин и др., 2015).

В ходе проведенных исследований было установлено, что рассматриваемое нами дайковое тело на р. Лунвож сложено хлоритом (30—40 %), анкеритом (25—40 %), альбитом (10—15 %), кварцем (10—15 %), мусковитом (5—8 %) и плагиоклазом (меньше 1 %). Акцессорные минералы представлены апатитом, монацитом и рутилом, рудные — пиритом, халькопиритом

* Отчет о производстве опытной групповой геологической съемки м-ба 1 : 50 000 на Среднем Тимане в 1972—1976 гг. (Геологическое строение территории листов Q-39-101 — А, В, В, Г; 102 — В; 112 — В; Г; 113 — А, В, В, Г; 114 — А, В, Г; 115 — В; 125 — В, Г; 126 — А, В, В, Г; 127 — А, В; 138 — А, В; 139 — А по результатам работ Тиманской ГПСИ) 582 стр., 78 л. граф. прил., библи., 134. Ухтинское ТГУ, УГРЭ. Ухта, февраль 1978 / В. М. Пачуковский, А. М. Плякин, В. И. Граф, Н. В. Опаренков, П. Н. Копытин, Н. С. Никитин, А. А. Лютоев, Г. К. Лебедева

* Report on the production of an experimental group geological survey at a scale of 1 : 50 000 in Middle Timan in 1972—1976. (Geological structure of the territory sheets Q-39-101 — А, В, С, D; 102 — В; 112 — В; D; 113 — А, В, С, D; 114 — А, В, D; 115 — С; 125 — В, D; 126 — А, В, С, D; 127 — А, В; 138 — А, В; 139 — А based on the results of the work of the Timansk State Fire Service) 582 pp., 78 l. graph. adj., bibliography, 134. Ukhta TSU, UGRE. Ukhta, February 1978. V. M. Pachukovsky, A. M. Plyakin, V. I. Graf, N. V. Oparenkov, P. N. Kopytin, N. S. Nikitin, A. A. Lyutov, G. K. Lebedeva

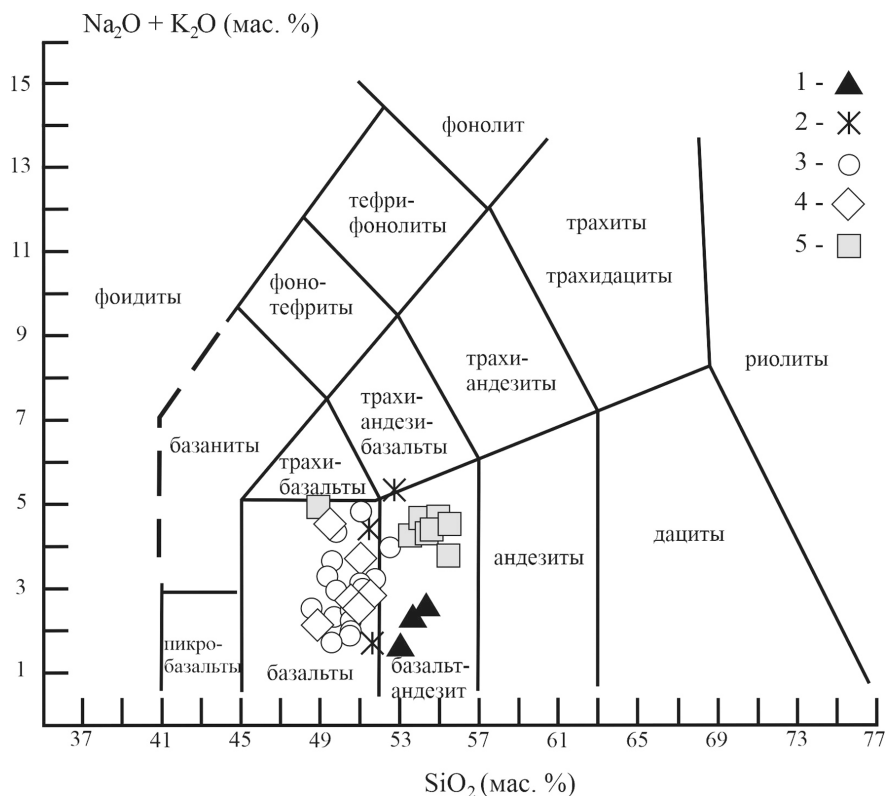


Рис. 6. Классификационная диаграмма $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ (по Le Bas, 1986) для магматических пород основного состава Среднего Тимана и п-ова Канин: 1 — метабазиты дайкового тела на р. Лунвож, 2—4 — девонские базальтоиды канино-тиманского комплекса: 2 — района р. Лунвож (Средний Тиман), 3 — п-ова Канин (Шмакова и др., 2022), 4 — района р. Цильмы (Средний Тиман), 5 — среднерифейские метагабброиды и метадолериты среднетиманского комплекса (Костюхин, Степаненко, 1987). *Примечание:* для сопоставления исследуемых метагаббро с базитами Среднего Тимана и п-ова Канин химический состав данных пород был пересчитан на безводный остаток

Fig. 6. Classification diagram $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{-SiO}_2$ according (to Le Bas, 1986) for igneous rocks of basic composition of the Middle Timan and Kanin Peninsula. *Legend:* 1 — metabasites of the dike body on the Lunvozh river, 2—4 — Devonian basalts of the Kanin-Timan complex: 2 — area of the Lunvozh river (Middle Timan), 3 — Kanin Peninsula (Shmakova et al., 2022), 4 — area of the Tsilma river (Middle Timan), 5 — Middle Riphean metagabbroids and metadolerites of the Middle Timan complex (Kostyukhin, Stepanenko, 1987). *Note:* for the distribution of concentrated metagabbro with basites of the Middle Timan and Kanin Peninsula, the chemical composition of these rocks was recalculated to the anhydrous residue

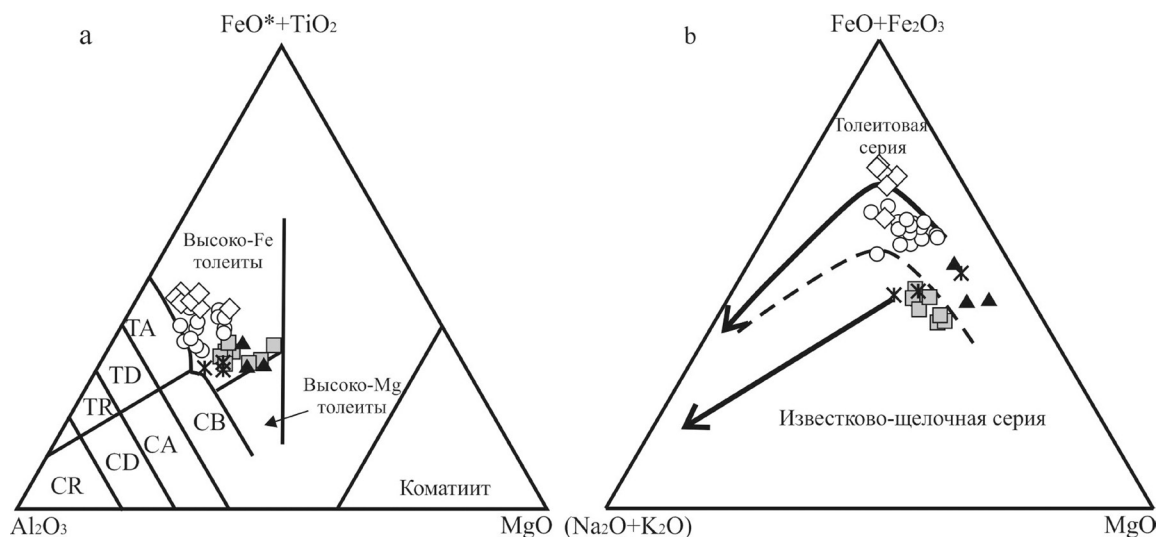


Рис. 7. Классификационные диаграммы для магматических пород основного состава Среднего Тимана и п-ова Канин: **a** — диаграмма $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—FeO}^* + \text{TiO}_2\text{—MgO}$ (Jensen, 1976). Толентовая серия: TA — андезит, TD — дацит, TR — риолит; известково-щелочная серия: CB — базальт, CA — андезит, CD — дацит, CR — риолит; **b** — тройная дискриминационная диаграмма AFM (Irvine, Baragar, 1971). Условные обозначения на рис. 6

Fig. 7. Classification diagrams for mafic igneous rocks of the Middle Timan and Kanin Peninsula: **a** — diagram $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—FeO}^* + \text{TiO}_2\text{—MgO}$ (Jensen, 1976). Tholeiitic series: TA — andesite, TD — dacite, TR — rhyolite; calc-alkaline series: CB — basalt, CA — andesite, CD — dacite, CR — rhyolite; **b** — triple discrimination diagram AFM (Irvine, Baragar, 1971). *Legend in Fig. 6*

и кобальтином. Породы сильно метаморфизованы, этим они отличаются от девонских долеритов канино-тиманского комплекса и отчасти похожи на среднерифейские базиты среднетиманского комплекса. Но при этом рассматриваемые нами метабазиты имеют в своем составе монацит и кобальтин, не характерные ни для девонских, ни для среднерифейских метабазитов, а также содержат большое количество вторичного анкерита.

Выявляются также различия в химическом составе метабазитов дайкового тела и базитов среднерифейского и девонского возраста. По петрохимической классификации породы изучаемого нами дайкового тела на р. Лунвож соответствуют низкощелочным андезибазальтам ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.94\text{—}2.86$) и относятся к высокожелезистым толеитам — низкоглиноземистым ($\text{al}'' = 0.62\text{—}0.72$) и умеренно низкотитанистым ($\text{TiO} = 1.16\text{—}1.28$ мас. %).

Среднерифейские метабазиты среднетиманского комплекса представлены преимущественно андезибазальтами и характеризуются заметно более высокими содержаниями суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.91\text{—}5.12$) (рис. 6) и более широкими вариациями al'' ($0.55\text{—}0.89$) и TiO_2 ($0.90\text{—}1.73$ мас. %) (Костюхин, Степаненко, 1987).

Девонские долериты канино-тиманского комплекса по химическому составу, хоть и немного меньше, но также отличаются от рассматриваемых нами метабазитов. Они содержат меньше SiO_2 и соответствуют преимущественно базальтам нормальной щелочности, содержания суммы щелочей в них более высокие, чем в метабазитах рассматриваемой дайки ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.14\text{—}4.99$) (рис. 6). Девонские долериты отличаются также несколько более высокими значениями коэффициента глиноземистости al'' ($0.67\text{—}1.06$) и относительно повышенными содержаниями TiO_2 ($1.21\text{—}2.46$ мас. %) (Шмакова и др., 2022). Химический состав долеритов крупного дайкового тела на р. Лунвож, расположенного в непосредственной близости от рассматриваемой нами дайки и считающегося девонским (Проскурин, Липатов, 1963), подтверждает эти различия. По сравнению с метабазитами изучаемой нами небольшой дайки эти долериты характеризуются более высоким содержанием щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2\text{—}5.54$) и немного более высокой глиноземистостью ($\text{al}'' = 0.80\text{—}0.96$) при примерно одинаковых концентрациях TiO_2 ($1.11\text{—}1.24$ мас. %).

В породах дайки на р. Лунвож отмечается большое количество карбонатов. Нами был проведен изотопный анализ углерода и кислорода и получены следующие значения: $\delta^{13}\text{C} = -15.24\text{—}(-15.9)$ ‰, $\delta^{18}\text{O} = 15.32\text{—}21.35$ ‰. Для окисленных форм углерода, характерных для карбонатов из магматических пород, значения $\delta^{13}\text{C}$ варьируют в очень широких пределах — от $+2.9$ до -18.2 ‰ относительно PDB (Фор, 1989). Считается, что окисленные формы углерода имеют в магматических породах вторичное происхождение и связаны с гидротермальными растворами, изотопный состав углерода карбонатных форм которых они и отображают (Фор, 1989). Возможно, в рассматриваемых нами породах карбонаты образовались под воздействием гидротермальных растворов. Х. П. Тейлором было установлено, что значения $\delta^{18}\text{O}$ большинства магматических и метаморфических пород варьируют в пределах от $+5$ до 15 ‰ (Фор, 1989), однако для магматических пород часто отмечаются более низкие значения изотопов кис-

Таблица 6. Химический состав пород дайки на р. Лунвож (мас. %)

Table 6. Chemical composition of dike rocks on the Lunvozh river (wt. %)

№ обр. Sample No.	ST-1-3	ST-1-4	ST-1-5
SiO_2	48.07	47.37	45.47
TiO_2	1.12	1.12	1.00
Al_2O_3	13.27	12.96	12.1
Fe_2O_3	1.82	1.15	1.07
FeO	8.8	7.19	7.56
MnO	0.16	0.16	0.18
CaO	4.82	5.04	5.82
MgO	8.39	9.03	10.06
K_2O	0.6	0.67	0.92
Na_2O	1.71	1.83	0.75
P_2O_5	0.26	0.26	0.23
п.п.п / loi	9.57	11.22	12.61
Сумма / Total	98.59	98.00	97.77
H_2O^-	0.3	0.22	0.14
CO_2	4.87	6.86	8.39

лорода (от $+10$ до 5 ‰). Также для определения принадлежности карбонатных минералов к породам с мантийным источником часто применяется график со значениями изотопов С и О «мантийного квадрата» (Giuliani et al., 2014). Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ карбонатов дайкового тела на р. Лунвож не попадают в поле карбонатных минералов, соответствующих породам мантийного генезиса (рис. 8). Вероятно, карбонаты исследуемого тела на р. Лунвож имеют гидротермально-метаморфогенное происхождение.

Закключение

Таким образом, выявленные особенности минерального и химического состава пород, слагающих дайку на р. Лунвож, значительно отличают их от базитов среднерифейского и девонского возраста Канино-Тиманского региона. Установлено, что рассматриваемое нами интрузивное тело на р. Лунвож сложено хлоритом ($30\text{—}40$ %), анкеритом ($25\text{—}40$ %), альбитом ($10\text{—}15$ %), кварцем ($10\text{—}15$ %), мусковитом ($5\text{—}8$ %) и плагиоклазом (меньше 1 %). Из аксессуарных минералов отмечаются апатит, монацит и рутил, из рудных — пирит, халькопирит и кобальтин. Породы дайкового тела метаморфизованы, что отличает их от позднедевонских долеритов канино-тиманского комплекса. Среднерифейские базиты среднетиманского комплекса подвержены процессам метаморфизма, поэтому имеют сходство с исследуемым интрузивным телом. Однако наличие в составе дайкового тела на р. Лунвож монацита, кобальтина и анкерита не позволяет относить его к породам девонского долеритового канино-тиманского и среднерифейского среднетиманского комплексов.

Метабазиты дайкового тела отличаются от базитов Канино-Тиманского региона и по химическому составу. Породы изучаемого нами дайкового тела на р. Лунвож соответствуют низкощелочным андезибазальтам



($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 1.94\text{--}2.86$), которые относятся к высокожелезистым толеитам. Породы соответствуют низкоглиноземистым ($\text{al}'' = 0.62\text{--}0.72$) и умеренно низкотитанистым ($\text{TiO} = 1.16\text{--}1.28$ мас. %) разновидностям.

Среднерифейские метабазиты среднетиманского комплекса также соответствуют андезибазальтам, но имеют более высокие суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 3.91\text{--}5.12$) и более широкие вариации al'' ($0.55\text{--}0.89$) и TiO_2 ($0.90\text{--}1.73$ мас. %) (Костюхин, Степаненко, 1987).

Базальтоиды девонского канино-тиманского комплекса по химическому составу содержат меньше SiO_2 , чем интрузивное тело на р. Лунвож, и соответствуют преимущественно базальтам нормальной щелочности с более низкими содержаниями суммы щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.14\text{--}4.99$). Также у девонских долеритов более высокий коэффициент глиноземистости ($\text{al}'' = 0.67\text{--}1.06$) и относительно более повышенные содержания TiO_2 ($1.21\text{--}2.46$ мас. %).

Более крупное тело на р. Лунвож, которое относится к девонским базальтоидам, обладает более высокими содержаниями щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2\text{--}5.54$) и немного более высокой глиноземистостью ($\text{al}'' = 0.80\text{--}0.96$).

Всё вышеперечисленное позволяет сделать вывод, что данное интрузивное тело с большей долей вероятности не относится к среднерифейскому среднетиманскому комплексу и не является сателлитом соседней крупной дайки, сложенной породами девонского канино-тиманского комплекса. Для отнесения изучаемого дайкового тела к какому-либо магматическому комплексу необходимы дальнейшие исследования.

Литература / References

- Богатиков О. А., Богина М. М., Бубнов С. Н., Газеев В. М., Гурбанов А. Г., Докучаев А. Я., Евсеева К. А., Кондрашов И. Н., Кононова В. А., Красивская И. С., Ларионова Ю. О., Лексин А. Б., Носова А. А., Первов В. А., Самсонов А. В., Хренов А. П., Чистков А. В., Шарков Е. В., Юткина Е. В. Типы магм и их источники в истории Земли. Часть 1. Магматизм и геодинамика — главные факторы эволюции Земли. Москва: ИГЕМ РАН, 2006, 398 с.
- Bogatikov O. A., Bogina M. M., Bubnov S. N., Gazeev V. M., Gurbanov A. G., Dokuchaev A. Ya., Evseeva K. A., Kondrashov I. N., Kononova V. A., Krasivskaya I. S., Larionova Yu. O., Leksin A. B., Nosova A. A., Pervov V. A., Samsonov A. V., Khrenov A. P., Chistkov A. N., Sharikov E. V., Yutkina E. V. Types of magmas and their sources in the history of the Earth. Part 1. Magmatism and geodynamics — the main forces of the Earth's evolution. Moscow: IGEM RAS, 2006, 398 p. (in Russian)
- Васильев Н. В., Удоратина О. В., Скоробогатова Н. В., Бородулин Г. П. Слюды месторождения Тайкеу (Полярный Урал): состав и вопросы классификации // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 1 (205). Сыктывкар. С. 9—14.
- Vasiliev N. V., Udoratina O. V., Skorobogatova N. V., Borodulin G. P. Mica of the Taikou deposit (Polar Urals): composition and issues. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2012, No. 1 (205), Syktyvkar, pp. 9—14. (in Russian)

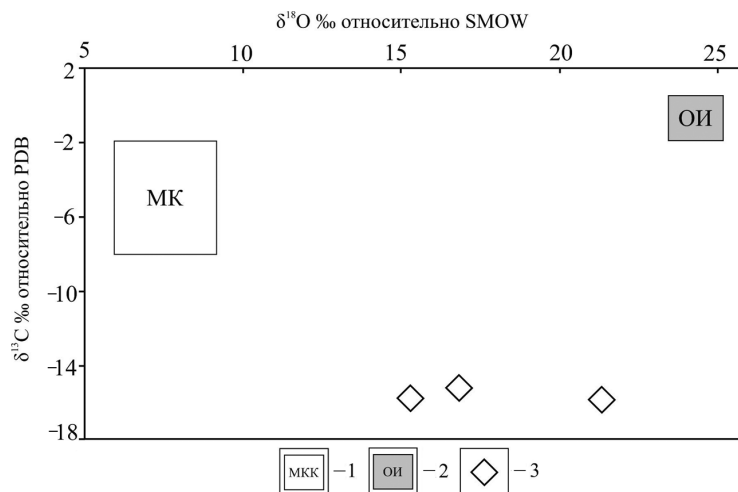


Рис. 8. Изотопный состав углерода и кислорода карбонатов дайкового тела на р. Лунвож: 1 — мантийный квадрат (Giuliani et al., 2014), 2 — осадочные известняки, 3 — карбонаты дайкового тела на р. Лунвож

Fig. 8. Isotopic composition and oxygen of carbonates of the dike body on the Lunvozh river: 1 — mantle square (Giuliani et al., 2014), 2 — sedimentary limestones, 3 — carbonates of the dike body on the Lunvozh river

- Гецен В. Г. Строение фундамента Северного Тимана и полуострова Канин. Л.: Наука, 1975. 144 с.
- Getsen V. G. Construction of the foundation of Northern Timan and the Kanin Peninsula. Leningrad: Nauka, 1975, 144 p. (in Russian)
- Ивсенен Ю. П. Магматизм Тимана и полуострова Канин. М.: Наука, 1964. 123 с.
- Evensen Yu. P. Magmatism of Timan and the Kanin Peninsula. Moscow: Nauka, 1964, 123 p. (in Russian)
- Костюхин М. Н., Степаненко В. И. Байкальский магматизм Канино-Тиманского региона / Под ред. К. А. Шуркина, Л. В. Махлаева. Л.: Наука, 1987. 232 с.
- Kostyukhin M. N., Stepanenko V. I. Baikal magmatism of the Kanino-Timan region. Eds. K. A. Shurkina, L. V. Makhlaeva. Leningrad: Nauka, 1987, 232 p. (in Russian)
- Макеев А. Б., Лебедев В. А., Брянчанинова Н. И. Магматиты Среднего Тимана. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 348 с.
- Makeev A. B., Lebedev V. A., Brianchaninova N. I. Magmatites of Middle Timan. Yekaterinburg: UB RAS, 2008, 348 p. (in Russian)
- Мальков Б. А. Особенности базальтоидного магматизма Канино-Тиманского пояса // Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР и севера Урала. 1973. Т. II. С. 325—329.
- Malkov B. A. Features of basaltoid magmatism of the Kanino-Timan belt. Geology and minerals of the North-East as part of the USSR and the north of the Urals, 1973, V. II, pp. 325—329. (in Russian)
- Оловянишников В. Г. Геологическое развитие Северного Тимана и п-ова Канин. Сыктывкар: Геопринт, 2004. 80 с.
- Olovyanishnikov V. G. Geological development of Northern Timan and the Kanin Peninsula. Syktyvkar: Geoprint, 2004, 80 p. (in Russian)



