

ISSN 1994-5655

3 (69) • 2024

# ИЗВЕСТИЯ

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

[www.izvestia.komisc.ru](http://www.izvestia.komisc.ru)



Серия  
«Науки о Земле»



Научный журнал  
Основан в 2010 г.  
Выходит девять раз в год

Учредитель  
Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Коми научный центр УрО РАН»

# ИЗВЕСТИЯ

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА  
УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 3 (69)

Серия «НАУКИ О ЗЕМЛЕ»

2024

**Главный редактор** – акад. РАН А. М. Асхабов  
**Зам. главного редактора** – чл.-корр. РАН С. В. Дёгтева  
**Зам. главного редактора** – чл.-корр. РАН В. Н. Лаженцев  
**Ответственный секретарь** – к.и.н. Д. В. Милохин

## Редакционный совет:

акад. РАН В. В. Алексеев, акад. РАН А. А. Барях, акад. РАН В. И. Бердышев, д.м.н. Е. Р. Бойко, чл.-корр. РАН И. Н. Болотов, акад. РАН В. Н. Большаков, Ph. D. (Econ.) К. Борисова-Маринова (Болгария), д.ф.-м.н. Т. М. Бречко (Польша), к.г.-м.н. И. Н. Бурцев, акад. РАН А. Д. Гвишиани, д.ф.-м.н. Н. А. Громов, д.и.н. И. Л. Жеребцов, д.б.н. В. Г. Зайнуллин, чл.-корр. РАН В. А. Ильин, акад. РАН С. В. Кривовичев, И. В. Курляк, акад. РАН А. В. Кучин, чл.-корр. РАН Ю. Б. Марин, акад. РАН В. П. Матвеевко, д.и.н. В. И. Меньковский (Беларусь), акад. РАН Г. А. Месяц, чл.-корр. РАН А. А. Москалев, д.э.н. Л. А. Попова, чл.-корр. РАН В. Н. Пучков, д.г.-м.н. А. М. Пыстин, чл.-корр. РАН И. М. Рощевская, акад. РАН М. П. Рощевский, д.х.н. С. А. Рубцова, д.и.н. Э. А. Савельева, д.и.н. Т. С. Садыков (Казахстан), чл.-корр. РАН А. Ф. Титов, д.б.н. С. Н. Харин, к.б.н. И. Ф. Чадин, акад. РАН В. Н. Чарушин, д.т.н. Ю. Я. Чукреев, д.б.н. Е. В. Шамрикова, акад. РАН В. С. Шацкий, д.э.н. А. Г. Шеломенцев, к.э.н. А. А. Юдин

## Редакционная коллегия серии «Науки о Земле»:

д.г.-м.н. А. М. Пыстин (ответственный редактор), д.г.-м.н. Н. С. Бурдельная (ответственный секретарь), д.г.-м.н. В. Л. Андреичев, д.г.-м.н. Л. Н. Андреичева, д.г.-м.н. А. И. Антошкина, к.г.-м.н. Е. В. Антропова, д.г.-м.н. Т. М. Безносова, к.г.-м.н. И. Н. Бурцев, д.г.-м.н. Д. А. Бушнев, акад. РАН Л. А. Вайсберг, к.геогр.н. Т. Е. Дмитриева, д.г.-м.н. В. А. Жемчугова, к.г.-м.н. А. В. Журавлев, д.г.-м.н. С. Г. Ковалев, д.т.н. С. А. Кондратьев, д.г.-м.н. О. Б. Котова, д.г.-м.н. Н. Б. Кузнецов, д.г.-м.н. С. К. Кузнецов, чл.-корр. РАН В. Н. Лаженцев, д.г.-м.н. Н. А. Малышев, д.г.-м.н. В. В. Мурзин, д.г.-м.н. Н. Ю. Никулова, д.геогр.н. Г. Г. Осадчая, д.г.-м.н. О. М. Прищеп, д.г.-м.н. В. И. Ракин, д.т.н. В. И. Ростовцев, к.г.-м.н. В. А. Салдин, д.г.-м.н. С. А. Светов, к.г.-м.н. А. А. Соболева, к.г.-м.н. Н. Н. Тимонина, к.г.-м.н. В. В. Удоратин, д.г.-м.н. Т. Г. Шумилова, д.г.-м.н. В. В. Щипцов, prof. E. Ciftic (Стамбул, Турция), prof. P. Mannik (Таллин, Эстония)

## Адрес редакции:

167982, ГСП-2, Республика Коми, г. Сыктывкар,  
ул. Коммунистическая, д. 24  
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, каб. 317, 318.  
Тел. (8212) 24-47-79  
E-mail: journal@frc.komisc.ru  
www.izvestia.komisc.ru

## ISSN 1994-5655

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору  
за соблюдением законодательства в сфере массовых  
коммуникаций и охране культурного наследия.