- Пармузин Н. М., Мазуркевич К. Н., Семенова Л. Р., Коссовая О. Л. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Мезенская. Лист Q-39 — Нарьян-Мар. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 393 с.
- Parmuzin N. M., Mazurkevich K. N., Semenova L. R., Kossovaya O. L. et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Mezen series. Sheet Q-39 — Naryan-Mar. Explanatory letter. St. Petersburg: VSEGEI Map Factory, 2015, 393 p. (in Russian)
- Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования / Глав. ред. О. А. Богатилов, О. В. Петров, А. Ф. Морозов. СПб.: ВСЕГЕИ, 2009. 160 с.
- Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations. Third edition, corrected and expanded. Chief editors O. A. Bogatikov, O. V. Petrov, A. F. Morozov. St. Petersburg: VSEGEI, 2009, 160 p. (in Russian)
- Практическая петрология: методические рекомендации по изучению магматических образований применительно к задачам госгеолкарт. СПб.: ВСЕГЕИ, 2017. 168 с.
- Practical petrology: methodological recommendations for the study of igneous formations in relation to the tasks of state geological maps. St. Petersburg: VSEGEI, 2017, 168 p. (in Russian)
- Проскурин Г. Ф., Липатов В. П. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000. Серия Тиманская. Лист Q-39 — XXXV. Объяснительная записка. М.: Недра, 1963. 47 с.
- Proskurin G. F., Lipatov V. P. State geological map of the USSR. Scale 1 : 200 000. Timanskaya series. Sheet Q-39 — XXXV. Explanatory letter. Moscow: Nedra, 1963, 47 p. (in Russian)
- Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.
- Puchkov V. N. Geology of the Urals and adjacent areas (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa: DesignPoligraphService, 2010, 280 p. (in Russian)
- Степаненко В. И. Канино-Тимано-Печорская провинция позднедевонского внутриплитного магматизма (положение и размеры) // Доклады академии наук. 2016. Т. 467. № 5. С. 572—575.
- Stepanenko V. I. Kanin-Timan-Pechora province of Late Devonian intraplate magmatism (position and dimensions). Doklady Earth Sciences, 2016, V. 467, No. 5, pp. 572—575. (in Russian)
- Тимонин Н. И. Печорская плита: история геологического развития в фанерозое. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 239 с.
- Timonin N. I. Pechora plate: history of geological development in the Phanerozoic. Yekaterinburg: UB RAS, 1998, 239 p. (in Russian)
- Удоратина О. В., Андреичев В. Л., Травин А. В., Саватенков В. М. Базальты Среднего Тимана: Rb-Sr, Sm-Nd и Ar-Ar данные // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: Материалы XVI Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. Т. II. 384 с.
- Udoratina O. V., Andreichev V. L., Travin A. V., Savatenkov V. M. Basalts of Middle Timan: Rb-Sr, Sm-Nd and Ar-Ar data. Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: Proc. of the 16th Geological Congress of the Komi Republic, Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2014, V. II, 384 pp. (in Russian)
- Фор Г. Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.
- For G. Fundamentals of isotope geology. Moscow: Mir, 1989, 590 p. (in Russian)
- Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Рыбина Н. В. Состав апатита как универсальный индикатор геологических процессов. Новосибирск: Свиныин и сыновья, 2022. 140 с.
- Yudovich Ya. E., Ketris M. P., Rybina N. V. The composition of apatite as a universal indicator of geological processes. Novosibirsk: Svinin and Sons, 2022, 140 p. (in Russian)
- Шмакова А. М., Куликова К. В. Петрография и минералогия позднедевонских долеритов центральной и юго-восточной части полуострова Канин // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2020. № 6(46). С. 40—48.
- Shmakova A. M., Kulikova K. V. Petrography and mineralogy of Late Devonian dolerites of the central and southeastern part of the Kanin Peninsula. Proc. of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Series, 2020, No. 6(46), pp. 40—48. (in Russian)
- Шмакова А. М., Куликова К. В., Травин А. В., Богатырев Л. И. Новые $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -данные долеритов Канино-Тиманской провинции внутриплитного магматизма (п-ов Канин) // Вестник геонаук. 2022. 6(330). С. 3—9. DOI:10.19110/geov.2022.6.1
- Shmakova A. M., Kulikova K. V., Travin A. V., Bogatyrev L. I. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data on dolerites of the Kanin-Timan region within plate magmatism (Kanin Peninsula). Vestnik of Geosciences, 2022, 6(330). pp. 3—9. DOI: 10.19110/geov.2022.6.1 (in Russian)
- Hey M. H. A new review of the chlorites // Mineral. Mag. 1954. 224. P. 277—292.
- Irvine T. N., Baragar W. R. A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks // Canad. J. Earth Sci. 1971. Vol. 8. P. 523—548.
- Jensen L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks. Ontario Division Mines Misc. Pap., 1976, Vol. 66. 22 p.
- Giuliani A., Phillips, Kamenetsky V. S., Fiorentini M. L., Farquhar J., Kendrick M. A. Stable isotope (C, O, S) compositions of volatile-rich minerals in kimberlites: A review // Chemical Geology. 2014. V. 374—375. P. 61—83.
- Le Bas M. J., Le Maitre R. W., Streckeisen A. and Zanettin B. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram // Journal of Petrology. 1986. 27, 745—750. doi.org/10.1093/petrology/27.3.745
- Nickel E. H. Solid solutions in mineral nomenclature // Mineralogy and Petrology. 1992. 46(1): 49—53.
- Taylor H. P., Frechen J., Degens E. T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany and the Alnö district, Sweden // Geochim. Cosmochim. 1967. Acta 31. P. 407—430.

Поступила в редакцию / Received 19.09.2023



Образование углеводородных газов доманиковым сланцем при пиролизе в автоклаве в присутствии воды

Д. А. Бушнев¹, Н. С. Бурдельная¹, А. А. Ильченко¹, Я. Д. Сенникова^{1, 2}

¹Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
boushnev@geo.komisc.ru, burdelnaya@geo.komisc.ru, aaderevesnikova@geo.komisc.ru

²Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина, Сыктывкар
yana.sennikova.2000@mail.ru

Образец доманикового сланца из стратотипического разреза по р. Чуть Ухтинского района был подвергнут воздействию температур 250–375 °C в автоклаве в присутствии воды. Состав и выход образовавшихся углеводородных газов был исследован методом газовой хроматографии. Выход всех углеводородов состава C₁–C₅ растёт экспоненциально с ростом температуры в автоклаве. Суммарный выход газообразных углеводородов C₁–C₅ при 375 °C составляет 71 мг/г C_{орг} и достигает 18 мг/г C_{орг} для метана. Повышение температуры в автоклаве приводит к снижению отношения метан/газы C₂₊, что отражает смену механизма образования метана на соответствующем этапе термической эволюции органического вещества доманика.

Ключевые слова: доманиковый сланец, углеводородные газы, водный пиролиз в автоклаве, органическое вещество.

Formation of hydrocarbon gases in Domanik shale during hydrous pyrolysis

D. A. Bushnev¹, N. S. Burdelnaya¹, A. A. Ilchenko¹, Ya. D. Sennikova^{1, 2}

¹Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar,
boushnev@geo.komisc.ru, burdelnaya@geo.komisc.ru

²Pitirim Sorokin Syktyvkar State University, Syktyvkar

A sample of Domanik shale from a stratotype section along the river Chut (Ukhta District, Komi Republic, Russia) was affected to temperatures of 250–375 °C in an autoclave in the presence of water. The composition and yield of the resulting hydrocarbon gases was studied by gas chromatography. The yield of all C₁–C₅ hydrocarbons grew exponentially with increasing temperature in the autoclave. The total yield of gaseous hydrocarbons C₁–C₅ at 375 °C was 71 mg/g C_{org} and reached 18 mg/g C_{org} for methane. The increasing temperature in the autoclave resulted in decreasing ratio of methane/C₂₊ gases, which reflected a changing mechanism of methane formation at the corresponding stage of the thermal evolution of the Domanik organic matter.

Keywords: domanik shale, hydrocarbon gases, hydrous pyrolysis in an autoclave, organic matter.

Введение

Гидротермальный эксперимент с анализом состава углеводородных газов широко проводился с различными породами, обогащёнными органическим веществом (ОВ) в различных методических вариантах. Можно отметить работы Lewan (1985); Andresen et al. (1995); Seewald et al. (1998); Uguna et al. (2013); Калмыков и др. (2021); Ma et al. (2021); Li et al. (2022). Основные варианты поставленных геохимиками экспериментов следующие: автоклав находится под давлением насыщенного пара воды, а сам эксперимент выполняется при температурах, ниже критической для воды (закрытая система) (Andresen et al., 1995); автоклав нагревается при заданном посредством внешнего регулятора давления (полузакрытая система) (Ma et al., 2021). Могут изучаться газообразование различных пород при одной температуре и времени эксперимента (Kotarba, Lewan, 2013; Калмыков и др., 2021) или газообразование одной породы при варьирующих температурах и времени (Seewald et al., 1998; Uguna et al., 2013; Ma et al., 2021).

Доманиковые породы ранее были подвергнуты гидротермальному эксперименту при различных температурах в закрытом автоклаве. Были изучены изменения состава углеводородов битумоида (Бушнев,

Бурдельная, 2013), изотопный состав углерода керогена, битумоида и его фракций (Бушнев и др., 2012), а также изменения химической структуры керогена (Burdelnaya et al., 2014; Бушнев и др., 2019). Состав углеводородных и неуглеводородных газов, образующихся при обработке доманиковой породы в автоклаве, изучался в МГУ (Калмыков и др., 2021), а также КФУ (Каюкова и др., 2022).

Количественные данные о составе и выходе газообразных углеводородов в расчёте на органическое вещество исходной породы, образующихся при термоллизе доманикового сланца в автоклаве в присутствии воды, в настоящее время отсутствуют. Целью работы является постановка и проведение гидротермального эксперимента с доманиковым сланцем из стратотипического разреза, качественный и количественный анализ образующихся газообразных углеводородов состава C₁–C₅.

Экспериментальная часть

Подготовка доманикового сланца. Сланец, отобранный из обнажения по р. Чуть вблизи устья, был раздроблен на кусочки примерным размером 2 × 2 × 0.5 см.

Для цитирования: Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Ильченко А. А., Сенникова Я. Д. Образование углеводородных газов доманиковым сланцем при пиролизе в автоклаве в присутствии воды // Вестник геонаук. 2023.10 (346). С. 37–41. DOI: 10.19110/geov.2023.10.4

For citation: Bushnev D. A., Burdelnaya N. S., Ilchenko A. A., Sennikova Ya. D. Formation of hydrocarbon gases in Domanik shale during hydrous pyrolysis, 2023, 10 (346), pp. 37–41, doi: 10.19110/geov.2023.10.4

Кусочки сланца были загружены в аппарат Сокслета и проэкстрагированы хлороформом.

Гидротермальный эксперимент. Использовался автоклав из нержавеющей стали объёмом 740 мл. В автоклав загружались кусочки проэкстрагированного сланца, доливалась вода. После герметизации свободный объём продувался аргоном путём неоднократных ($\times 4$) наполнений до 10 атм. и стравливаний. Заданная температура поддерживалась с помощью электронного терморегулятора и проверялась посредством поверенного образцового термометра. Через 24 часа нагрев отключался, а автоклав охлаждался потоком воздуха из вентилятора.

Анализ углеводородных газов. После охлаждения автоклава до 25 °С газовая смесь подавалась в хроматограф «Кристалл-2000М» через кран-дозатор с петлёй 0.56 мл. Для разделения углеводородных газов применялась насадочная колонка, заполненная сорбентом «Порапак-Q» размером 3 м $\times$ 3 мм. Температура термостата программировалась от 40 до 160 °С. Для количественного анализа применялся метод градуировки по составу стандартной газовой смеси, в качестве которой применялась ГСО-ПГС 1 класса, содержащая метан, этилен, этан, пропан, изобутан, *n*-бутан, изопентан, *n*-пентан. Количественный расчёт образованных газов выполнялся с учётом остаточного давления в автоклаве и объёма автоклава, не занятого жидкостью.

Выделение битумоида и керогена проводилось по стандартным методикам. Экстракция растёртой породы осуществлялась хлороформом в аппарате Сокслета. Продолжительность экстракции — 36 часов (до обесцвечивания). Выделение керогена проводилось кислотной деминерализацией последовательным действием соляной и плавиковой кислот. Контроль полноты удаления минеральной части осуществлялся по количеству золы, которое в исследованных образцах керогена не превышало 9.5 %. Содержание пиритного железа в керогене не превышало 3.1 %.

Элементный анализ керогена. Определения содержания С, Н, N, S выполнены в Институте химии Коми НЦ УрО РАН с использованием элементного анализатора Vario MICRO Cube (оператор И. М. Кузиванов).

Инфракрасная спектроскопия керогена. Запись спектров выполняли на приборе «Инфралюм ФТ-02» с использованием таблетирования керогена с KBr.

2.5 мг образца керогена смешивалось с 800 мг порошкообразного KBr. Запись спектров велась с шагом 4 см⁻¹ в интервале волновых чисел 4000—400 см⁻¹. Спектр каждого образца записывался дважды для двух отдельно приготовленных таблеток.

Результаты и их обсуждение

Особенности гидротермального эксперимента

Условия постановки гидротермального эксперимента предполагали, что при температурах 250—350 °С кусочки породы будут погружены в воду на протяжении всего времени воздействия высокой температуры. Максимальная температура гидротермального эксперимента (375 °С) была выше критической температуры для воды. Поэтому с учётом технических возможностей используемого автоклава количество добавляемой воды для этого опыта было определено для гарантированного непревышения допустимого рабочего давления, а сам эксперимент выполнен в перегретом паре плотностью 0.08 г/см³.

Качественный состав углеводородных газов

Основные углеводородные газы, образующиеся при водном пиролизе доманикового сланца, — это метан, этилен, этан, пропен/пропан, изобутан, *n*-бутан, бутен-1, бутен-2 (*цис*- и *транс*-), изопентан, *n*-пентан (рис. 1). Соэлюирование пропена и пропана на используемой для анализа газов колонке делает невозможной их отдельную оценку.

Состав углеводородных газов, образующихся при различных температурах гидротермального эксперимента, несколько отличается. Повышение температуры автоклавирования меняет отношение метана к сумме других углеводородных газов (рис. 2, а). Величина C_1/C_{2+} в наших опытах снижается от 0.53 (250 °С) до 0.36 (375 °С). Из этого наблюдения может следовать, что при относительно низких температурах автоклавирования образование метана может быть связано с преобразованием углеводородных фрагментов керогена, дающих при нагреве *только* метан, например метокси-групп.

Образование предельных и непредельных углеводородных газов удобно рассмотреть на примере пары этилен/этан. Результаты анализа свидетельствуют, что

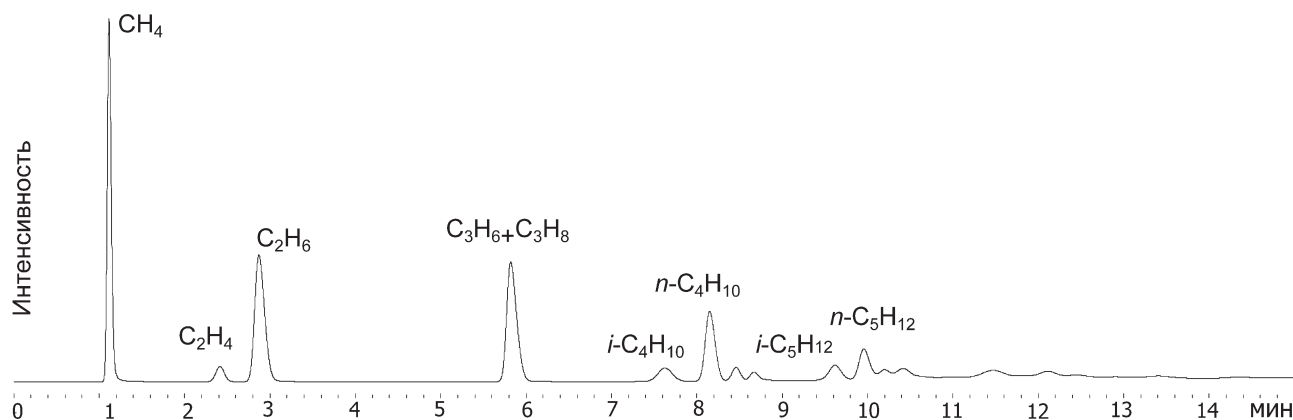


Рис. 1. Хроматограмма газовой смеси, образовавшейся в автоклаве из доманикового сланца в присутствии воды при температуре 325 °С за 24 часа

Fig. 1. Chromatogram of the gas mixture after hydrous pyrolysis of Domanik shale at a temperature of 325 °С within 24 hours

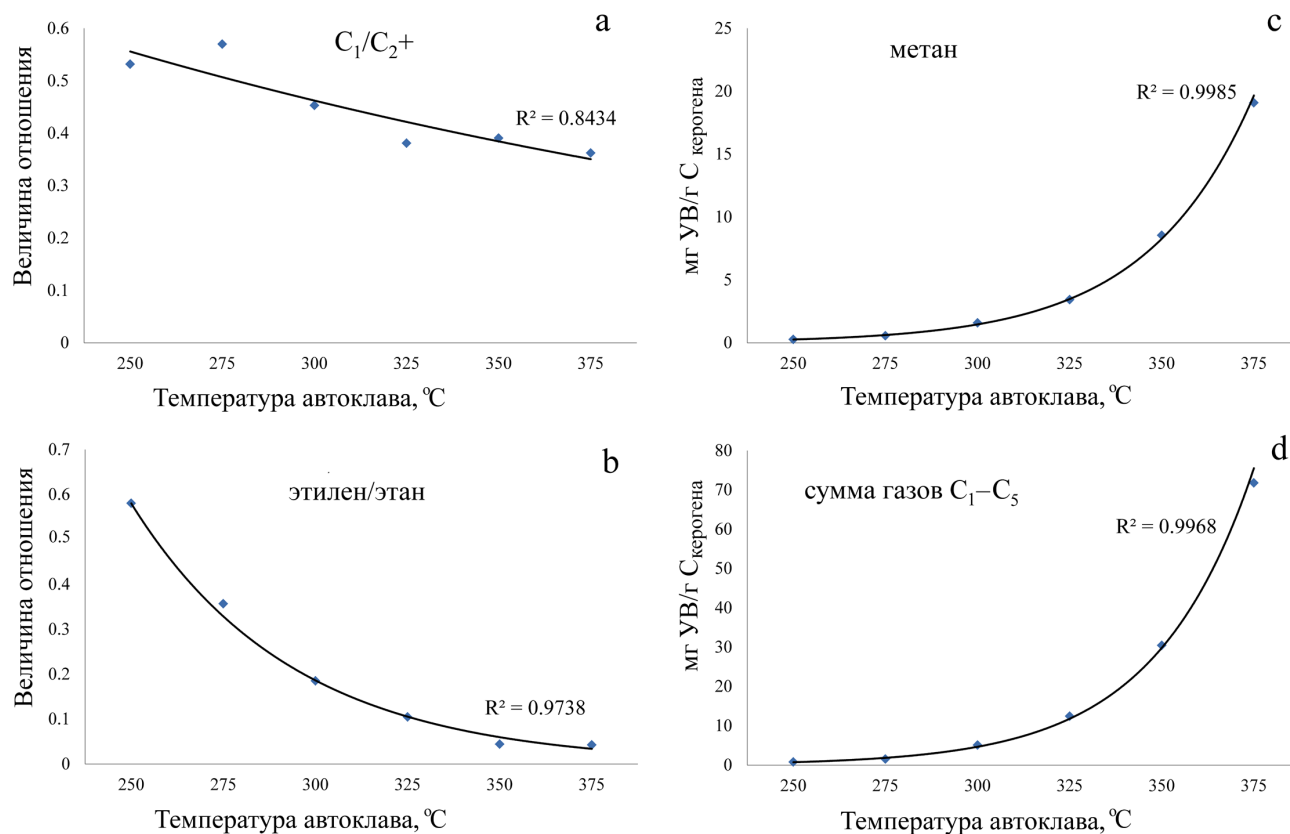


Рис. 2. Зависимость состава углеводородных газов и их количества от температуры автоклава

Fig. 2. Dependence of the composition of hydrocarbon gases and their amount on the temperature of the autoclave

рост температуры автоклава приводит к снижению величины отношения этилен/этан (рис. 2, b). Авторы (Seewald et al., 1998) объясняют такое снижение отношения этилен/этан нестабильностью непредельных углеводородов в условиях опыта, а сами эти непредельные углеводороды объявляют нестабильным промежуточным продуктом нефтеобразования. Наши данные по величине неотличимы от результатов Seewald et al. (1998), полученных в суточных экспериментах для декарбонатизированного сланца формации Монтерей.

Генерационные кривые углеводородных газов

Образование метана начинается уже при минимальной температуре гидротермального эксперимента. Выход метана при 250 °C составляет 0.25 мг/г $C_{\text{керогена}}$. Далее выход метана возрастает и достигает 18 мг/г $C_{\text{керогена}}$ при максимальной температуре опыта (рис. 2, c). Зависимость выхода метана от температуры опыта аппроксимируется экспонентой с коэффициентом корреляции $R^2 = 0.99$. Для всех изученных газов выход с ростом температуры опыта также растёт по экспоненциальному закону. Суммарное образование газообразных углеводородов изменяется от 0.77 до 72 мг УВ/г $C_{\text{керогена}}$ (рис. 2, d).

Образование углеводородных газов и изменения в структуре керогена

Образование углеводородов при катагенезе сопровождается изменениями в химическом составе и структуре керогена. Результаты элементного анализа свидетельствуют, что повышение температуры обработки породы в автоклаве приводит к снижению

содержания водорода. Так, атомное отношение Н/С монотонно снижается от 1.25 в исходном керогене до 0.76 в керогене, выделенном из сланца, подвергшегося обработке при 375 °C. Здесь можно указать, что ранее проведённые исследования керогена доманика из скважины Командиршорская-12 (Бушнев и др., 2017) показали, что среднее значение отношения Н/С по пяти образцам составляет здесь 0.74, значение T_{max} по пиролизу Rock-Eval равно 462 °C, градация катагенеза определена как МК₄. Данное сравнение позволяет грубо оценить достигнутую в эксперименте стадию термической зрелости как конец мезокатагенеза.

Результаты ИК-спектроскопии керогена отражают основные изменения в насыщенности структуры керогена определёнными функциональными группами. В ИК-спектре керогена надёжно определяются полосы поглощения (рис. 3), соответствующие валентным колебаниям связей С–Н для $-CH_3$ - и $-CH_2$ -групп в области 2950–2750 cm^{-1} , связи С–Н ароматических структур при 3100–3000 cm^{-1} , связей С=C в области 1600 cm^{-1} , связей С=О в области 1700 cm^{-1} , деформационных колебаний $-CH_3$ и $-CH_2$ в областях 1360 и 1470 cm^{-1} , С–Н-связей ароматических углеводородов в области 750–870 cm^{-1} (Бушнев и др., 2019). За величину, пропорциональную концентрации отдельных функциональных групп, принимался интеграл оптической плотности — ID соответствующей полосы поглощения. Гидротермальный эксперимент ведёт к закономерному расходованию алифатических фрагментов керогена, быстрому уходу карбонильных групп на ранних этапах созревания, а также накоплению ароматического углерода, замещённого водородом.

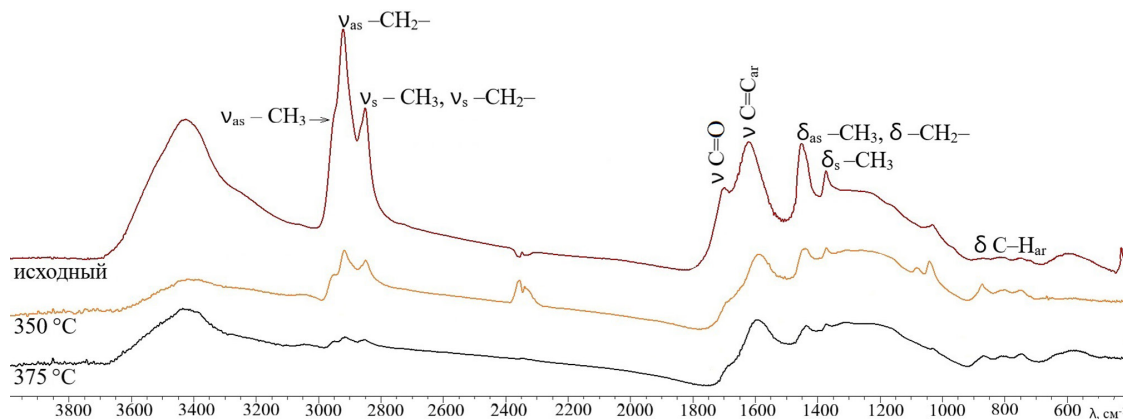


Рис. 3. Инфракрасные спектры керогена исходного сланца и керогена, выделенного из сланца после его гидротермальной обработки

Fig. 3. Infrared spectra of kerogen from the initial shale and kerogen isolated from the shale after hydrothermal treatment

дом, что соответствует результатам ранее выполненных нами исследований доманикового керогена (Бушнев и др., 2019), а также большой совокупности результатов по керогену в целом (Rouxhet et al., 1980). Результаты ИК-спектроскопии свидетельствуют, что гидротермальная обработка доманикового сланца при 375 °C приводит к расходованию от 72 до 86 % алифатических фрагментов ($100 \% \times (ID_{исх} - ID_{375}) / ID_{исх}$). Разброс соответствует проведению расчёта по сумме $ID_{1470} + ID_{1360}$ либо по сумме $ID_{2950-2750}$. При водном пиролизе образуются не только газообразные, но и жидкие углеводороды, входящие в состав битумоида, поэтому прямая корреляция между расходом алифатических звеньев керогена и выходом УВ газов не совсем корректна. Вместе с тем параллелизм образования углеводородных газов и расходования алкильных фрагментов керогена очевиден.

Заключение

Впервые получены количественные данные о выходе углеводородных газов в условиях гидротермального воздействия на доманиковый сланец. Эксперименты при 250, 275, 300, 325, 350 и 375 °C продемонстрировали экспоненциальное нарастание количества образующихся газов состава C_1-C_5 . Повышение температуры приводит к относительному уменьшению выхода метана по сравнению с суммой всех газов, а также снижению выхода непредельных УВ при повышении температуры опыта. Суммарный выход УВ газов при 375 °C — 62 мг УВ/г $C_{орг}$, а метана образуется 18 мг/г $C_{орг}$. Результаты исследования остаточного керогена показали, что нагрев породы в автоклаве в присутствии воды привёл к существенному снижению содержания в керогене водорода. При этом израсходовано до 80 % изначально присутствовавших в керогене алифатических фрагментов. Выход образованных при максимальной температуре опыта газообразных углеводородов может моделировать суммарное газообразование доманиковым керогеном за стадию нефтяного окна. Порода, подвергшаяся нагреву при максимальной температуре опыта, содержит кероген, ещё имеющий значительный УВ-потенциал, который может быть реализован в условиях, близких к условиям апокатагенеза.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект № 23-27-00139 «Изучение образования газообразных углеводородов керогеном доманика при моделировании его термического преобразования в гидротермальном эксперименте и сухом пиролизе»).

Литература / Reference

- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Моделирование процесса нефтеобразования углеродистым сланцем доманика // Нефтехимия. 2013. Т. 53. № 3. С. 163—170. <https://doi.org/10.7868/S0028242113030027>
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S. Modeling of oil generation by Domanik carbonaceous shale. *Pet. Chem.*, 2013, V. 53, No. 3, pp. 145—151. <https://doi.org/10.1134/S096554411303002X>
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Смолева И. В. Фракционирование изотопов углерода при искусственном созревании органического вещества горючих сланцев в автоклаве в присутствии воды // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2012. № 5. С. 15—18.
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Smoleva I. V. Fractionation of carbon isotopes during artificial maturation of oil shale organic matter in an autoclave in the presence of water. *Vestnik*, 2012, No. 5, pp. 15—18. (in Russian)
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Мокеев М. В. Результаты ^{13}C ЯМР- и ИК-спектроскопии керогена верхнедевонских домаников Тимано-Печорского бассейна // Геохимия. 2019. Т. 64. № 11. С. 1146—1157. <https://doi.org/10.31857/S0016-752564111146-1157>
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Mokeev M. V. Results of ^{13}C NMR and FTIR Spectroscopy of Kerogen from the Upper Devonian Domanik of the Timan-Pechora Basin. *Geochemistry Int.*, 2019, V. 57, No. 11, pp. 1173—1184. <https://doi.org/10.1134/S0016702919110028>
- Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С., Шадрин А. Н., Деревесникова А. А. Доманиковые отложения Денисовского прогиба по результатам исследования керны скважины Командиршор-12 // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2017. № 7 (271). С. 12—20. DOI: 10.19110/2221-1381-2017-7-12-20
- Bushnev D. A., Burdel'naya N. S., Shadrin A. N., Deresnikova A. A. Domanik deposits of the Denisov trough based on the results of the study of the core of the well



- Komandirshor-12. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2017, No. 7 (271), pp. 12–20. (in Russian)
- Калмыков А. Г., Гафурова Д. Р., Тихонова М. С., Видищева О. Н., Иванова Д. А., Манько И. Э., Корост Д. В., Кудаев А. А., Бычков А. Ю., Калмыков Г. А. Влияние состава пород высокоуглеродистых формаций на процесс генерации нефти и газа (результаты лабораторного моделирования) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 1. С. 85–98.
- Kalmykov A. G., Gafurova D. R., Tikhonova M. S., Vidishcheva O. N., Ivanova D. A., Man'ko I. E., Korost D. V., Bychkov A. Yu., Kalmykov G. A. The Influence of the Composition of Rocks from High-Carbon Formations on the Process of Oil and Gas Generation: The Results of Laboratory Modeling. Moscow University Geology Bulletin, 2021, V. 76, No. 2, pp. 191–203. DOI: 10.3103/s0145875221020046. (in Russian)
- Каюкова Г. П., Михайлова А. Н., Насырова З. Р., Вахин А. В. Гидротермальные преобразования органического вещества пород доманиковых отложений Татарстана в сланцевую нефть. М.: ГЕОС, 2022. 328 с.
- Kayukova G. P., Mikhailova A. N., Nasyrova Z. R., Vakhin A. V. Hydrothermal transformations of organic matter of Domanik deposits of Tatarstan into shale oil. Moscow: GEOS, 2022, 328 p. (in Russian)
- Andresen B., Throndsen T., Råheim A., Bolstad J. A comparison of pyrolysis products with models for natural gas generation // Chemical Geology. 1995. Vol. 126. P. 261–280.
- Burdelnaya N., Bushnev D., Mokeev M., Dobrodumov A. Experimental study of kerogen maturation by solid state ^{13}C NMR spectroscopy // Fuel. 2014. V. 118. P. 308–314. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.11.003>
- Kotarba M. J., Lewan M. D. Sources of natural gases in Middle Cambrian reservoirs in Polish and Lithuanian Baltic Basin as determined by stable isotopes and hydrous pyrolysis of Lower Palaeozoic source rocks // Chemical Geology. 2013. Vol. 345. P. 62–76.
- Lewan M. D. Evaluation of petroleum generation by hydrous pyrolysis experimentation // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1985. Vol. 315. No. 1531. P. 123–134.
- Li S., Guo X., Zheng L. Carbon-hydrogen isotopic systematics of gases generated in semi-closed hydrous pyrolysis of type I source rock with the presence of formation water: Implications for gas isotope partitioning under supercritical conditions // Marine and Petroleum Geology. 2022. Vol. 142. 105735.
- Ma Z., Tan J., Zheng L., Shen B., Wang Z., Shahzad A., Jan I. U., Schulz H.-M. Evaluating gas generation and preservation of the Wufeng-Longmaxi Formation shale in southeastern Sichuan Basin, China: Implications from semiclosed hydrous pyrolysis // Marine and Petroleum Geology. 2021. Vol. 129. 105102.
- Rouxhet P. G., Robin P. L. and Nicaise G. Characterization of kerogens and of their evolution by infrared spectroscopy. In Kerogen (Ed. B. Durand), Technip. Paris, 1980. P. 163–189.
- Seewald J. S., Benitez-Nelson B. C., Whelan J. K. Laboratory and theoretical constraints on the generation and composition of natural gas // Geochim. Cosmochim. Acta. 1998. Vol. 62. No. 9. P. 1599–1617.
- Uguna C. N., Azri M. H., Snape C. E., Meredith W., Carr A. D. A hydrous pyrolysis study to ascertain how gas yields and the extent of maturation for a partially matured source rock and bitumen in isolation compared to their whole source rock // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2013. Vol. 103 P. 268–277.

Поступила в редакцию / Received 21.09.2023



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 551.89:551.436(470.111)

DOI:10.19110/geov.2023.10.5

Геолого-геоморфологическое районирование бассейна р. Сейды (восток Большеземельской тундры) на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM

В. А. Исаков

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ Уро РАН, Сыктывкар
Isakovvlad94@gmail.com

Приведены результаты применения глобальной цифровой модели рельефа ArcticDEM при геолого-геоморфологических исследованиях бассейна р. Сейды (восток Большеземельской тундры) в её среднем и нижнем течениях. Использование цифровой модели рельефа высокой точности позволяет провести комплексный совместный анализ цифровых, геоморфологических и геологических данных при решении проблем генетической интерпретации и вопросов рельефообразования отложений квартера.

На основе гипсометрической характеристики, углов наклона рельефа, экспозиции склонов и текстурно-структурных характеристик четвертичных осадков были выделены: аккумулятивный ледниковый, эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый и эрозионно-аккумулятивный аллювиальный типы рельефа.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, ArcticDEM, геоморфологическое районирование, морфометрический анализ.

Geological and geomorphological zoning of the Seyda river basin (east of the Bolshezemelskaya tundra) based on the ArcticDEM digital elevation model

V. A. Isakov

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar

The Bolshezemelskaya tundra is one of the least studied and poorly mapped territories of the European North-East of Russia. The availability of the ArcticDEM digital elevation model with a high spatial resolution allowed conducting a comprehensive joint analysis of digital, geomorphological and geological data.

The results of using the ArcticDEM global digital relief model for geological and geomorphological studies of the Seyda River basin (eastern Bolshezemelskaya tundra) in its middle and lower reaches are presented.

An irregular triangulation network TIN covering the Seyda River valley was constructed, and the main geomorphometric parameters of the relief were calculated: hypsometric characteristics, surface inclination angles and slope exposures. Based on the obtained morphometric indicators of the relief and the textural and structural characteristics of Quaternary sediments, the following types of relief were identified: accumulative glacial, erosion-accumulative water-glacial and erosion-accumulative alluvial types of relief. A geological and geomorphological diagram of the Seyda River valley was been constructed and the main morphogenetic features of the relief during its formation were identified.

Keywords: digital elevation model, ArcticDEM, geomorphological zoning, morphometric analysis.

Введение

Большеземельская тундра является одной из наименее изученных и плохо откартированных территорий Европейского Северо-Востока России. Она неоднократно подвергалась воздействию неоплейстоценовых ледниковых покровов Урал-Пай-Хой-Новоземельского и Фенноскандинавского центров оледенений (Андреичева, 1992; 2002), что вызывает повышенный интерес среди исследователей гляциального морфолитогенеза.

Процессы формирования рельефа в северных районах Европейской России имеют значительные отличия от других регионов, которые проявляются в специфике взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов в позднем неоплейстоцене и голоцене на фоне многократных оледенений исследуемой территории.

К настоящему времени накоплен большой объём геологических и геолого-геоморфологических данных строения Большеземельской тундры, а интенсивное

Для цитирования: Исаков В. А. Геолого-геоморфологическое районирование бассейна р. Сейды (восток Большеземельской тундры) на основе цифровой модели рельефа ArcticDEM // Вестник геонаук. 2023. 10 (346). С. 42–50. DOI: 10.19110/geov.2023.10.5

For citation: Isakov V. A. Geological and geomorphological zoning of the Seyda river basin (east of the Bolshezemelskaya tundra) based on the ArcticDEM digital elevation model. Vestnik of Geosciences, 2023, 10 (346), pp. 42–50, doi: 10.19110/geov.2023.10.5



развитие в последние годы геоинформационных систем (ГИС) позволяют провести комплексный совместный анализ полученных данных при решении проблем генетической интерпретации отложений квартера и вопросов рельефообразования в условиях полярной зоны.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) среднего (размер пикселя от 15 до 30 м) и низкого (свыше 30 м) пространственного разрешения широко распространены при геолого-геоморфологических исследованиях и позволяют быстро создавать серии тематических карт на основе гипсометрической характеристики, крутизны и экспозиции склонов территории. Модели рельефа среднего масштаба уровня DTED-1 и -2 (GTOPO30, GMTED2010, ACE2 и ASTER GDEM v2, 3) пригодны лишь для региональных исследований в масштабе 1 : 200 000, а низкое пространственное разрешение исходных данных не позволяет проводить геоморфометрический анализ рельефа бассейнов рек арктических регионов России. Появление в свободном доступе цифровой модели рельефа ArcticDEM с высоким пространственным разрешением уровня HRTI-4 (High Resolution Terrain Information) позволяет провести анализ морфологических комплексов аллювия и пойменного рельефа в масштабе 1 : 25 000.

Целью работы является проведение геолого-геоморфологического районирования долины р. Сейды по данным цифровой модели рельефа высокого разрешения ArcticDEM.

Материал и методы исследования

Материалом для статьи послужили результаты комплексных геолого-геоморфологических исследований отложений неоплейстоцена и голоцена долины среднего и нижнего течения р. Сейды (Исаков, Воробьёв, 2021; Марченко-Вагапова, 2021; Воробьёв, 2022; Исаков, 2022). Река протекает по восточной окраине Большеземельской тундры (рис. 1) и является правым притоком р. Усы.

В задачи полевых исследований входили выбор ключевых участков, репрезентативных для характерных форм и типов рельефа, и проведение в их пределах детальных геолого-геоморфологических исследований. Особое внимание уделялось фациально-генетическому расчленению отложений на основе седиментологических признаков: условий залегания, типов слоистости пород, характера контактов между слоями разных генетических типов отложений (Ботвинкина, 1965).

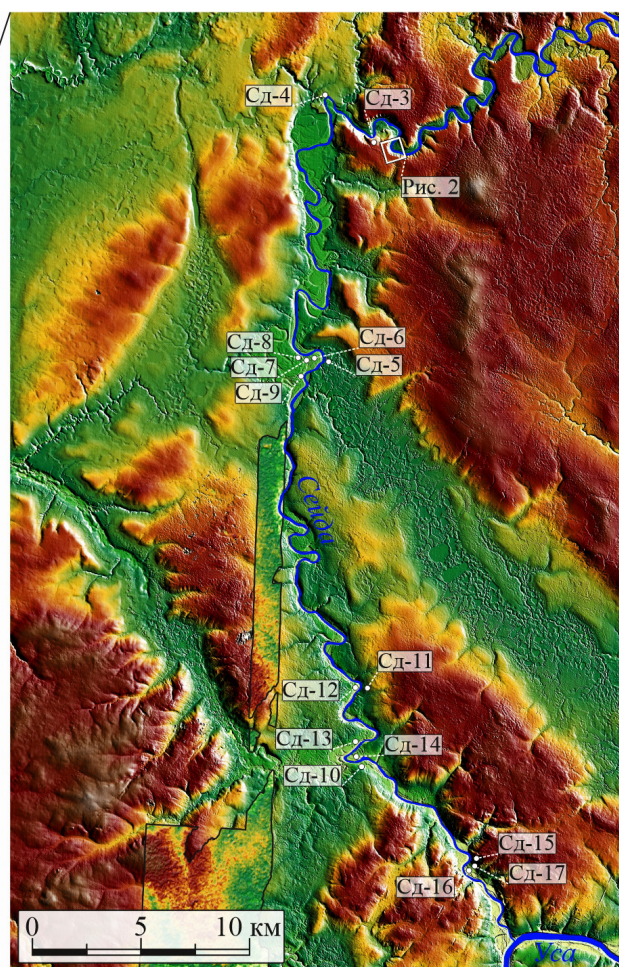
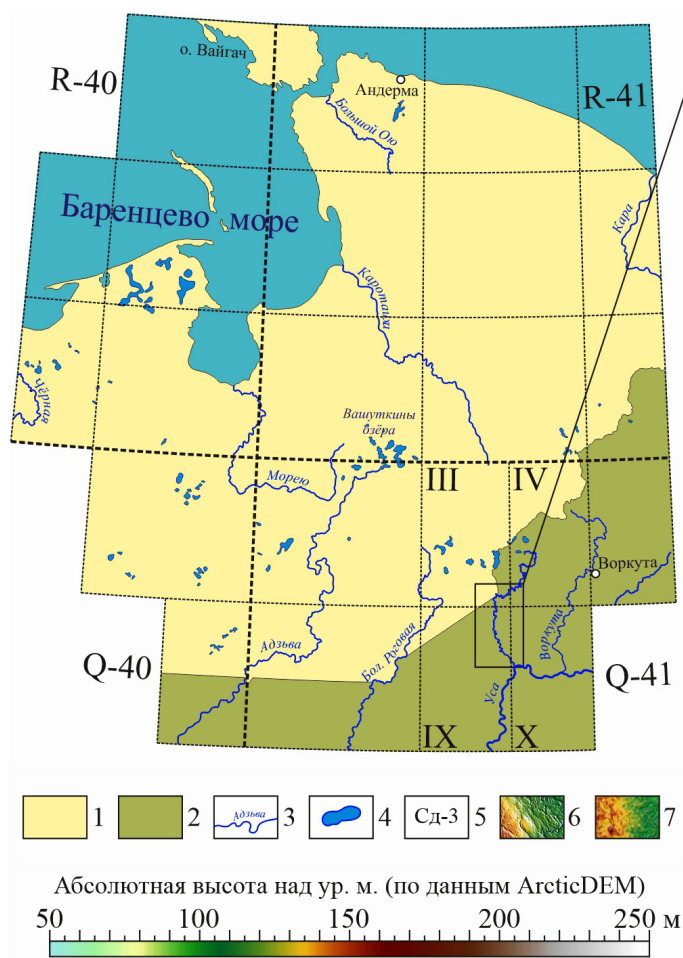


Рис. 1. Схема расположения и гипсометрическая характеристика долины р. Сейды (восток Большеземельской тундры) по данным цифровой модели рельефа ArcticDEM: 1 — Ненецкий автономный округ; 2 — Республика Коми; 3 — реки; 4 — озёра; 5 — разрезы береговых обнажений; 6 — ЦМР по данным ArcticDEM; 7 — ЦМР по данным Aster GDEM v2

Fig. 1. Layout and hypsometric characteristics of the Seyda River valley (eastern Bolshezemelskaya tundra) according to the digital elevation model ArcticDEM: 1 — Nenets Autonomous Okrug; 2 — Komi Republic; 3 — rivers; 4 — lakes; 5 — sections of coastal outcrops; 6 — digital elevation model based on data ArcticDEM; 7 — digital elevation model based on data Aster GDEM v2

Район исследования характеризуется широким развитием пологоволнистых ледниковых равнин, обширных пространств водно-ледниковых накоплений, сменяемых глубоковрезанными долинами р. Сейды и её притоков, что обуславливает использование цифровой модели рельефа уровня HRTI-4 (High Resolution Terrain Information). Данный уровень пространственного разрешения позволяет с высокой точностью выделять региональные и локальные структуры на водоразделах и в областях эрозионных врезов русел и водотоков.

Методика построения и обработки ЦМР для средне- и крупномасштабного геоморфологического районирования больших площадей рассмотрена в ряде работ (Хромых, 2007; Минеев и др., 2015; Полякова, 2021). Цифровая модель ArcticDEM была создана Полярным геопространственным центром университета Миннесоты и доступна в пространственных разрешениях от 2 до 1000 м. Она сформирована из разновременных панхроматических снимков, полученных со спутников WorldView-1-3 и GeoEye-1 в период с 2007 по 2021 годы. Привязка данной ЦМР была произведе-

на по альтиметрическим измерениям со спутников Cryosat-2 и ICESat, которые позволили достичь погрешности абсолютных отметок менее 1 м на большей части исследуемой территории.

Необходимый растр высокоточной модели рельефа ArcticDEM долины р. Сейды был получен через специальное веб-приложение от Esri NGA ArcticDEM Web Map. Заполнение недостающих данных цифровой модели рельефа производилось на основе ЦМР Aster GDEM v2 и составляет 4.1 % от всей площади территории исследования.

В настоящей работе для анализа данных высокоточной ЦМР ArcticDEM применялась пробная версия программы ArcGIS Pro. Данный программный комплекс позволяет получать данные о рельефе в формате GRID и TIN (Triangulated Irregular Network) модели и отвечает требованиям при проведении геолого-геоморфологического районирования.

Для решения задач геоморфометрии была создана нерегулярная триангуляционная сеть TIN площадью 1170 км² (27.4 × 42.7 км), покрывающая среднее и нижнее течение долины р. Сейды и состоящая из

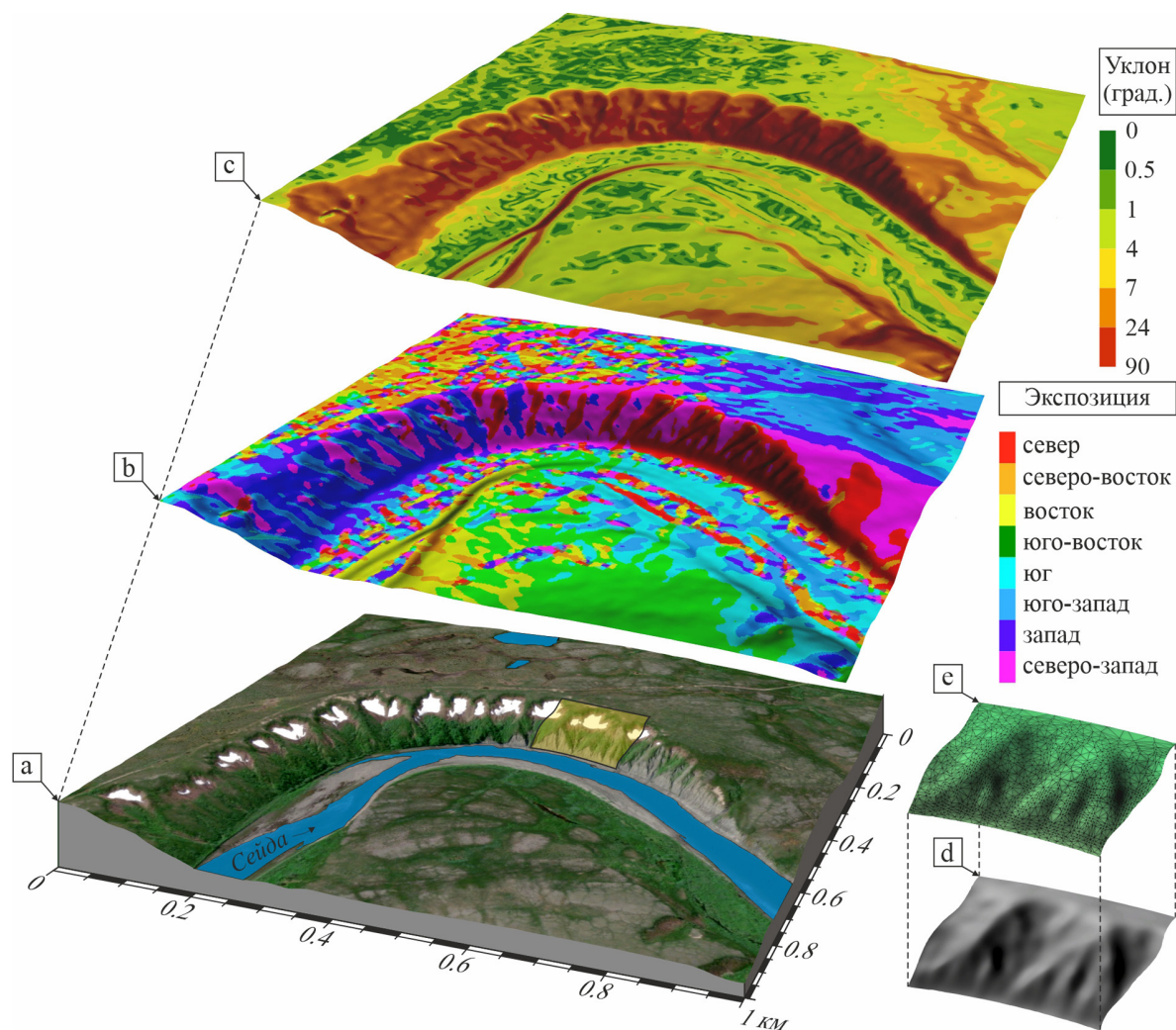


Рис. 2. Фрагмент цифровой модели рельефа долины р. Сейды по данным ArcticDEM: а — цифровая модель местности, драпированная спутниковыми снимками высокого разрешения; б — экспозиция склонов; с — уклон поверхности (по Леонтьев, Рычагов, 1979); д — GRID-модель; е — TIN-модель

Fig. 2. Fragment of the digital relief model of the Seyda River valley according to ArcticDEM data: а — digital terrain model draped with high-resolution satellite images; б — slope exposure; с — surface slope (according to Leontyev, Rychagov, 1979); д — GRID model; е — TIN model



32.3 млн треугольников. На основе полученной модели были вычислены основные морфометрические показатели рельефа: высота, углы наклона поверхности и экспозиции склонов (рис. 2).

Уклон поверхности и экспозиция склона характеризуют интенсивность и направление эрозионных процессов. Выделение категорий рельефа проведено на основе уклонов поверхностей согласно общепринятой классификации (Леонтьев, Рычагов, 1979).

Оценка точности высотных отметок полученной модели рельефа была проведена методом сопоставления с известными наземными контрольно-измерительными точками, взятыми с топоосновы масштаба 1 : 200 000 и открытыми векторными данными ГИС. Панорама масштаба 1 : 50 000.

Результаты исследований

В орографическом отношении бассейн р. Сейды принадлежит к северной оконечности Косью-Роговской впадины, что обуславливает особенности рельефа и характер распределения четвертичных отложений. Исследуемый регион относится к аккумулятивно-ледниковой и озёрно-ледниковой провинциям, возникшим в результате развития и деградации покровных ледников среднего и верхнего неоплейстоцена (Андреичева, 2002). Анализ мощностей четвертичных отложений и условий их залегания показывает, что современный рельеф территории в целом соответствует поверхности подстилающих коренных верхнемеловых и пермских пород (Калецкая, Грибанов, 1955), усложняясь глубокооврезанными речными долинами и современными криогенными процессами.

Существенная часть водоразделов исследуемой территории включает ледниковые, водно-ледниковые и озёрно-ледниковые отложения среднего неоплейстоцена (Андреичева, Дурягина, 1999; Astakhov, 2004), а понижения в рельефе выполнены аллювиальными и озёрно-болотными осадками верхнего неоплейсто-

цена и голоцена (Калецкая, Грибанов, 1955; Исаков, 2022).

Значительную часть рассматриваемой территории занимает обширная террасированная долина р. Сейды, вытянутая в южном и юго-восточном направлении. Долина реки характеризуется ступенчатым рельефом на всём её протяжении, чем обусловлено большое количество перекатов (рис. 3).

Поперечные профили долины имеют корытообразную (троговую), трапециевидную и U-образную формы, а ширина речной долины варьирует от 0.25 до 2.3 км. Глубина эрозионного вреза составляет от 15 до 65 м и достигает 75 м в местах выхода коренных верхнемеловых кварц-глауконитовых песчаников.

По ведущим генетическим и морфологическим признакам в пределах исследуемой территории был выделен аккумулятивный ледниковый, эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый и эрозионно-аккумулятивный аллювиальный типы рельефа (рис. 4).

Аккумулятивный ледниковый рельеф наиболее распространён на водоразделах и представлен холмисто-увалистым, холмисто-волнистым и пологоволнистым морфологическими типами.

Холмисто-увалистый и холмисто-волнистый ледниковый рельеф занимает самое высокое гипсометрическое положение — от 158–160 до 199 м — и распространён преимущественно в северо-западной и юго-восточной частях исследуемого района. Характерной особенностью на территории его развития является наличие отчётливо выраженных холмов и увалов, вытянутых в северном и северо-западном направлении. Вершины холмов представлены плоскими и волнистыми поверхностями с уклонами 0.2–2.1°, тогда как склоны имеют углы от 1.7 до 7.4°, постепенно выполаживаясь у основания. Пологоволнистый ледниковый рельеф распространён на абсолютных отметках от 126 до 158–160 м и представлен обширной слабоволнистой поверхностью с уклонами 0.1–1.9°. Пониженные участки часто заболоче-

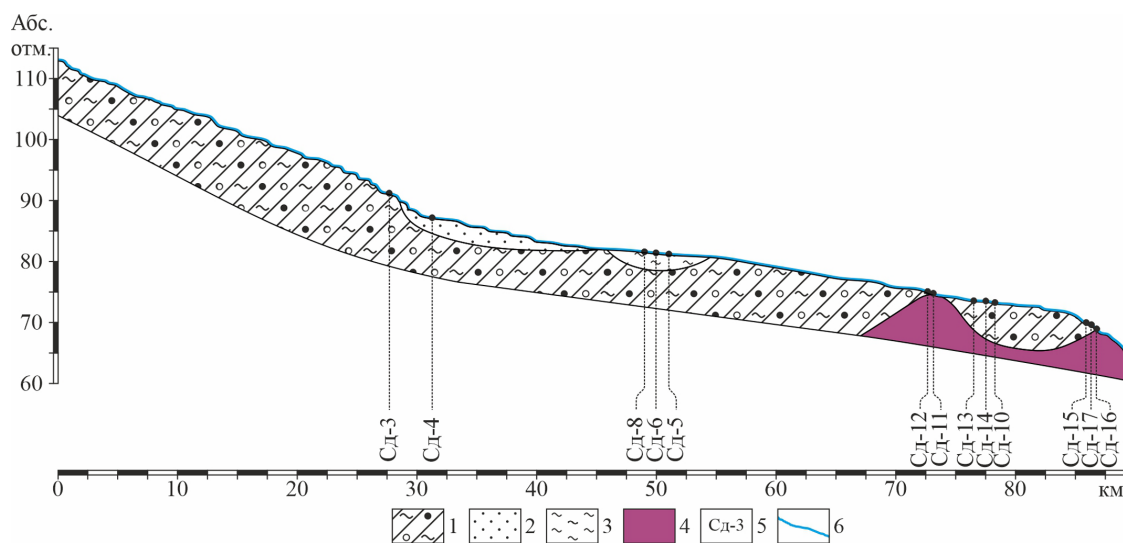


Рис. 3. Продольный профиль русла р. Сейды (среднее и нижнее течения) и литологический состав размываемых горных пород: 1 — валунный суглинок; 2 — песок; 3 — глины; 4 — верхнемеловой кварц-глауконитовый песчаник; 5 — номера разрезов, в которых проводились исследования русла реки; 6 — уровень воды в реке по данным ArcticDEM

Fig. 3. Longitudinal profile of the Seyda River bed (middle and lower reaches of the river) and lithological composition of eroded rocks: 1 — boulder loam; 2 — sand; 3 — clays; 4 — Upper Cretaceous quartz-glaucanite sandstone; 5 — numbers of sections in which the river bed was studied; 6 — water level in the river according to ArcticDEM

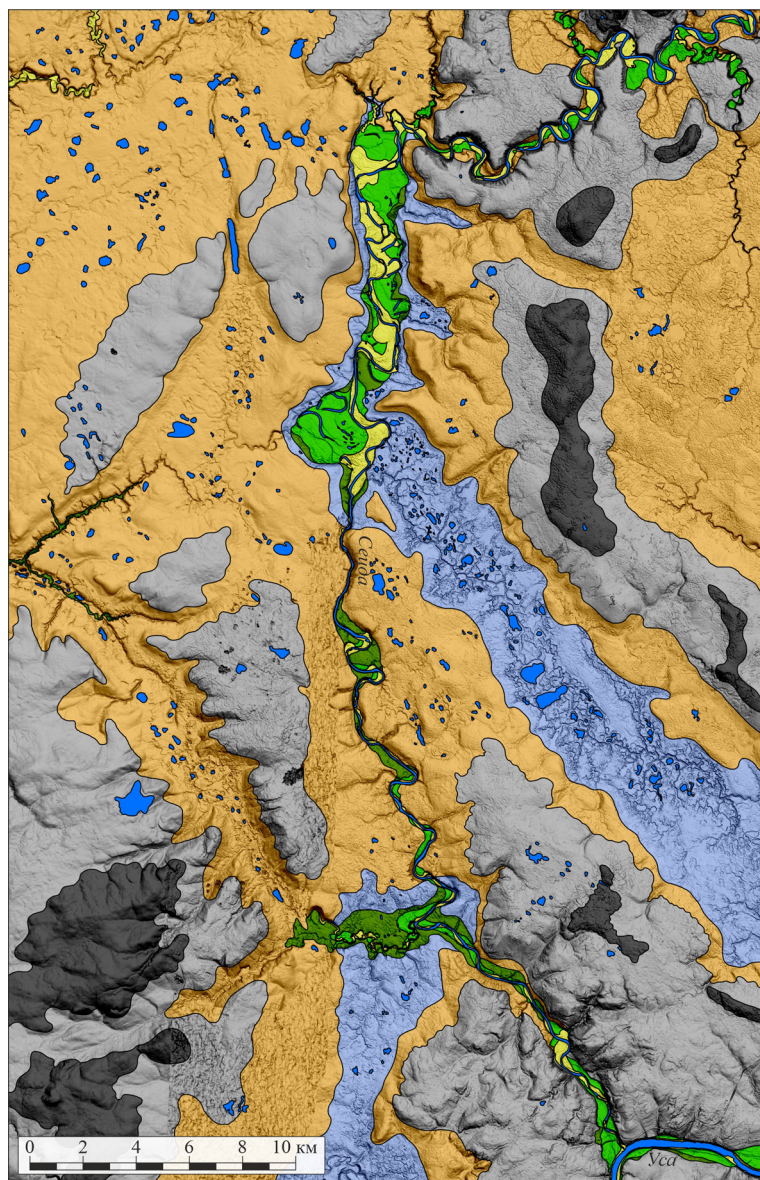


Рис. 4. Геоморфологическая карта долины р. Сейды по данным цифровой модели рельефа ArcticDEM

Ледниково-аккумулятивный рельеф: 1 — холмисто-увалистый и холмисто-волнистый; 2 — пологоволнистый. Эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый рельеф: 3 — долинные зандры; 4 — приледниковые бассейны (третья надпойменная терраса). Эрозионно-аккумулятивный аллювиальный рельеф: 5 — вторая надпойменная терраса; 6 — первая надпойменная терраса; 7 — пойма

Fig. 4. Geomorphological map of the Seyda River valley according to the digital elevation model ArcticDEM

Glacial-accumulative relief: 1 — hilly-ridged and hilly-undulating; 2 — gently wavy. Erosion-accumulative water-glacial relief: 3 — valley outwash; 4 — periglacial basins (third terrace above the floodplain). Erosion-accumulative alluvial relief: 5 — second terrace above the floodplain; 6 — first terrace above the floodplain; 7 — floodplain

ны и имеют торфяно-бугристый рельеф, что отчётливо дешифрируется на цифровой модели рельефа. Поверхность равнины интенсивно расчленена густой сетью ручьёв и временных потоков с глубиной вреза от 1 до 35 м.

В строении выделенного типа рельефа отмечены ледниковые и межледниковые отложения среднего неоплейстоцена (Андреичева, Дурягина, 1999). Ледниковые осадки печорского (днепровского) возраста были вскрыты в обн. Сд-3, где представлены сизым плотным валунным суглинком, распадающимся на оскольчатую отдельность. Выше по разрезу залегают межледниковые образования родионовского (шкловского) возраста (Astakhov, 2004), сложенные озёрно-болотными буровато-сизыми горизонтально-слоистыми ленточными глинами, перекрытыми чёрными гумусовыми глинами и коричневато-бурым, хорошо разложившимся торфом. Ледниковые осадки вычегодского (московского) горизонта являются рельефообразующими, сложены коричневатого-серым валунным суглинком и вскрываются в береговых обнажениях на всём протяжении долины р. Сейды. Последледниковые флювиогляциальные отложения приурочены к водоразделам и представлены преимущественно серо-черной песчано-гра-

вийной смесью с прослоями светло-серого среднезернистого песка с затёками ожелезнения.

Эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый рельеф распространён преимущественно в среднем и нижнем течении реки и представлен равнинно-холмистой поверхностью долинных зандров, плавно переходящих в плоский равнинный рельеф третьей надпойменной террасы. Согласно цифровой модели местности, тыловой шов выражен неотчётливо, что вносит определённые трудности в дешифрирование выделенного типа рельефа.

Отложения долинных зандров были вскрыты в обн. Сд-4 и имеют выдержанное гипсометрическое положение от 101—104 до 126 м на всей территории исследований. В основании разреза залегают светло-серые мелкозернистые горизонтально-слоистые и косоволнистые пески и коричнево-серые супеси, плавно переходящие вверх по разрезу в светло-серые среднезернистые косослоистые пески мощностью 19.3 м. Выше вскрывается пачка песчано-гравийной смеси от тёмно-серых до чёрных разностей с мультислойной и крупной косой слоистостью мощностью 3.4 м. Венчает разрез пачка светло-бежевых до светло-рыжих неслоистых супесей и суглинков мощностью 0.5 м.



Третья надпойменная терраса характеризуется выдержанными абсолютными отметками на всей площади долины реки (от 93 до 101–104 м), что может говорить об осадконакоплении в условиях обширного затопляемого бассейна. Поверхность террасы сильно заболочена и изрезана многочисленными мелкими ложбинами стока, образовавшимися при спуске озёрных водоёмов с вышерасположенной задровой равнины. На цифровой модели рельефа отчётливо выделяются многочисленные эрозионные врезы сквозных реликтовых ложбин и долин стока талых ледниковых вод, приуроченные к третьей надпойменной террасе. Долины имеют корытообразный поперечный профиль, а их ширина варьирует от 0.5–3.5 км вблизи устья р. Сэха до 2.1–4.8 км в бассейне р. Лёк-Воркута. Глубина эрозионного вреза в поверхность флювиогляциальных задровых отложений составляет от 18 до 21 м, а уклон склонов ложбины варьирует от 4 до 6° градусов.

Широкое развитие торфяников нивелирует рельеф реликтовых долин, образуя плоскую равнинную поверхность с углами наклона от 0.1 до 0.5° в сторону бассейна р. Усы. Многочисленные озёра, располагающиеся на пониженных заболоченных участках днища долины, представляют собой мелкие блюдцеобразные понижения диаметром от 40 м до 1.2 км. Для них характерны пологие берега с неправильными очертаниями береговых линий, переходящие в осоковые топи. Существенное влияние на формирование выделенного типа рельефа оказывают современные мерзлотные процессы. Они проявляются в образовании бугристых торфяников и термокарстовых западин, выделенных по дешифрированию цифровой модели рельефа.

Осадки долины стока талых ледниковых вод были вскрыты в обн. Сд-5, где в основании разреза залегают сизые ленточные глины с тонкой горизонтальной и мелкой волнистой слоистостью. Видимая мощность достигает 9 м и прослеживается под урезом воды. Выше по разрезу вскрывается пачка переслаивания серых и тёмно-серых мелкозернистых песков с прослоями торфа мощностью 4 м. Венчает разрез хорошо разложившийся торф с растительными остатками от тёмно-бурого до черного оттенка мощностью 2.5 м.

Эрозионно-аккумулятивный аллювиальный рельеф распространён широкой полосой вдоль всей долины р. Сейды и представлен двумя надпойменными террасами, а также высокой и низкой поймами. На цифровой модели рельефа отмечается заметное уменьшение поверхностей эрозионно-аккумулятивных террас, что объясняется ступенчатым рельефом долины реки и перепадом абсолютных отметок уреза воды от 94 м в верхнем до 65 м в нижнем течении. Характерной особенностью пойменно-руслового комплекса является сужение речных долин в областях развития аккумулятивно-ледникового рельефа и расширение в областях развития водно-ледникового рельефа. В местах выхода коренных меловых кварц-глауконитовых песчаников и неоплейстоценовых ледниковых валунных суглинков русло сопровождается полосой бечевника, сложенного гравийно-галечным материалом с валунами и глыбами (до 1.5 м) местных пород.

Вторая надпойменная терраса имеет фрагментарное распространение и выделена преимущественно в среднем и нижнем течении реки.

Наиболее представительный разрез осадков второй надпойменной террасы вскрывается в обн. Сд-17 и имеет трёхчленное строение. В основании разреза залегает пачка горизонтального переслаивания сизого среднезернистого песка, сизого суглинка и рыжего ожелезнённого песка мощностью 1.1 м. Выше лежит коричнево-рыжая песчано-гравийно-галечная смесь в глинистом заполнителе с прослоями сизых пластичных глин мощностью 3.5 м. Венчает разрез пачка рыжих суглинков и супесей с единичными примазками торфа мощностью 5.3 м. Мощность аллювиальных отложений второй надпойменной террасы варьирует от 10–11 м в обн. Сд-17 до 13 м, по данным предшественников (Калецкая, Грибанов, 1955).

Первая надпойменная терраса имеет более широкое распространение и представляет собой плоскую слабонаклонную волнистую поверхность с хорошо выраженными на цифровой модели рельефа бровкой и тыловым швом. Поверхность террасы осложнена старичными озёрами и дуговидными прирусловыми валами высотой до 1.5 м.

Отложения первой надпойменной террасы были вскрыты в обнажениях Сд-8, Сд-12 и Сд-13, где основание разреза слагает рыже-чёрная песчано-гравийная смесь мощностью 1 м. Выше по разрезу вскрывается пологоволнистая и горизонтально-слоистая пачка переслаивания коричневатого-сизого суглинка и коричневатого-серой супеси мощностью 3.9 м. Венчает разрез пачка косослоистых рыжих средне- и крупнозернистых песков мощностью 0.65 м. Мощность аллювиальных отложений надпойменной террасы варьирует от 4.4 до 6.5 м.

Высокая и низкая поймы развиты повсеместно и отчётливо выражены на цифровой модели рельефа и спутниковых снимках высокого разрешения. Особенностью этого типа рельефа является ярко выраженный тыловой шов, гривистость поверхности и наличие прирусловых валов высотой до 1.1 м.

Наиболее полный литологический состав пойменных отложений вскрыт в обн. Сд-14, где в основании разреза залегает пристрежневая фация, представленная песчано-гравийной смесью тёмно-серого цвета, мощностью 0.6 м. Выше по разрезу вскрываются русловые пески с включением гравия и единичных галек мощностью 2.8 м. Осадки русловой фации перекрываются пойменными серо-коричневыми суглинками и супесями с примазками торфа. Мощность пойменных отложений составляет от 3 до 4.1 м.

Обсуждение результатов

Анализ полученных геолого-геоморфологических данных показывает, что наиболее крупными элементами на исследованной территории являются холмисто-волнистый, холмисто-увалистый и пологоволнистый ледниково-аккумулятивный рельефы, сформированные покровными материковыми ледниками среднего неоплейстоцена.

Подчинённое значение имеет эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый рельеф долинных задров, нивелирующий геоморфологические элементы, созданные на предшествующих этапах развития изученной территории. Характер слоистости и однородность литологического состава говорят о высокой ди-

намике потока, существовавшей во время интенсивного таяния, выноса и аккумуляции осадочного материала. Дальнейшая деградация ледникового щита привела к формированию в прифронтовой зоне обширного приледникового бассейна с преимущественно застойными слабопроточными гидродинамическими условиями и осадконакоплению мощной пачки ленточных глин. Отступление ледникового покрова обусловило снижение уровня воды в приледниковом озере и появление динамичных потоков. Последующий спуск и обмеление приледникового бассейна вызвали формирование современного облика ложбин стока талых ледниковых вод. Заболачивание поверхности привело к зарастанию дна водоёма растительностью и интенсивному торфонакоплению. Снижение количества накопления торфа, возможно, связано с перестройкой речной сети долины р. Сейды, перехватом стока грунтовых вод и последующим осушением бассейна торфонакопления.

Общий план речной сети территории был заложен в послеледниковое время, во время отступления

приледникового озера, связанного с валдайским ледниковым покровом. Конфигурация пойменно-руслового комплекса свидетельствует о формировании речной сети в условиях с изменчивыми гидродинамическими условиями. Использование цифровой модели рельефа высокого разрешения позволило детализировать распространение основных элементов долины реки и выделить две надпойменные террасы и пойму на основе метода трассирования террасовых уровней.

Выделенные морфоструктурные элементы в целом согласуются с геоморфологической схемой (рис. 5), построенной на основе общепринятых картографических материалов (Калецкая, Грибанов, 1955).

Отличия выявлены лишь на локальных участках распространения ледниково-аккумулятивного и эрозивно-аккумулятивного аллювиального рельефа (табл. 1), что, по-видимому, связано с применением при построении геоморфологической схемы топоосновы низкого качества. Не исключено, что разногласия в выделении некоторых геоморфологических ха-

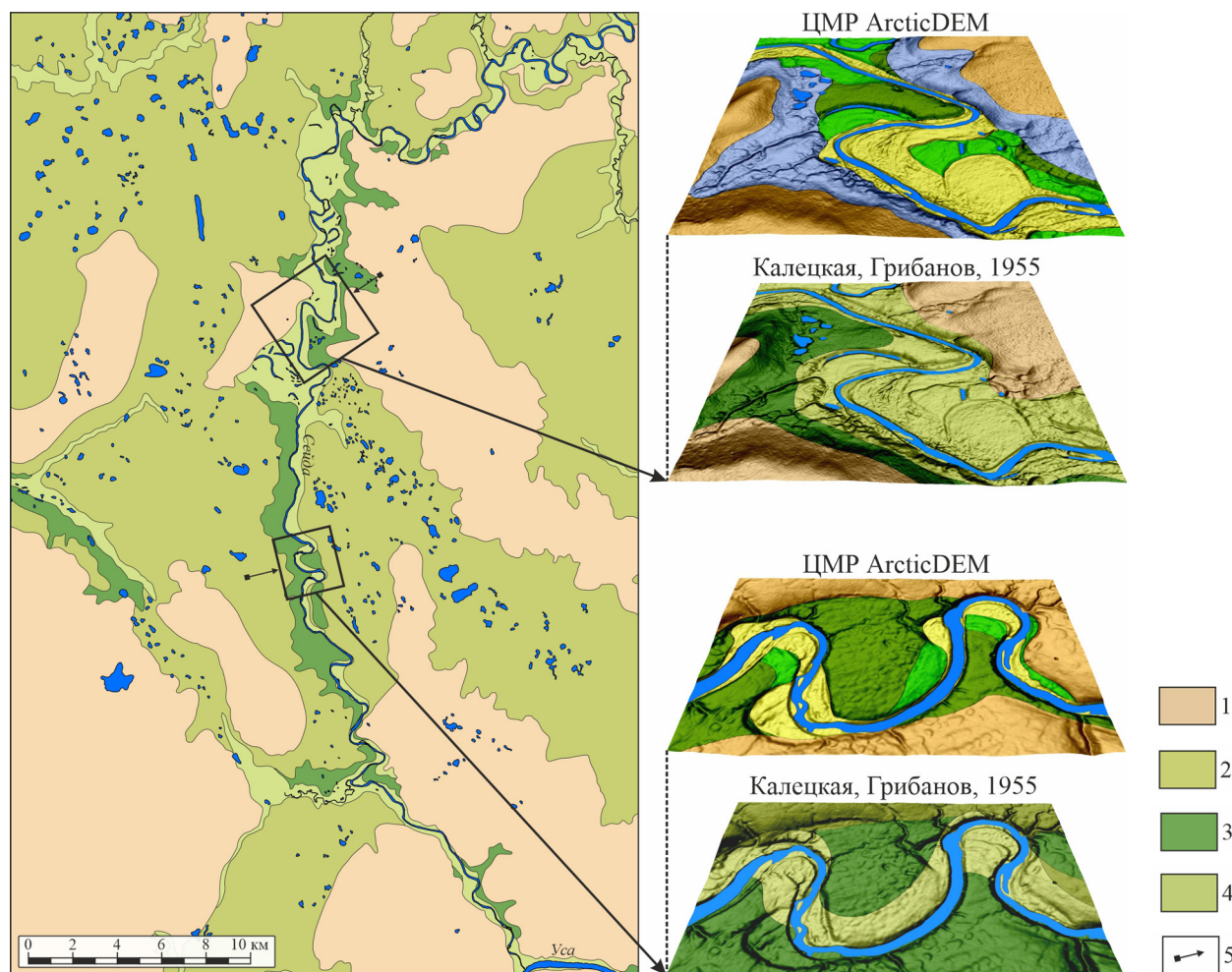


Рис. 5. Оцифрованная геоморфологическая схема долины р. Сейды (по Калецкая, Грибанов, 1955): 1 — ледниково-аккумулятивная ледниковая пологоволнистая и волнистая равнины; 2 — плоская и слабоволнистая флювиогляциальная равнина; 3 — вторая и третья надпойменные террасы; 4 — пойма и первая надпойменная терраса; 5 — точка обзора рельефа. Условные обозначения к ЦМР ArcticDEM см. на рис. 4

Fig. 5. Digitized geomorphological map of the Seyda River valley (after Kaletskaia, Gribanov, 1955): 1 — glacial-accumulative glacial gently undulating and undulating plain; 2 — flat and slightly undulating fluvioglacial plain; 3 — second and third terraces above the floodplain; 4 — floodplain and the first terrace above the floodplain; 5 — terrain viewpoint. For ArcticDEM symbols, see Fig. 4



Таблица 1. Сравнительная характеристика типов рельефа долины р. Сейды

Table 1. Comparative characteristics of relief types in the Seyda River valley

Типы рельефа Types of relief	ArcticDEM			Калецкая, Грибанов, 1955 Kaletskaya, Gribanov, 1955		
	Характеристика рельефа Relief characteristics	Площадь Square		Характеристика рельефа Relief characteristics	Площадь Square	
		км ²	%		км ²	%
Аккумулятивный ледниковый Accumulative glacial	Холмисто-увалистый и холмисто-волнистый Hilly ridged and hilly wavy	90.1	7.4	Пологоволнистый и волнистый Gently wavy and wavy	496.2	42.4
	Пологоволнистый Gently wavy	382.6	32.7			
Эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый Erosive-accumulative water-glacial	Равнинно-холмистый (долинные зандры) Plain-hilly (valley outwash)	537.1	45.9	Плоский и слабоволнистый Flat and slightly wavy	545.2	46.6
	Равнинный плоский (третья НПТ) Plain flat (third terrace)	104.1	8.9			
Эрозионно-аккумулятивный аллювиальный Erosion-accumulative alluvial	Вторая НПТ Second terrace	16.4	1.7	Вторая НПТ Second terrace	54.9	4.7
	Первая НПТ First terrace	22.2	1.9	Пойма и первая НПТ Floodplain and first terrace	73.7	6.3
	Пойма Floodplain	17.5	1.5			

Примечание. НПТ — надпойменная терраса.

Note. НТП — terrace above floodplain.

рактических связаны с использованием разномасштабных данных.

Дальнейшие комплексные литологические, палинологические и геохронологические исследования помогут восстановить палеогеографические обстановки формирования четвертичных отложений в долине р. Сейды, что повысит достоверность интерпретации генезиса осадков неоплейстоцена исследуемой территории.

Заключение

В результате проведенных геолого-геоморфологических исследований на основе гипсометрической характеристики, углов наклона рельефа, экспозиции склонов и текстурно-структурных характеристик четвертичных осадков были выделены: аккумулятивный ледниковый, эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый и эрозионно-аккумулятивный аллювиальный типы рельефа. Построена геолого-геоморфологическая карта долины р. Сейды и выявлены основные морфогенетические особенности рельефа при его формировании.

Холмисто-волнистый, холмисто-увалистый и пологоволнистый ледниково-аккумулятивный рельеф занимает самое высокое гипсометрическое положение и сложен ледниковыми и межледниковыми отложениями среднего неоплейстоцена. Эрозионно-аккумулятивный водно-ледниковый рельеф представлен долинными зандрами, переходящими в поверхность обширного приледникового озера. Эрозионно-аккумулятивный аллювиальный рельеф образован в послеледниковое время, во время отступления прилед-

никового озера, связанного с валдайским ледниковым покровом.

Применение цифровых моделей рельефа высокой точности позволило получить большой объем данных, который в дальнейшем будет применен при решении геолого-геоморфологических задач автоматизированными методами классификации рельефа. Точность отображения цифровой модели рельефа ArcticDEM достаточна для детального картирования основных элементов пойменно-руслового комплекса бассейнов рек арктических регионов России. В перспективе метод построения картосхем на базе цифровых моделей рельефа предполагается использовать при проведении регионального морфогенетического анализа четвертичных отложений всей территории Большеземельской тундры.

Исследование текстурно-структурных характеристик четвертичных осадков и построение геологического профиля проводились в рамках научного проекта РНФ № 23-27-00281 «Верхний неоплейстоцен и голоцен на севере Печорской низменности: седиментогенез, стратиграфия, палеогеография».

Литература / References

- Андреичева Л. Н. Основные морены Европейского Северо-Востока России и их литостратиграфическое значение. СПб.: Наука, 1992. 125 с.
 Andreicheva L. N. The basal moraines of the European Northeast of Russia and their lithostratigraphic significance. St. Petersburg: Nauka, 1992, 125 p. (in Russian)
 Андреичева Л. Н. Плейстоцен Европейского Северо-Востока. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 323 с.

- Andreicheva L. N. Pleistocene of the European Northeast. Yekaterinburg: UB RAS, 2002, 323 p.
- Андреичева Л. Н., Дурыгина Д. А. Новые данные по стратиграфии среднего плейстоцена Печорской низменности // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: новые результаты и новые перспективы: Материалы XIII Геологического съезда Республики Коми. Сыктывкар, 1999. Т. II. С. 184—187.
- Andreicheva L. N., Duryagina D. A. New data on the stratigraphy of the Middle Pleistocene of the Pechora Lowland. Geology and mineral resources of the European North-East of Russia: new results and new prospects. Proc. 13th Geological Congress of the Komi Republic, V. 2, Syktyvkar, 1999, pp. 184—187. (in Russian)
- Ботвинкина Л. Н. Методическое руководство по изучению слоистости. М.: Наука, 1965. 265 с.
- Botvinkina L. N. Methodological guide to the study of layering. Moscow: Nauka, 1965, 265 p. (in Russian)
- Воробьев Н. Н. Изучение валунных суглинков в долине р. Сейды // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского региона: Материалы 31-й научной конференции института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар: Геопринт, 2022. С. 24—27.
- Vorobyov N. N. Study of boulder loams in the Seyda River valley. Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Urals region. Proceedings of the 31st scientific conference of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the RAS, Syktyvkar: Geoprint, 2022, pp. 24—27. (in Russian)
- Исаков В. А. Генетические типы четвертичных флювиальных отложений в среднем течении р. Сейды (восток Большеземельской тундры) // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского региона: Материалы 31-й научной конференции института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар: Геопринт, 2022. С. 59—63.
- Isakov V. A. Genetic types of Quaternary fluvial deposits in the middle reaches of the Seyda River (eastern Bolshezemelskaya tundra). Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Urals region. Proceedings of the 31st scientific conference of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar: Geoprint, 2022, pp. 59—63. (in Russian)
- Исаков В. А., Воробьев Н. Н. Строение четвертичных отложений в долине р. Сейды // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского региона: Материалы 30-й научной конференции Института геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар: Геопринт, 2021. С. 31—35.
- Isakov V. A., Vorobyov N. N. The structure of Quaternary deposits in the Seyda River valley. Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Urals region. Proceedings of the 30th scientific conference of the Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar: Geoprint, 2021, pp. 31—35. (in Russian)
- Калецкая М. С., Грибанов Б. В. Геологическая съемка масштаба 1 : 200 000 в бассейне рр. Сейды и Усы (отчет Сейдинской геолого-съемочной партии по работам 1954 г.). Воркута: Комигеолфонд, № 2118, 1955. 149 с.
- Kaletskaia M. S., Gribanov B. V. Geological survey on a scale 1 : 200 000 in the basin of the Seyd and Usa rivers (report of the Seyd geological survey party in 1954). Vorkuta: Komigeolfond, No. 2118, 1955, 149 p. (in Russian)
- Леонтьев О. К., Рычагов Г. И. Общая геоморфология: Учеб. пособие для географических специальностей вузов. М.: Высшая школа, 1979. 287 с.
- Leontyev O. K., Rychagov G. I. General geomorphology: Textbook for geographical specialties of universities. Moscow: Higher School, 1979, 287 p.
- Марченко-Вагапова Т. И. Палеогеографические обстановки осадконакопления в родионовское межледниковье в верхнем течении р. Сейды (по данным палинологического и диатомового методов) // Вестник геоэкологии. 2022. № 10. С. 36—41. doi:10.19110/geov.2022.10.4
- Marchenko-Vagapova T. I. Paleogeographical settings of sedimentation during the Rodiono interglacial in the upper reaches of the Seyda River (according to palynological and diatom methods). Vestnik of Geosciences, 2022, No. 10, pp. 36—41. (in Russian)
- Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM V. 2 // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2. URL: <http://science-education.ru/129-21949>
- Mineev A. L., Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Chistova Z. B. Methodological aspects of creating a digital relief model of the Arkhangelsk region based on ASTER GDEM V. 2). Modern problems of science and education, 2015, No. 2. (in Russian)
- Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Минеев А. Л., Чистова З. Б. Анализ возможности применения цифровых моделей рельефа ASTER GDEM v2 и ArcticDEM для исследований арктических территорий России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 117—127. doi:10.21046/2070-7401-2020-17-7-117-127
- Polyakova E. V., Kutinov Yu. G., Mineev A. L., Chistova Z. B. Analysis of the possibility of using digital terrain models ASTER GDEM v2 and ArcticDEM for research of the Arctic territories of Russia. Modern problems of remote sensing of the Earth from space, 2020, V. 17, No. 7, pp. 117—127. (in Russian)
- Хромых В. В., Хромых О. В. Цифровые модели рельефа: Уч. пос. Томск: ТМЛ-Пресс, 2007. 178 с.
- Khromykh V. V., Khromykh O. V. Digital elevation models. Uch. Village. Tomsk: TML-Press, 2007, 178 p. (in Russian)
- Astakhov V. Middle Pleistocene glaciations of the Russian North // Quaternary Science Reviews. 2004. Vol. 23. № 11—13. P. 1285—1311. doi:10.1016/j.quascirev.2003.12.011

Поступила в редакцию / Received 30.09.2023



Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 502.53(470.21)

DOI:10.19110/geov.2023.10.6

Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область)

С. А. Игловский, А. В. Баженов, Е. Ю. Яковлев

ФИЦ комплексного изучения Арктики УрО РАН, Архангельск
iglovskys@mail.ru; abv-2009@yandex.ru; yakov24lev99@mail.ru

В статье рассмотрены закономерности пространственного распределения ^{137}Cs и естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K в верхнем (0–5 см) слое почв основных функциональных зон г. Полярные Зори. Анализ общей гамма-активности территории с использованием мобильного гамма-спектрометрического комплекса RS-700 показал, что в пределах города можно выделить три локальные аномалии повышенного гамма-излучения, которые приурочены к домам высокой этажности. В ненарушенных торфяных почвах в районе Кольской АЭС и в зоне городских лесов и парков максимальная удельная активность техногенного ^{137}Cs составила 29.5 и 28.8 Бк/кг соответственно. В других функциональных зонах города активность ^{137}Cs в 5 раз меньше. По результатам корреляционного анализа можно утверждать, что техногенный ^{137}Cs имеет умеренную связь (по шкале Чеддока) с фракцией 45 и 500 мкм. ^{232}Th имеет высокую связь с ^{226}Ra , а ^{40}K — с ^{232}Th , что является статистически значимыми результатами при учете P-Value. Можно предположить, что естественные радионуклиды ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra имеют умеренную связь с фракцией 1 мм из-за присутствия в верхнем слое почв частиц этого размера. Отмечается умеренная связь между ^{232}Th и ^{40}K .

Ключевые слова: удельная активность, городские почвы, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , Полярные Зори, Мурманская область.

Specific spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of the city of Polyarnyye Zori (Murmansk region)

S. A. Iglovsky, A. V. Bazhenov, E. Y. Yakovlev

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the UB RAS

The article examines patterns of spatial distribution of ^{137}Cs and natural radionuclides ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K in the upper (0–5 cm) layer of soils in the main functional zones of the city of Polyarnyye Zori. The analysis of the general gamma activity of the territory, using RS-700 mobile gamma spectrometric complex, showed, three local anomalies of increased gamma radiation, which were confined to high-rise buildings within the city. In undisturbed peat soils in the area of the Kola Nuclear Power Plant and in the area of urban forests and parks, the maximum specific activity of technogenic ^{137}Cs was 29.5 and 28.8 Bq/kg, respectively. In other functional zones of the city, the activity of ^{137}Cs was 5 times less. According to the results of the correlation analysis, the technogenic ^{137}Cs has a moderate relationship (on the Chaddock scale) with the 45 and 500 μm fraction. ^{232}Th has a high affinity with ^{226}Ra , and ^{40}K with ^{232}Th , which are statistically significant results when taking P-Value into account. It can be assumed that natural radionuclides ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra have a moderate association with the 1 mm fraction due to the presence of particles of this size in the upper soil layer. There is a moderate relationship between ^{232}Th and ^{40}K .

Keywords: specific radioactivity, urban soils, ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , Polyarnyye Zori, Murmansk region.

Основными источниками техногенной радиоактивности для изучаемой территории являлись: стратосферные выпадения в результате атмосферных ядерных испытаний, локальные (тропосферные) выпадения в результате испытаний на ядерном полигоне архипелага Новая Земля. Более ранние исследования (Kuzmenkova, Vorobyova, 2015; Никанов и др., 2019; Мелентьев, 2021) не определили повышенных значений естественной и техногенной радиоактивности в почвах Мурманской области. Удельная активность техногенного ^{137}Cs в верхнем слое почв (0–5 см) изменя-

ется от 3 до 60 Бк/кг (Воробьева и др., 2017). Несмотря на это, Кольский полуостров является местом, потенциально опасным для загрязнения радионуклидами в результате трансграничного воздушного переноса (Kuzmenkova, Vorobyova, 2015; Никанов и др., 2019; Мелентьев, 2021). Загрязнение почв ^{137}Cs соответствует уровню мирового фона, и ранее «существенных участков со следами выпадения радиоактивных осадков после аварии на Чернобыльской АЭС не выявлено» (Романович и др., 2006). Удельная активность естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th в ненарушенных

Для цитирования: Игловский С. А., Баженов А. В., Яковлев Е. Ю. Особенности пространственного распределения ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори (Мурманская область) // Вестник геонаук. 2023. 10 (346). С. 51–57. DOI: 10.19110/geov.2023.10.6

For citation: Iglovsky S. A., Bazhenov A. V., Yakovlev E. Y. Specific spatial distribution of ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in soils of the city of Polyarnyye Zori (Murmansk region). Vestnik of Geosciences, 2023, 10 (346), pp. 51–57, doi: 10.19110/geov.2023.10.6

почвах Хибинской тундры составляла: в болотной — от 7.03 до 71.06, а в горной тундре — от 15.17 до 27.75 Бк/кг (Никанов и др., 2019).

Город Полярные Зори расположен на возвышенной части берега оз. Пинозеро, а русло р. Нивы разделяет его на правую и левую части. Правобережный район сформирован системой городских озелененных территорий, водных объектов, а так же сеткой улиц и дорог. К городским озелененным территориям относятся: лесопарковая зона у берега оз. Пинозеро, парковые массивы внутри жилых кварталов. Правобережье р. Нивы — жилая зона, которая представлена преимущественно многоэтажной застройкой. Четвертый микрорайон сформирован 3- и 9-этажными жилыми домами. На севере города располагается промышленная зона (Карта ..., 2018).

Целью данной работы является получение оригинальных данных и выявление основных закономерностей пространственного распределения естественных и техногенных радионуклидов в почвах г. Полярные Зори в зависимости от типа городской застройки.

Предметом исследования являлась удельная активность ^{137}Cs , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K в городских и в фоновых ненарушенных почвах к югу от Кольской АЭС. Подобные исследования городских почв в Полярных Зорях не проводились.

Материалы и методы

Пробы почвы доводили до абсолютно сухого состояния при температуре 105 °C. В сосудах Маринелли проводились измерения удельной активности изотопов при помощи гамма-спектрометра «ПРОГРЕСС-2000» (Методика ..., 2016). Фракционный состав проб почвы выполнялся просеивающей машиной AS200 (Retsch, Германия) ситами с диаметром 200 мкм и размером ячеек < 45, 45, 100, 250, 500 мкм, 1.2 мм.

Автомобильные гамма-спектрометрические исследования выполнялись с использованием мобильного сцинтилляционного гамма-спектрометрического комплекса RS-700 (Канада), который имеет цифровой спектрометр с разрешением (1024 канала), позволяющий выполнять измерения общей радиоактивности местности через скорость счета в секунду. Измерения выполнялись на высоте 1.7 м над поверхностью земли. Спектрометр размещали в багажнике, установленном на автомобиле. В общей сложности при гамма-спектрометрической съемке было обработано 370 точек измерений (рис. 3). Точность привязки составляла ± 1 –1.5 м (Мобильная система радиометрического контроля RS-700).

Результаты исследования

Летом 2018 г. проведены измерения удельной активности ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах г. Полярные Зори. На первоначальном этапе определены зоны в соответствии с типом застройки и точки отбора проб почвы. В ходе экспедиционных работ было отобрано 18 проб во всех районах города, в пунктах, представленных на рисунке 1.

На большей части города широкое распространение получили урбиквазиземы, индикатором которых служит генетический горизонт «урбик» — горизонт аккумуляции и биогенной трансформации органоминер-

ального и искусственного материала, формирующийся синлитогенно под воздействием антропогенной деятельности. Он характеризуется тем, что содержит не менее 10 % антропогенных включений. Реплантоземы представлены на газонах в кварталах с каменной застройкой. Наиболее сформировавшийся почвенный профиль отмечается под участками с древесной и кустарниковой растительностью в парковых и лесных зонах (Крячюнас и др., 2020). Функциональное зонирование территории г. Полярные Зори приведено на рисунке 1 (Карта ..., 2018). В зоны застройки домами высокой этажности попадают точки отбора проб почвы: 1, 6, 7, 11, 12, 14, 15, 17, 18; в зоны городских лесов и парков — 5, 8, 9; в зоны зеленых насаждений общего пользования — 2–4, 10, 13, 16.

По данным проведенных исследований установлено, что значения удельной активности ^{137}Cs в почвах от 10 до 29.5 Бк/кг (точки 3, 4, 9) получены в юго-восточной части города в почвах городских лесов, парков и в зоне зеленых насаждений общего пользования (рис. 1, а). Значения от 3 до 10 Бк/кг выявлены в почвах зон многоэтажной застройки и озелененных территорий специального назначения. Для почв остальных районов города значения ^{137}Cs составили менее 3 Бк/кг.

По данным выполненных исследований установлено, что максимальные значения удельной активности ^{40}K в почвах (от 40 до 340.5 Бк/кг) распределены практически равномерно по всей территории города. Значения менее 40 Бк/кг выявлены в почвах юго-восточной части города в зонах городских лесов, парков и зеленых насаждений общего пользования и коррелируют с распространением максимальных значений техногенного ^{137}Cs (рис. 1, d).

На рисунке 1, с показано, что максимальные значения удельной активности ^{232}Th в почвах (от 6 до 14.9 Бк/кг) относятся к почвам зоны застройки высокой и средней этажности. Значения менее 6 Бк/кг встречаются практически равномерно в почвах всех зон города.

По данным проведенных исследований установлено, что максимальные значения удельной активности ^{226}Ra в почвах (от 5 до 17.1 Бк/кг) относятся к зонам многоэтажной застройки и озелененных территорий специального назначения. Значения менее 5 Бк/кг встречаются практически равномерно в почвах всех зон города (рис. 1, b).

Обсуждение результатов

Более ранние исследования близлежащих территорий показали, что наибольшие значения удельной активности ^{137}Cs отмечаются в лесной подстилке и гумусовом горизонте (от 30 до 103) Бк/кг в окрестностях Кольской АЭС. Удельная активность ^{137}Cs в 15-километровой зоне от Кольской АЭС соответствует фоновым уровням, формирующимся в результате глобальных выпадений техногенных радионуклидов (Кизеев и др., 2018). Для сравнительного анализа авторами были отобраны пробы из верхнего 5-сантиметрового слоя ненарушенных торфяно-подзолистых почв в 2 км к югу от Кольской АЭС, где максимальные значения ^{137}Cs достигали 29.5 Бк/кг.

Средние значения удельной активности радионуклидов составили: ^{137}Cs в почвах вблизи домов высокой этажности г. Полярные Зори — 3.33 Бк/кг,

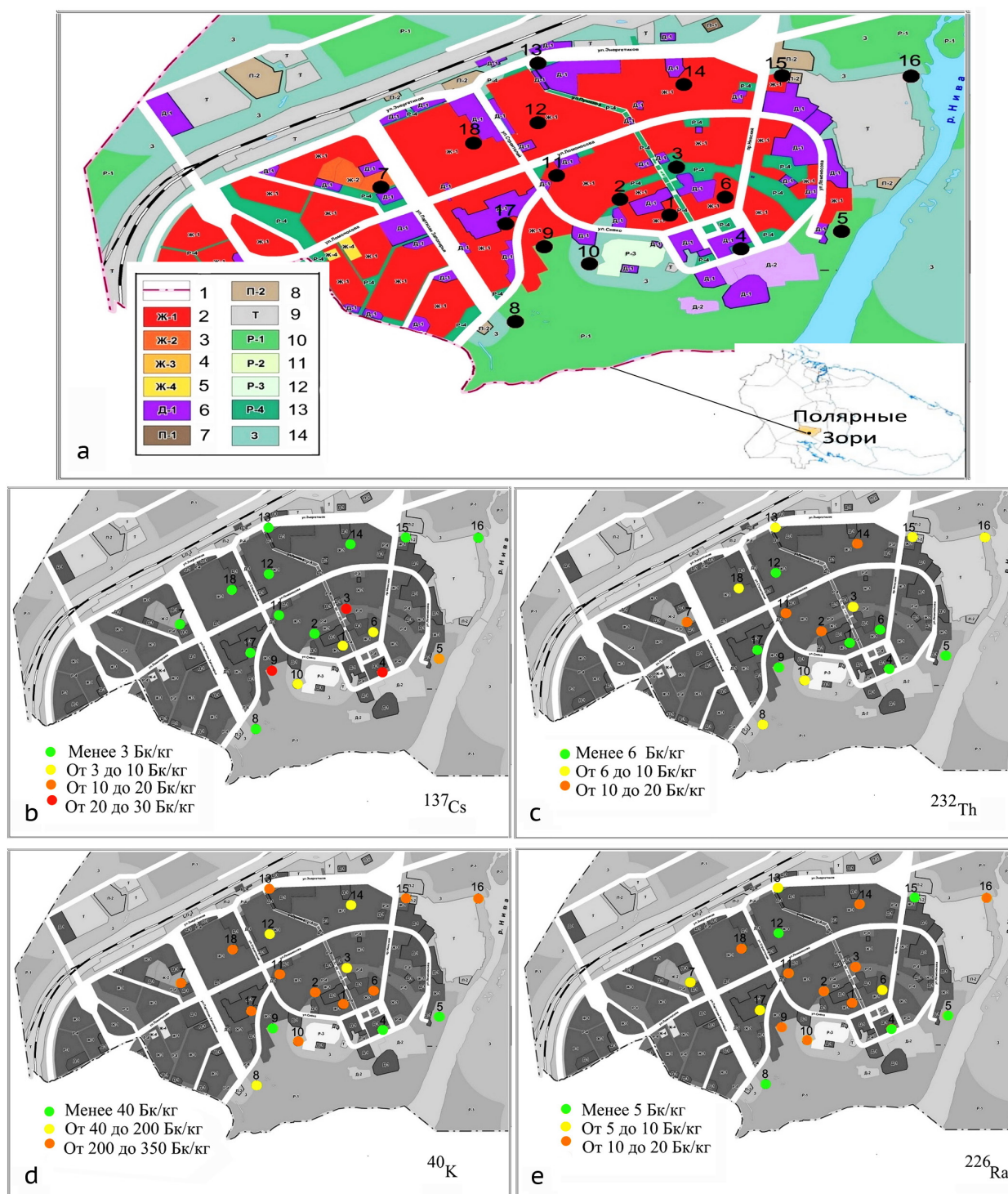


Рис. 1. Расположение точек отбора проб почвы в г. Полярные Зори на фрагменте картосхемы функционального зонирования территории города (а) по данным (Карта..., 2018) с изменениями: 1 — граница города, 2—14 — границы зон; 2—5 — жилые застройки: 2 — домами высокой этажности, 3 — многоквартирными домами средней этажности, 4 — малоэтажными блокированными домами, 5 — индивидуальными домами; 6 — зона multifunctional общественно-деловой застройки; 7—9 — производственные зоны: 7 — I и III класса, 8 — IV и V класса, 9 — инженерной и транспортной инфраструктуры; 10—14 — рекреационные зоны: 10 — городских лесов и парков, 11 — спортивно-рекреационная, 12 — спортивных сооружений, 13 — зеленых насаждений общего пользования, 14 — озеленённых территорий спецназначения. Пространственное распределение активности техногенных ^{137}Cs (b) и естественных радионуклидов: ^{232}Th (c), ^{40}K (d), ^{226}Ra (e) (Бк/кг) в почвах города по данным (Карта..., 2018) с изменениями

Fig. 1. Location of soil sampling points in the city of Polyarnye Zori on a fragment of the map of the functional zoning of the city according (a) to (Urban..., 2018) with changes: 1 — boundary of the city, 2—14 — boundaries of the zones; 2—5 — residential buildings: 2 — high-rise, 3 — mid-rise multi-apartment, 4 — low-rise block, 5 — individual houses; 6 — multifunctional public and business buildings; 7—9 — industrial zones: 7 — I and III class, 8 — IV and V class, 9 — engineering and transport infrastructure; 10—14 — recreational zones: 10 — urban forests and parks, 11 — sports and recreational, 12 — sports facilities, 13 — public green spaces, 14 — green spaces for special purposes. Spatial distribution of the activity of technogenic ^{137}Cs (b) and natural radionuclides: ^{232}Th (c), ^{40}K (d), ^{226}Ra (e) (Bq/kg) in the soils of the city according to (Urban..., 2018) with changes

в пределах городских лесов и парков — 6.78 Бк/кг, в почвах зеленых насаждений общего пользования — 10.18 Бк/кг; ^{226}Ra в почвах рядом с домами высокой этажности — 9.36 Бк/кг, в почвах городских лесов и парков — 8.35 Бк/кг, в почвах зеленых насаждений общего пользования — 10.17 Бк/кг (рис. 2); ^{232}Th в почвах рядом с домами высокой этажности — 9.04 Бк/кг, в почвах городских лесов и парков — 7.79 Бк/кг, в почвах зеленых насаждений общего пользования — 8.2 Бк/кг; ^{40}K в почвах рядом с домами высокой этажности 216.58 Бк/кг, в почвах городских лесов и парков — 161.43 Бк/кг, в почвах зеленых насаждений общего пользования — 196.86 Бк/кг (рис. 3).

Анализ общего гамма-излучения территории г. Полярные Зори по результатам гамма-спектрометрических исследований с использованием мобильного комплекса RS-700 показал, что в пределах города можно выделить три локальные аномалии повышенного гамма-излучения (0.08—0.084 мкЗв/ч) (рис. 3), что не превышает средних значений по России (0.04—0.20 мкЗв/ч). Также можно выделить три зоны гамма-излучения на северо-западе, в средней части и

на востоке города с меньшими значениями (0.068—0.072 мкЗв/ч). Все аномалии приурочены к домам высокой этажности. В остальных частях города значения общей гамма-активности составили менее 0.06 мкЗв/ч.

Максимум анализируемых образцов почв исследован с помощью сит с размером ячеек 100 мкм и 250 мкм (по 23 % соответственно), а минимум — ситом с размером ячеек < 45 мкм (4 %) (рис. 4). По результатам корреляционного анализа взаимосвязей между радионуклидами и фракционным составом можно утверждать, что техногенный ^{137}Cs имеет умеренную по силе связь (по шкале Чеддока) с фракцией 45 и 500 мкм. ^{232}Th имеет высокую по силе связь с ^{226}Ra , а ^{40}K — с ^{232}Th , что является статистически значимыми результатами при учете P-Value. Интересной особенностью явилось отсутствие связи активностей ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra с фракциями 45 и < 45 мкм и наличие умеренной по силе связи ^{226}Ra с фракцией 1 мм. Можно предположить, что естественные радионуклиды ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra имеют умеренную по силе связь с фракцией 1 мм из-за присутствия в верхнем слое почв частиц этого размера. Отмечается умеренная по силе связь между ^{232}Th и ^{40}K (табл. 1).

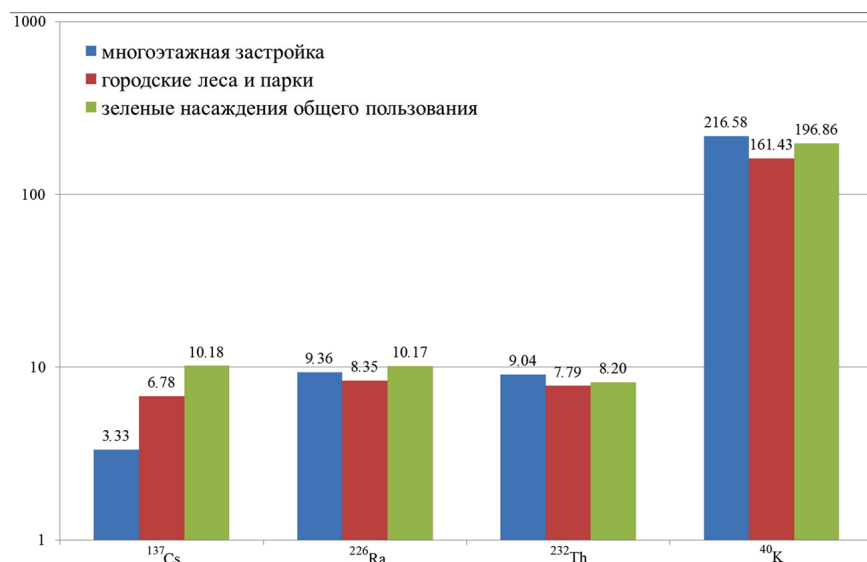


Рис. 2. Средние значения удельной активности техногенного ^{137}Cs и естественных ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra -радионуклидов (Бк/кг) в почвах функциональных зон г. Полярные Зори: многоэтажной застройки (синий), городских лесов и парков (красный), зеленых насаждений общего пользования (зеленый). Использован логарифмический масштаб

Fig. 2. Average specific activity values of technogenic ^{137}Cs and natural radionuclides ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra (Bq/kg) in the soils of the functional zones of the city of Polyarnye Zori: multi-storey buildings (blue), urban forests and parks (red), public green spaces (green). The logarithmic scale is used

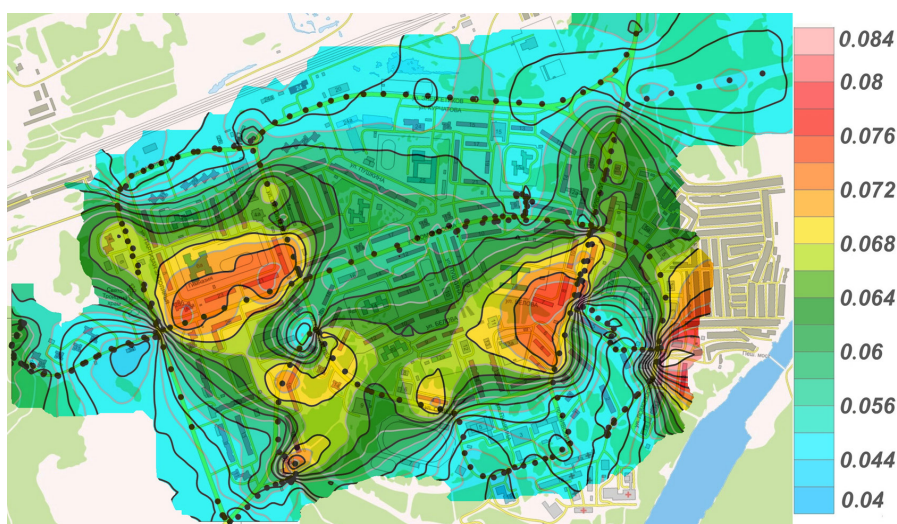


Рис. 3. Общая гамма-активность (мкЗв/ч) территории г. Полярные Зори по результатам гамма-спектрометрических исследований с использованием комплекса RS-700. Точками показаны автомобильные маршруты исследований

Fig. 3. Total gamma activity (mkSv/h) of the territory of the city of Polyarnye Zori according to the results of gamma-spectrometric studies using RS-700 complex. The dots show the vehicle routes of the surveys



Таблица 1. Корреляционная матрица взаимосвязей между радионуклидами и просеиваемыми фракциями и наименьшее значение уровня значимости (P-value)

Table 1. Correlation matrix of relationships between radionuclides and sifted fractions and the smallest value of the significance level (P-value)

	2 mm	1 mm	500 µm	250 µm	100 µm	45 µm	< 45 µm	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
2 mm	1										
p-value	—										
1 mm	0.7428	1									
p-value	0	—									
500 µm	0.3806	0.5165	1								
p-value	0.119	0.028	—								
250 µm	−0.599	−0.609	−0.522	1							
p-value	0.009	0.007	0.026	—							
100 µm	−0.785	−0.874	−0.557	0.3298	1						
p-value	0.000	0.000	0.016	0.181	—						
45 µm	−0.641	−0.584	−0.788	0.42	0.655	1					
p-value	0.004	0.011	0.000	0.083	0.003	—					
< 45 µm	−0.55	−0.575	−0.585	0.1774	0.6679	0.6883	1				
p-value	0.018	0.013	0.011	0.481	0.002	0.002	—				
¹³⁷ Cs	−0.124	−0.022	0.5501	−0.262	−0.009	0.4293	−0.073	1			
p-value	0.791	0.963	0.201	0.570	0.984	0.336	0.877	—			
²²⁶ Ra	0.0719	0.3503	0.1179	−0.06	−0.3	−0.139	0.0281	−0.007	1		
p-value	0.777	0.154	0.641	0.814	0.226	0.582	0.912	0.989	—		
²³² Th	0.0163	−0.012	0.0239	0.0244	−0.018	−0.091	0.0586	−0.51	0.4873	1	
p-value	0.949	0.961	0.925	0.923	0.944	0.719	0.817	0.242	0.040	—	
⁴⁰ K	0.0559	−0.077	0.1486	0.1285	−0.102	−0.233	0.021	−0.699	0.2334	0.4533	1
p-value	0.826	0.762	0.556	0.611	0.687	0.352	0.934	0.080	0.351	0.059	—

Примечание. В таблице сгруппированы градиенты цветами от красного с минимальным до зеленого с максимальным значением коэффициента корреляции.

Note. The table groups gradients in colors from red with the minimum to green with the maximum value of the correlation coefficient.

Закключение

При анализе пространственного распределения полученных оригинальных данных установлено, что максимальное значение удельной активности ¹³⁷Cs в почвах г. Полярные Зори (28.8 Бк/кг) отмечается в юго-восточной части города в зонах городских лесов, парков и зеленых насаждений общего пользования. Значения от 3 до 10 Бк/кг выявлены в почвах зон многоэтажной застройки и озеленённых территорий спецназначения. Для почв остальных районов города значения ¹³⁷Cs составили менее 3 Бк/кг. По нашим данным, в 2 км к югу от Кольской АЭС в верхнем (0–5 см) слое ненарушенных торфяно-подзолистых почв максимальные значения удельной активности ¹³⁷Cs достигают 29.5 Бк/кг.

Максимальные значения удельной активности естественных радионуклидов в городских почвах составили: для ²³²Th в зонах застройки многоквартирными домами высокой и средней этажности — 14.9 Бк/кг; для ²²⁶Ra в зоне застройки многоквартирными домами высокой этажности — 17.1 Бк/кг; для ⁴⁰K в зоне озеленённых территорий — 340.5 Бк/кг. Для ²²⁶Ra и ²³²Th более высокие активности в почвах города связаны с гранулометрическим составом и характером подстилающих почву четвертичных отложений. Распределение удель-

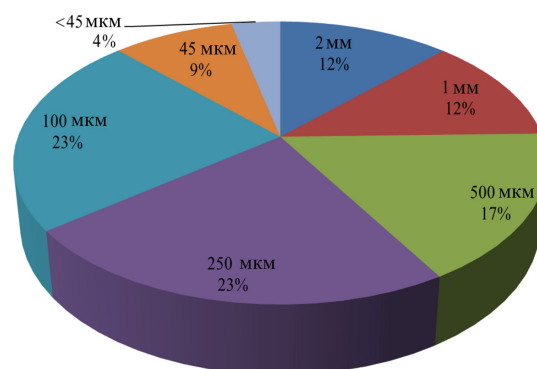


Рис. 4. Соотношение фракционного состава анализируемых почв г. Полярные Зори (%)

Fig. 4. Fractional composition of the analyzed soils in the city of Polyarnyye Zori (%)

ной активности ⁴⁰K в почвах объясняется разной плотностью растительности на изученной территории, легко вовлекающей его в биологический круговорот.

Анализ общего гамма-излучения территории г. Полярные Зори по результатам гамма-спектрометрических исследований показал, что можно выделить три локальные аномалии повышенного гамма-излу-

чения в диапазоне от 0.08 до 0.084 мкЗв/час. Все выявленные аномалии приурочены к домам высокой этажности.

По результатам корреляционного анализа можно утверждать, что техногенный ^{137}Cs имеет умеренную связь (по шкале Чеддока) с фракцией 45 и 500 мкм. ^{232}Th имеет высокую связь с ^{226}Ra , а ^{40}K — с ^{232}Th , что является статистически значимыми результатами при учете P-Value. Можно предположить, что естественные радионуклиды ^{232}Th , ^{40}K , ^{226}Ra имеют умеренную связь с фракцией 1 мм из-за присутствия в верхнем слое почв частиц этого размера. Отмечается умеренная связь между ^{232}Th и ^{40}K .

Радиоэкологические исследования осуществлены при финансовой поддержке государственного задания «Особенности миграции элементов и их изотопов в абиотических компонентах окружающей среды западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», № гос. регистрации 122011300333-1, и гранта Президента РФ для молодых учёных № МК-4298.2022.1.5.

Литература / References

- Воробьева Т. А., Евсеев А. В., Кузьменкова Н. В. Радиогеохимические исследования состояния ландшафтов Кольского полуострова // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 17–26. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-17-26
- Vorobyeva T. A., Evseev A. V., Kuzmenkova N. V. Radiogeochemical studies of the state of the landscapes of the Kola Peninsula. Arctic: Ecology and Economy, 2017, No. 2 (26), pp. 17–26. (in Russian)
- Карта градостроительного зонирования г. Полярные Зори. 2018. URL: <http://www.pz-city.ru/index.php/pravila-zemlepolzovaniya-i-zastrojki/62-gradostroitelstvo/945-karty-gradostroitel'nogo-zonirovaniya> (дата обращения: 25.09.2023).
- Urban zoning map of Polyarnye Zori. <http://www.pz-city.ru/index.php/pravila-zemlepolzovaniya-i-zastrojki/62-gradostroitelstvo/945-karty-gradostroitel'nogo-zonirovaniya> (in Russian)
- Кизеев А. Н., Манахов Д. В., Силкин К. Ю., Ушамова С. Ф., Попова М. Б. Состояние почвенно-растительного покрова в 30-км зоне Кольской атомной электростанции // Наука и бизнес: пути развития. 2018. № 4 (82). С. 199–205.
- Kizyev A. N., Manakhov D. V., Silkin K. Yu., Ushamova S. F., Popova M. B. Soil and vegetation cover in the 30-km zone of the Kola nuclear power plant. Science and business: ways of development, 2018, No. 4 (82), pp. 199–205. (in Russian)
- Кряучюнас В. В., Кузнецова И. А., Котова Е. И., Игловский С. А., Мироненко К. А., Суханов С. Г. Содержание и особенности распределения естественных и техногенных радионуклидов в почвах малого арктического города // Экология человека. 2020. № 5. С. 11–20. DOI: 10.33396/1728-0869-2020-5-11-20
- Kryauchunas V. V., Kuznetsova I. A., Kotova E. I., Iglovsky S. A., Mironenko K. A., Sukhanov S. G. Content and features of the distribution of natural and technogenic radionuclides in the soils of a small Arctic city. Journal Human Ecology, 2020, No. 5, pp. 11–20. (in Russian)
- Мелентьев Г. Б. Естественная радиоактивность редкометалльно-специализированного минерального сырья и урбанизированных территорий Карело-Кольского региона как фактор их радиозоологической оценки // Труды Карельского научного центра РАН. 2021. № 2. С. 27–43. DOI: 10.17076/geo1284
- Melentiev G. B. Natural radioactivity of rare-metal specialized mineral raw materials and urbanized territories of the Karelian-Kola region as a factor in their radioecological assessment. Proc. KarRC RAS, 2021, No. 2, pp. 27–43. (in Russian)
- Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс». М.: Амплитуда. 2016, 12 с.
- Method for measuring the activity of radionuclides using a scintillation gamma spectrometer with the "Progress" software. Moscow: Amplituda, 2016, 12 p. (in Russian)
- Мобильная система радиометрического контроля RS-700. URL: <https://agtsys.ru/storage/instructions/December2019/tPgJvmbN67MXpVzMliOE.pdf> (дата обращения: 25.09.2023).
- Mobile radiometric control system RS-700. <https://agtsys.ru/storage/instructions/December2019/tPgJvmbN67MXpVzMliOE.pdf> (in Russian)
- Никанов А. Н., Гудков А. Б., Шелков М. В., Попова О. Н., Щербина Ф. А., Щербина А. Ф. Характеристика радиационного фона арктической территории в районе расположения горно-обогатительного комплекса // Экология человека. 2019. № 5. С. 11–14. DOI: 10.33396/1728-0869-2019-5-11-14
- Nikanov A. N., Gudkov A. B., Shelkov M. V., Popova O. N., Shcherbina F. A., Shcherbina A. F. Characteristics of the radiation background of the Arctic territory in the area of the mining and processing complex. Journal Human Ecology, 2019, No. 5, pp. 11–14. (in Russian)
- Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009) // Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 115 с.
- Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary and epidemiological rules and regulations. Moscow: Federal Center for Hygiene and Epidemiology Rospotrebnadzor, 2009, 115 p. (in Russian)
- Романович И. К., Чернев А. В., Стамат И. П., Венков В. А., Кормановская Т. А. Дозы облучения населения Мурманской области природными источниками излучения и радионуклидами глобальных выпадений // Экология промышленного производства. 2006. № 1. С. 36–38. DOI:10.17076/geo1284
- Romanovich I. K., Chernev A. V., Stamat I. P., Venkov V. A., Kormanovskaya T. A. Exposure doses of the population of the Murmansk region by natural sources of radiation and radionuclides of global fallout. Industrial ecology, 2006, No. 1, pp. 36–38. (in Russian)
- Кузьменкова Н., Воробьева Т. Ландшафтно-геохимическое картирование территории в северо-западе Кольского полуострова // Журнал геохимической разведки, 2015, № 154, С. 194–199. doi:10.1016/j.gexplo.2014.12.016

Поступила в редакцию / Received 28.09.2023



15-й Международный конгресс по прикладной минералогии: трудный путь из Белгорода в Чэнду The 15th International Congress for Applied Mineralogy: a hard way from Belgorod to Chengdu

В сентябре 2019 г. в Белгороде в ходе 14-го Международного конгресса по прикладной минералогии по решению Международного совета конгресса Shiyong SUN профессор Юго-Западного университета науки и технологий (SWUST), имея полномочия Китайского общества минералогии, петрологии и геохимии, получил право на проведение конгресса ICAM-2023. Почти четыре года оргкомитет (председатель — профессор SWUST Faqin Dong) и научный комитет конгресса (включая академика А. М. Асхабова, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, и академика С. В. Кривовичева, РМО) при поддержке Международного совета конгресса (президент д-р О. Б. Котова, ICAM Council) и Международной минералогической ассоциации (Dr. Maarten Broekmans, IMA/CAM), Юго-Западного университета науки и тех-



Профессор Юго-Западного университета науки и техники, вице-президент Международного совета ICAM, генеральный секретарь конгресса Shiyong SUN на церемонии открытия 15-го Международного конгресса по прикладной минералогии, 21 августа 2023 г.

Professor of Southwest University of Science and Technology, Vice President of the International Council of ICAM, Secretary General of the Congress Shiyong SUN at the Opening Ceremony of the 15th International Congress for Applied Mineralogy, August 21, 2023

In September 2019 in Belgorod during the 14th International Congress for Applied Mineralogy, by decision of the International Congress Council Shiyong SUN, Professor at the Southwest University of Science and Technology (SWUST), having the authority of the Chinese Society for Mineralogy, Petrology and Geochemistry, received the right to host the congress ICAM-2023. The Organizing Committee (chaired by SWUST Professor Faqin Dong) and the Scientific Committee of the Congress (including Academician A. M. Askhabov, IG FRC Komi SC UB RAS, and Academician S. V. Krivovichev, RMS) with the support of the International Council of the Congress



Congress history. Applied mineralogy traditionally develops on the basis of the mutual penetration of mineralogy and related disciplines, the rapid development of analytical methods and experiments, as well as practical application in modern industry, agricultural production, medicine, etc. As a result of combining the achievements of mineralogy with other disciplines (mineral processing, physics, chemistry, biology, computational modeling, metallurgy, materials science, the environment), many active interdisciplinary and applied branches of mineralogy, such as nanomineralogy and biomineralogy, were formed. Thus, the applied mineralogy is an important innovative component in the transition from mineralogy to the integrated use of minerals. International congresses for applied mineralogy are held by the Commission for Applied Mineralogy within the framework of the International Mineralogical Association (IMA-CAM) to coordinate specialists conducting researches in this field. The commission was created in 1979 after the formation of the International Council for Applied Mineralogy (ICAM). In 1993, in the city of Perth (Australia), it was decided that ICAM meetings would be held on a four-year schedule between the organizations of the International Congresses of the International Mineralogical Association (IMA). Later, in 2011 in Trondheim (Norway), it was decided to hold congresses every two years. In September 2019, in Belgorod, Russia, China had been elected by the ICAM to host the ICAM2023. This was the second time that China was granted the opportunity to hold such important international conference related to applied mineralogy after the successful 11th ICAM 2013 in Mianyang. The ICAM2021 was cancelled due to the pandemic situation of COVID-19 worldwide.

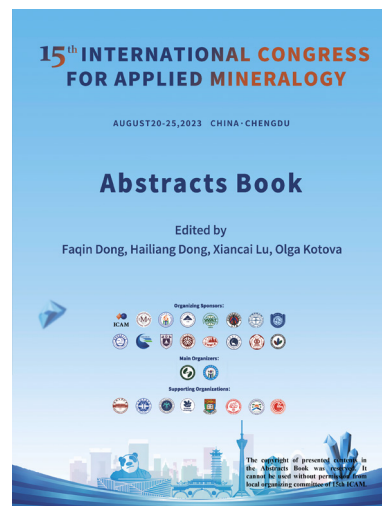


Участники конгресса:

А. В. Понарядов, Е. Л. Котова, О. Б. Котова, Е. А. Голубев, Ю. В. Голубева

Congress participants:

A. V. Ponaryadov, E. L. Kotova, O. B. Kotova, E. A. Golubev, Yu. V. Golubeva

Тезисы докладов
Abstracts Book

нологий, Национального фонда естественных наук и других организаций Китая, а также дружественных университетов, научно-исследовательских институтов и организаций России и других стран 15-й Международный конгресс по прикладной минералогии удалось провести в запланированные даты. Именно трудные времена (пандемия и политические риски) были причиной несостоявшегося конгресса в Португалии в 2021 году, что мотивировало нас, делегатов, выразить самые теплые поздравления и пожелания китайской команде.

20–23 августа 2023 г. известные эксперты и ученые из Китая, России, Франции, Испании, Японии, Австралии и других стран собрались в новом районе Тяньфу города Чэнду (провинция Сычуань, Китай), чтобы на 15-м Международном конгрессе по прикладной минералогии обсудить результаты последних исследований и тенденции развития минералогических и смежных наук, а также международный академический и вузовский обмен и сотрудничество (<http://icam2023.swust.edu.cn>). Конгресс включал девять тематических сессий. Сессия Т9 «Прикладная минералогия глин» — одна из основных, остальные сессии тесно связаны с минералогией глин, например Т1 «Экологическая и медицинская минералогия» или Т2 «Промышленные минералы». Формат конгресса включал в себя научные семинары, выставки и полевые экскурсии. С момента открытия онлайн-системы он привлек внимание более 400 экспертов и ученых разных стран, фактическое же число участников составило 246 человек. Всего было получено 142 тезиса докладов, представлено 9 пленарных и 113 устных докладов на 4 сессиях, 19 стендовых докладов.

Экскурсии в рамках конгресса включали в себя несколько объектов культурного наследия ЮНЕСКО в Китае, связанных с прикладной минералогией, а также эволюцию осадочных отложений травертина Хуан-Лун и сохранение окружающей среды. С древних времен провинция Сычуань носит статус райской земли изобилия и хорошо известна своей самобытной культурой и пряными деликатесами. В результате участники конференции получили возможность узнать как о природных, так и о рукотворных чудесах в дополнение к достижениям в области прикладной минералогии.

По мнению участников, успешное проведение 15-го Международного конгресса по прикладной минерало-

(President Dr. Sc. O. B. Kotova, ICAM Council) and the International Mineralogical Association (Dr. Sc. Maarten Broekmans, IMA/CAM), Southwest University of Science and Technology, National Natural Science Foundation and other organizations of China, as well as friendly universities, research institutes and organizations in Russia and other countries conducted the 15th International Congress for Applied Mineralogy on the planned dates. Challenging times (pandemic and political risks) were the reason for the failed Congress in Portugal in 2021. This fact motivates the delegates of the present Congress to express the warmest congratulations and wishes to the Chinese team.

On August 20–23, 2023, world known experts and researchers from China, Russia, France, Spain, Japan, Australia and other countries met in the Tianfu, New District of Chengdu (Sichuan Province, China) to discuss the latest research results and development trends in mineralogy and related sciences, as well as international academic and university exchange and cooperation during the 15th International Congress for Applied Mineralogy (<http://icam2023.swust.edu.cn>). The Congress consisted of nine thematic sessions. Session T9 “Applied Clay Mineralogy” was one of the main ones; the remaining sessions were closely related to Clay Mineralogy, for example, session T1 “Ecological and Medical Mineralogy” or session T2 “Industrial Minerals”. The program of the Congress included scientific seminars, exhibitions and field trips. Since the opening of the online system, the congress attracted attention of more than 400 experts and researchers from different countries, but the actual number of participants was 246. 142 abstracts were submitted. 9 plenary and 113 oral talks were presented at 4 sessions and 19 poster presentations.

Field trips, as part of the Congress, included several UNESCO cultural heritage sites in China related to Applied Mineralogy, as well as the evolution of the Huang Long Travertine sedimentary deposits and environmental conservation. Since ancient times, Sichuan Province was the “Heavenly Land of Abundance” and was well known for its distinctive culture and spicy delicacies. As a result, the Conference participants had the opportunity to learn about both natural and man-made wonders in addition to advances in the field of Applied Mineralogy.



гии способствует дальнейшему развитию минералогических и смежных дисциплин, укрепляет международное сотрудничество между минералогами, открывает международные научные горизонты для молодых ученых в области экологической минералогии, минералогии глин, природоподобных материалов и т. д. В заключение следует отметить, что Международный совет конгресса совместно с Международной минералогической ассоциацией объявили конкурс на страну проведения 16-го Международного конгресса по прикладной минералогии. С предложениями можно обращаться в Международный совет конгресса (email: kotova@geo.komisc.ru)

Д. г.-м. н. О. Б. Котова

According to the participants' opinion, the successful holding of the 15th International Congress for Applied Mineralogy contributes to the further development of mineralogical and related disciplines, strengthens international cooperation between applied mineralogists, opens international scientific horizons for young researchers in the field of Environmental Mineralogy, Clay Mineralogy, nature-like materials, etc. In conclusion, it should be noted that the International Congress Council, together with the International Mineralogical Association, announced a competition for the country to host the 16th International Congress for Applied Mineralogy. Suggestions can be submitted to the International Congress Council by email kotova@geo.komisc.ru.

Dr. Sc. O. B. Kotova



Проект РФ-NSFC: рабочий семинар в Юго-Западном университете науки и технологий (Мяньян) и полевой выезд на рудник Баймулин-Линьхуа (провинция Сычуань)

Рабочий семинар в рамках российско-китайского проекта РФ (№ 21-47-00019) — NSFC (№ 42061134018) «Межфазные взаимодействия и механизмы формирования нанопаз природного аморфного углерода и минералов алюмосиликатов и их использование для создания природоподобных нанокомпозитов» был организован с первого же года осуществления проекта, и в этом году впервые был проведен в очном формате 24–25 августа в городе Мяньян (Китай) на базе Юго-Западного университета науки и технологий (ЮЗУНТ), одного из крупнейших вузов страны. В ходе семинара традиционно обсуждали полученные в ходе выполнения проекта результаты, планы исследований на следующий год и содействие китайско-российскому обмену и сотрудничеству по проблемам прикладной минералогии, включая глинистые минералы и материалы на основе углерода. Предыдущие рабочие семинары (в 2021-м и 2022-м годах) проводились в формате видеоконференций, так как пандемийные ограничения, особенно строго соблюдавшиеся в Китае, не давали возможности встретиться очно. В Мяньян наша команда в составе руководителя проекта с российской стороны д. г.-м. н. Е. А. Голубева, участников проекта

RSF-NSFC project: workshop at the Southwest University of Science and Technology (Mianyang) and field trip to the Baimulin-Linhua mine (Sichuan province)

A workshop within the framework of the Russian-Chinese project RSF (No. 21-47-00019) – NSFC (No. 42061134018) “Interphase interactions and mechanisms of formation of nanophases of natural amorphous carbon and aluminosilicate minerals and their use to create nature-like nanocomposites” was held on August 24–25 in Mianyang (China) on the basis of the Southwest University of Science and Technology (SWUST). The seminar consisted of a scientific part, in which more than forty researchers, postgraduates and students from Russia and China participated, and nine talks were presented, a reference visit to the University Center for Analytical and Measurement Equipment, as well as a field trip to the Baimulin-Linhua oil pitch field in Sichuan Province with sampling.



Семинар в конференционном зале факультета окружающей среды и ресурсов Юго-Западного университета науки и технологий, Мяньян

Seminar at the conference hall of the Faculty of Environment and Resources, Southwest University of Science and Technology, Mianyang

д. г.-м. н. О. Б. Котовой, к. г.-м. н. Е. Л. Котовой и младшего научного сотрудника А. В. Понарядова, а также к. г.-м. н. Ю. В. Голубевой приехала из города Чэнду, где мы принимали участие в 15-м Международном конгрессе по прикладной минералогии. На этот раз семинар включил в себя не только научную сессию и обсуждение текущего проекта, но и полевой выезд. В первой части семинара в ходе почти двухчасового общения с научно-педагогическим составом и партийными работниками факультета окружающей среды и ресурсов ЮЗУНиТ были затронуты разные аспекты российско-китайского научного сотрудничества. Далее в конференционном зале факультета окружающей среды и ресурсов началась научная часть семинара, в ходе которой было заслушано девять докладов. В первой секции прозвучали выступления российских участников, председателем секции был заместитель декана факультета окружающей среды ЮЗУНиТ профессор Шийонг Сун, руководитель китайской команды проекта. Во второй были представлены доклады китайских участников, а вел секцию д. г.-м. н. Е. А. Голубев.

С китайской стороны в семинаре приняли участие более сорока человек, как научные сотрудники, так и большое количество студентов и аспирантов, представлявших ЮЗУНиТ, Ксичанский политехнический университет и Мяньянский педагогический университет. Нас немного удивило такое большое количество студентов в каникулярное время. Оказалось, из-за высокой конкуренции практически все студенты остаются летом в стенах своего вуза для дополнительных занятий и участия в подобных мероприятиях.

С российской стороны прозвучали следующие доклады участников проекта РНФ: Е. А. Голубев «Influence carbon-mineral interaction in carbonaceous rocks on structure and properties of carbon-contain materials», О. Б. Котова «Advanced Bauxite Minerals with Improved Characteristics», Е. Л. Котова «Non-combustible mineral phases in the flotation waste of the Krasnobrodskaya-Kokskvaya coal preparation plant: illite-smectite mixed-layer minerals, siderite, quartz and others», А. В. Понарядов «Thermodynamics and synthesis of mullite matrix with improved characteristics». Для ознакомления китайских ученых и студентов с направлениями деятельности лаборатории геологии кайнозоя ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН свой доклад «Clay mineral composition of the Quaternary sediments and environmental conditions during Interglacial periods in the far north of the Russian Plain» о минералогических исследованиях, проводимых в лаборатории, сделала ее руководитель Ю. В. Голубева. Список докладов китайской группы: Шийонг Сун, Рю Лу «Construction of natural-like organophyllosilicate nanozymes for the environmental applications»; Минг Го «Effects of γ -ray irradiation on far-infrared emissivity properties of tourmaline»; Шукван Чен «Preparation and characterization of asphalt-based carbon materials»; Женьзэй Ли «Preparation and Cr6+ adsorption performance of Fe-ZSM-5/shungite adsorbents».

В своих докладах профессор Шийонг Сун и аспирантка Рю Лу рассказали о синтезированном ими новом нанозиме. Доклады были разделены на экспериментальную (Шийонг Сун) и практическую (Рю Лу) части. Органофиллосиликаты представляют собой группу органически модифицированных филлосиликатов, полученных присоединением органических соедине-



Доклад к. г.-м. н. Ю. В. Голубевой
Report by Cand. Sc. (geol.-min.) Yu. V. Golubeva

ний к природным глинистым минералам. Слоистая структура и поверхностные свойства позволяют широко использовать такие материалы как адсорбенты. На основе природного филлосиликата авторами был синтезирован аминопропил-функционализированный медьсодержащий органофиллосиликат (АСР) с упорядоченной двумерной слоистой структурой. Материал оказался новым нанозимом, имитирующим лакказу, с более высокой стабильностью в широком диапазоне pH, температуры и солености, чем натуральная лакказа, и который можно использовать для охраны окружающей среды. АСР достиг почти 100%-ной эффективности удаления токсичного водного гидрохинона в течение 30 минут, что намного выше, чем у натуральной лакказы. Разработанный авторами быстрый и недорогой процесс открывает новые возможности для проектирования природных каталитических систем, содержащих филлосиликаты.

Доклад Е. А. Голубева был посвящен исследованию влияния поверхности различных минералов (включений) на структуру, элементный и фазовый состав прилегающих слоев углерода в содержащих разупорядоченный углерод породах (шунгитах и антраксолитах) по данным STEM/EDS и электронной дифракции. Между поверхностью минеральных включений и разупорядоченной углеродной матрицей были проанализированы: а) переходные области углерода с высокой степенью графитоподобного упорядочения и протяженностью по нормали до 30 нм и б) области, где упорядоченный углерод имеет увеличенное межплоскостное расстояние в сравнении с графитовым (вплоть до 0.5 нм). Если поверхность минерала имеет существенные перепады рельефа, то переходные упорядоченные области отсутствуют. Такое упорядочение углерода на минеральных поверхностях способно влиять на физические свойства шунгитовых пород. Например, значительно увеличивается локальная проводимость, что позволяет даже низкоуглеродистым шунгитовым породам показывать хорошую проводимость и экранировать микроволновое излучение. Оптические свойства также изменяются, например, значительно усиливается сигнал рамановского рассеяния на наноразмерных упорядоченных пленках графита.

Очный формат имеет преимущества перед видеоконференциями возможностью неформального обще-



Дорога к руднику
Road to the mine



Поверхностные выходы битумосодержащих пород
на участке Линьхуа
Bitumen rocks exposures at the Linhua site

ния, обсуждения текущих дел и дальнейших планов, что мы и использовали в полной мере.

После окончания научной части семинара мы посетили университетский Центр аналитического и измерительного оборудования, располагающийся в отдельном здании. В этом центре собрано в основном оборудование фирм Карл Цейс и Шимадзу. В наличии стандартный для минералогических аналитических центров набор из сканирующих электронных микроскопов с энергодисперсионными приставками, рентгеновских дифрактометров, большого разнообразия спектрометров (рентгеновских, инфракрасных, комбинационного рассеяния), разнообразное оборудование для гранулометрического анализа и подготовки образцов, а также высокоразрешающий просвечивающий электронный микроскоп фирмы Jeol. Оборудование в этом центре обновляется планово каждые десять лет, и уже скоро сотрудники рассчитывают получить новые приборы.

На следующий день состоялся полевой выезд на месторождение нефтяного пека. С этим материалом связаны как часть текущих исследований, отраженных в докладе Шукван Чена «Preparation and characterization of asphalt-based carbon materials», так и дальней-



Отбор образцов нефтяных пеков в кернохранилище
компании Guangyuan Shengtong Mining Co
Sampling of oil pitches in the core storage facility of Guangyuan Shengtong Mining Co

шие планы наших групп. Месторождение находится в провинции Сычуань, а ближайшим к нему городом (расстояние около 40 км) является Гуанъюань. Несмотря на то, что с ночи постоянно шел дождь и поездка не раз ставилась под сомнение, мы все-таки рискнули и отправились в путь. Собственно месторождение имеет несколько выходов нефтяных пеков (китайцы называют их асфальтом), и их добыча ведется крупной горнорудной компанией Guangyuan Shengtong Mining Co на двух рудниках – Баймулин и Линьхуа. Нас повезли на рудник Линьхуа как наиболее доступный. Незабываемое впечатление произвела горная дорога – узкая полоса асфальта, отсутствие ограждений, обрыв с одной стороны и стена с другой. Все это под непрерывным дождем, периодически переходящим из моросящего в проливной, и с текущими по асфальту и грунтовым участкам дороги потоками воды. В некоторые повороты, особенно ближе к вершине горы, на которой располагался рудник (а это высота около двух километров над уровнем моря), наш автобус вписывался только с нескольких попыток. В результате, к сожалению, до самого рудника на вершине горы нам добраться не удалось, так как продолжать поездку в такую погоду было уже слишком опасно, как и бродить по мокрым скалам, зато мы посмотрели характерные выходы пека в породах возле рудника. Затем мы побывали в богатейшем кернохранилище горнорудной компании, где собрали большую коллекцию пеков, различающихся как содержанием углерода, так и условиями формирования и свойствами. Нефтяные пеки широко используются в строительстве, изготовлении композиционных, в том числе высокотехнологичных, материалов, а пеки из проявлений Баймулин и Линьхуа относятся к числу лучших в Китае по содержанию высокоразстворимых асфальтенов, и их изучение и оценки потенциала применения находятся в начальной стадии.

Обратный путь по горной дороге прошел значительно веселее, так как вниз с горы ехать было гораздо быстрее и проще, чем в гору. На этом наш рабочий семинар подошел к концу, и мы вернулись в гостиницу, чтобы готовиться к следующей поездке, в Национальный историко-геологический парк Цзяньмэн Шуао.

Д. г.-м. н. Е. А. Голубев



Полевая экскурсия в Национальный парк Цзяньмэнь

Полевая экскурсия для участников конгресса была организована в Национальный парк Цзяньмэнь Шудào (Jianmen Shudao National Park), который представляет собой историко-ландшафтный комплекс с уникальной экосистемой и считается культурным и природным наследием Китая. Парк расположен примерно в 40 км к юго-западу от г. Гуанъюань (Guangyuan) на месте системы древних горных дорог общей длиной более 100 км «шудào» (shudao) между провинциями Шэньси и Сычуань (Shaanxi Province and Sichuan Province), действующей с IV в. до нашей эры. Основными достопримечательностями довольно обширного парка являются перевал Цзяньмэнь (Jianmen Pass), Старая дощатая дорога (the Old Plank Road), храм Хуанцзы (Huangze Temple), Утес Тысячи Будд (the Thousand-Buddha Cliff), Мемориальный зал Ли Бо (Li Bai Memorial Hall) и гора Дочуэй (Mount Douchui).

На территории парка произрастают охраняемые государством субтропические муссонные леса, в составе которых наряду с хвойными и вечнозелеными широколиственными древесными породами, бамбуковыми зарослями, разнообразными лианами есть реликтовые древесные породы, в том числе эндемичные, то есть произрастающие только в Китае, — гинкго (мезозойский эндемик), кипарис, камфорный лавр и др.

Стоимость экскурсии составляет 105—150 юаней (1200—2250 рублей), но у посетителей есть возможность сэкономить и пройти бесплатно: для этого при входе нужно рассказать наизусть самую длинную поэму древнекитайского поэта Ли Бо.

На территории парка есть несколько хорошо оборудованных маршрутов. Выбор нашей делегации пал на маршрут по одной из так называемых древних дорог времен Трех Царств длиной около 3 км, проложенный по многочисленным дощатым тропам и подвесным мостам над ущельями через геологический музей под открытым небом Цзяньмэнь и ключевой объект парка — перевал и заставу Цзяньмэнь (перевал Ворота Меча).

Геологический музей под открытым небом Цзяньмэнь (Geological museum Jianmen). Главным объектом музея считается зона разломов горной системы Лунмэньшань (Longmen Shan fault zone) на границе между блоком Баян-Кола (Bayan Kola block) на Тибетском плато и Южно-Китайским блоком в пределах Евразийской плиты,

Field trip

to Jiangmen National Park

The researchers from the Institute of geology FRC Komi SC UB RAS took part in a field trip to Jiangmen National Park on August 24, 2024, during the 15th International Congress for Applied Mineralogy (Chengdu, Sichuan Province, China). This event was very educational for us, because apart from historical and landscape objects there was the Jiangmen Open Air Geological Museum — the cultural and natural heritage of China. The Congress participants had the opportunity to observe a famous fault zone of the Longmen Shan mountain system characterized by a very high seismicity, rocky outcrops composed of red sandstones and argillites with layers of various thicknesses, conglomerates formed from the Triassic to the Neogene inclusive, as well as the *kurum* formation typical of mountainous regions.

а поднятие гор Лунмэньшань является результатом вертикального сдвига вдоль нее. Историческими сейсмическими записями с 638 г. н. э. зарегистрированы 123 землетрясения на протяжении 400 лет. В приразломной области сохраняется очень высокая сейсмичность до настоящего времени: с разломами связаны несколько катастрофических событий, произошедших в провинции Сычуань в 2008 (Вэньчуаньское землетрясение — Wenchuan earthquake), 2013 (Яньское землетрясение — Ya'an earthquake и 2022 (Лушаньское землетрясение — Lushan earthquake) годах, наиболее сильным и разрушительным из которых было восьмибальное землетрясение Вэньчуань в 2008 г. (Dong Jia et al., 2006). Значительная интенсивность сотрясений определяется геологической обстановкой этого района. Лунмэньшань представляют собой средневысокие горы с неравномерной высотой хребтов от 700 до 5000 м и глубокими впадинами, к которым приурочены истоки притоков верхнего течения р. Янцзы. Скальные выходы в районе наших наблюдений, а именно между разломами Гуансянь-Аньсянь и Гуанъюань-Дай (Guanxian-Anxian and Guangyuan-Dai faults), сложены красноцветными песчаниками и аргиллитами с различной мощностью слоев, конгломератами, сформированными начиная с триаса до неогена включительно. Местные жители подкладывают к основаниям огромных глыб конгломератов ветки, выражая тем самым свое преклонение перед камнями, яв-



Застава Цзяньмэнь / Jianmen Pass



Красноцветные конгломераты / Red conglomerates



ляющими собой энергию Неба и Земли. В строении литолого-стратиграфического разреза горной системы также присутствуют рыхлые четвертичные аллювиальные осадки. Для района характерно курумообразование: русла рек загромождены скоплениями остроугольных глыб размером около 2—3 м — курумами. По характеристике тектонических деформаций и типу разломов район относится к деформационной тектонической зоне с рядом антиклиналей и синклиналей, образующих асимметричные, кулисообразно расположенные концентрические складки (Li et al., 2009). Обращает на себя внимание красный цвет почв, унаследованный от материнских пород. Почвы отличаются высоким содержанием железа и повышенной кислотностью. В их глинистой фракции обычно преобладают иллит, вермикулит, хлорит и монтмориллонит с небольшим количеством кварца, с каолинитом или без него, в зависимости от состава исходных красноцветных пород. Таким образом, зона разломов на границе горной складчатой области, сложенной триасовыми отложениями, и Сычуаньской синеклизы Южно-Китайской платформы представляет собой не только зону сейсмической активности, но и сейсмогенерирующую систему, способствующую постоянным землетрясениям (Цзяо Лю, Короновский, 2016).

Парк украшают скульптуры поэта Ли Бо, древнекитайских руководителей — мандаринов и воинов, выполненные из местного песчаника. Кстати, именно здесь Ли Бо проводил много времени за написанием своих поэтических этюдов. А известного каллиграфиста местные горы, сочные цвета растительности вдохновили на создание четырех новых иероглифов.

Перевал и застава Цзяньмэнь представляет собой традиционное оборонительное сооружение с воротами и изогнутой крышей, расположенное на пути к сто-

лице того времени городу Чанъань (city of Chang'an). Ворота заставы были построены в средней части горы Дацзянь (Dajian Mountain), служили выгодной позицией во время военных действий вплоть до Второй мировой войны. Позднее перевал Цзяньмэнь утратил свою военную ценность, но стал ключевой туристической достопримечательностью нацпарка. О прочности и надежности сооружения Ли Бо написал такие строки: «Защитнику крепости сей одному по силам сдерживать нападающих тьму». Однако сооружение, воздвигнутое во времена династии Мин (1800 лет назад), неоднократно подвергалось разрушению, например в результате строительства дороги в 1980 г., пожара в 2005 г., землетрясения в 2008 г., и последующему восстановлению. Современная конструкция была возведена в 2009 г.

Литература / References

Цзяо Лю, Короновский Н. В. Геологическая обстановка в районе Вэньчуаньского катастрофического землетрясения 12 мая 2008 г. (Лунмэньшань, Западный Китай) // Вестн. Моск. ун-та. 2016. № 6. С. 37—45.

Jiao Liu, Koronovsky N. V. Geological structure in the Wenchuan earthquake on 12 of May 2008 (Longmen Shan, in the West of China). Vestnik of Moscow State University, 2016, No. 6, pp. 37—45. (in Russian)

Dong Jia, Guoqi Wei, Zhuxin Chen, Benliang Li, Qing Zeng, Guang Yang Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration // AAPG Bulletin. 2006. V. 90. № 9. pp. 1425—1447.

Li Yong, Huang R.Q., Zhou R.J. et al. Geological background of Longmen shan seismic belt and surface ruptures in Wenchuan earthquake // J. Engineering Geology. 2009. V. 17. № 1. pp. 3—16.

К. г.-м. н. Ю. В. Голубева



Славный путь геолога-нефтяника (к 70-летию Н. А. Малышева)

Glorious path of a petroleum geologist (N. A. Malyshev's 70th anniversary)

On October 8, 2023, Doctor of geological and mineralogical sciences, Honored Scientist of the Russian Federation Nikolay Aleksandrovich Malyshev turned 70. He is one of the leading national experts in the field of regional geology and geology of oil and gas deposits, assessment of new directions for the development of the hydrocarbon resource base in various regions of the Russian Federation.

8 октября 2023 г. исполнилось 70 лет доктору геолого-минералогических наук, заслуженному деятелю науки РФ **Николаю Александровичу Малышеву** — одному из ведущих специалистов страны в области региональной геологии и геологии месторождений нефти и газа, оценки новых направлений развития ресурсной базы углеводородного сырья в различных регионах РФ.

Н. А. Малышев родился в 1953 г. в семье нефтяников в Татарстане, в 1975 г. окончил геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова по специальности «геология, поиски и разведка нефтяных и газовых ме-

сторождений». 28 лет проработал в Институте геологии Коми научного центра УрО РАН (Сыктывкар), где прошел путь от старшего лаборанта до заведующего отделом геологии горючих ископаемых, входил в состав Президиума Коми научного центра РАН. В 1982 г. защитил кандидатскую, а в 2000 г. — докторскую диссертации. В этот же период в рамках кратковременно-го прикомандирования работал экспертом и консультантом по геологии и нефтегазовости осадочных бассейнов севера России в ряде зарубежных нефтяных компаний «Тоталь», «Норск-Гидро», «Оксидентал» и «Филлипс Петролеум».



Безусловно, годы работы в Институте геологии были для Н. А. Малышева наиболее плодотворными в научном плане. Здесь он стал опытным и широко известным специалистом в области тектоники и нефтегазоносности осадочных бассейнов Европейского Северо-Востока России, приобрёл навыки руководства научными коллективами. Всё это затем пригодилось ему в работе на другом, уже производственном корпоративном уровне.

В апреле 2004 г. Н. А. Малышев был приглашен на работу в компанию «Роснефть» на должность начальника отдела развития ресурсной базы инжинирингового центра ОАО «НК «Роснефть». С 2005 г. Н. А. Малышев — главный геолог Корпоративного научно-технического центра (Департамента по науке), с февраля 2011 г. и по настоящее время — заместитель директора Департамента геолого-разведочных работ ПАО «НК «Роснефть».

На новом месте работы раскрылись новые черты научного и организационного таланта Н. А. Малышева, он продолжил активно и весьма плодотворно заниматься наукой, добился существенных успехов, высоко оцененных общественностью. В поле его профессиональных интересов — геология, геодинамика и нефтегазоносность осадочных бассейнов, выбор новых перспективных направлений геолого-разведочных работ для расширения ресурсной базы углеводородного сырья, разработка рекомендаций по лицензированию новых участков, научное сопровождение программ поисково-разведочных работ на этих участках.

С 2007 г. Н. А. Малышев отвечал в компании за организацию, управление и научно-методологическое сопровождение работ по изучению шельфов арктических морей и акваторий южных морей и Дальнего Востока. В их пределах были выделены наиболее перспективные направления, области и зоны, оценен их ресурсный потенциал. При непосредственном участии Н. А. Малышева на этих участках после получения лицензий реализуются программы геолого-разведочных работ, включающие также и научные исследования. Их результатами являются одна из наиболее полных среди российских и зарубежных компаний база сейсмических и буровых данных по Арктическому региону России, открытые в Арктике на участках компании крупнейшие месторождения нефти и газа («Победа», им. маршалов Жукова и Рокоссовского в Карском море, Северо-Ольгинское в Хатангском заливе моря Лаптевых и Мадачагское на Печорском шельфе).

В последние годы под руководством Н. А. Малышева проводятся региональные геологические исследования осадочных бассейнов суши на территориях деятельности дочерних обществ компании «Роснефть». При его активном участии реализуется серия целевых

инновационных проектов. Н. А. Малышев является одним из основных авторов научно-технической идеи по разработке инновационной технологии, важнейшей составляющей которой является бурение мало-глубинных стратиграфических скважин в пределах неизученных глубоким параметрическим и поисковым бурением акваторий севера Карского моря и морей Восточной Арктики. К настоящему времени здесь получен уникальный керновый материал из двух десятков пробуренных скважин, позволивший вместе с данными интерпретации сейсмических материалов существенно обновить и создать более обоснованную модель геологического строения и эволюции Арктического региона, включая геохронологические и геодинамические связи структур Арктического шельфа РФ с глубоководными образованиями океана. В настоящее время Н. А. Малышев возглавляет рабочую группу специалистов компании «Роснефть» в рамках взаимодействия с Федеральным агентством по недропользованию (Роснедра) по экспертизе и разработке предложений по дальнейшему геологическому изучению суши и акватории РФ, а также обоснованию внешней границы Арктического континентального шельфа.

Н. А. Малышев является автором и соавтором более 350 научных работ, в том числе 20 монографий и брошюр, членом редколлегий ряда журналов, диссертационного совета геологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова. В течение ряда лет в качестве эксперта он входит в состав Комиссии Отделения наук о Земле Российской академии наук по присуждению премии им. И. М. Губкина. Н. А. Малышев щедро делится своими знаниями и опытом с молодежью. В рамках взаимодействия с крупнейшими вузами страны при его участии осуществляется отбор студентов и магистрантов для их стажировки и последующего направления на работу в дочерние общества и институты компании. Много времени Николай Александрович уделяет становлению и творческому развитию молодых сотрудников непосредственно в компании. Под его руководством около десятка сотрудников защитили кандидатские диссертации, а также готовят докторские.

В Институте геологии продолжают радоваться достижениям Н. А. Малышева. Считают, что они в значительной степени были предопределены его многолетней работой в нашем институте. Мы помним его активную работу в ученом и диссертационном советах института, в редколлегии «Вестника геонаук». Сохраняются тесные связи с друзьями и коллегами. Многие из его учеников стали известными специалистами.

В связи с юбилеем желаем Николаю Александровичу новых свершений, успешной реализации актуальных проектов, здоровья, сохранения свойственного ему спортивного азарта на долгие годы.

Редколлегия

Редакторы издательства:

О. В. Габова, Г. Н. Каблис, К. В. Ордин (английский)

Компьютерная верстка

Т. В. Хазовой

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 30.11.2023. Формат бумаги 60 × 84 ¹/₈. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1213. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

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

На обложке использованы фото А. Перетягина, Р. Шайбекова, С. Исаенко, Н. Уляшевой, Ю. Голубевой