Свид. о регистрации средств массовой информации  
ПИ № ФС 77- 26969 от 11 января 2007 г.

Подписной индекс в каталоге «Почта России» 52047

Журнал включен в перечень рецензируемых научных изданий ВАК

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр  
«Коми научный центр УрО РАН», 2024

Science Journal  
Founded in 2010  
Published 9 times a year

Established by  
Federal State Budgetary  
Institution of Science  
Federal Research Centre  
«Komi Science Centre, Ural Branch, RAS»

# PROCEEDINGS

OF THE KOMI SCIENCE CENTRE  
URAL BRANCH  
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**№ 3 (69)**

**«EARTH SCIENCES» series**

**2024**

**Editor-in-chief** – RAS acad. A. M. Askhabov

**Deputy editor-in-chief** – RAS corresp. member S. V. Degteva

**Deputy editor-in-chief** – RAS corresp. member V. N. Lazhentsev

**Executive Secretary** – Cand. Sci. (Hist.) D. V. Milokhin

## Editorial Council:

RAS acad. V. V. Alekseev, RAS acad. A. A. Baryakh, RAS acad. V. I. Berdyshev, Dr. Sci. (Med.) E. R. Bojko,  
RAS corresp. member I. N. Bolotov, RAS acad. V. N. Bolshakov, PhD. (Econ.) K. Borisova-Marinova (Bulgaria),  
Dr. Sci. (Phys.-Math.) T. M. Brechko (Poland), Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) I. N. Burtsev, RAS acad. A. D. Gvishiani,  
Dr. Sci. (Phys.-Math.) N. A. Gromov, Dr. Sci. (Hist.) I. L. Zherebtsov, Dr. Sci. (Biol.) V. G. Zainullin,  
RAS corresp. member V. A. Ilyin, RAS acad. S. V. Krivovichev, I. V. Kurlyak, RAS acad. A. V. Kuchin,  
RAS corresp. member Yu. B. Marin, RAS acad. V. P. Matveenko, Dr. Sci. (Hist.) V. I. Men'kovsky (Belarus),  
RAS acad. G. A. Mesyats, RAS corresp. member A. A. Moskalev, Dr. Sci. (Econ.) L. A. Popova,  
RAS corresp. member V.N. Puchkov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) A. M. Pystin,  
RAS corresp. member I. M. Roshchevskaya, RAS acad. M. P. Roshchevsky, Dr. Sci. (Chem.) S. A. Rubtsova,  
Dr. Sci. (Hist.) E. A. Savel'yeva, Dr. Sci. (Hist.) T. S. Sadykov (Kazakhstan), RAS corresp. member A. F. Titov,  
Dr. Sci. (Biol.) S. N. Kharin, Cand. Sci. (Biol.) I. F. Chadin, RAS acad. V. N. Charushin,  
Dr. Sci. (Tech.) Yu. Ya. Chukreev, Dr. Sci. (Biol.) E. V. Shamrikova, RAS acad. V. S. Shatsky,  
Dr. Sci. (Econ.) A. G. Shelomentsev, Cand. Sci. (Econ.) A. A. Yudin

## Editorial Board of the series «Earth Sciences»:

Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) A. M. Pystin (Executive editor), Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) N. S. Burdel'naya (Executive secretary),  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) V. L. Andreichev, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) L. N. Andreicheva,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) A. I. Antoshkina, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) E. V. Antropova,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) T. M. Beznosova, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) I. N. Burtsev,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) D. A. Bushnev, RAS acad. L. A. Vaisberg, Cand. Sci. (Geogr.) T. E. Dmitrieva,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) V. A. Zhemchugova, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) A. V. Zhuravlev,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) S. G. Kovalev, Dr. Sci. (Tech.) S. A. Kondratyev, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) O. B. Kotova,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) N. B. Kuznetsov, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) S. K. Kuznetsov,  
RAS corresp. member V. N. Lazhentsev, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) N. A. Malyshev,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) V. V. Murzin, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) N. Yu. Nikulova,  
Dr. Sci. (Geogr.) G. G. Osadchaya, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) O. M. Prishchepa,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) V. I. Rakin, Dr. Sci. (Tech.) V. I. Rostovtsev,  
Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) V. A. Saldin, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) S. A. Svetov,  
Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) A. A. Soboleva, Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) N. N. Timonina,  
Cand. Sci. (Geol.-Mineral.) V. V. Udoratin, Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) T. G. Shumilova,  
Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) V. V. Shchiptsov, Prof. E. Ciftic (Istanbul, Turkey), Prof. P. Mannik (Tallinn, Estonia)

## Editorial Office:

Office 317, 318 Komi Science Centre, Ural Branch, RAS  
24, Kommunisticheskaya st., GSP-2,  
Syktyvkar 167982, Komi Republic  
Tel. +7 8212 244779  
E-mail: journal@frc.komisc.ru  
www.izvestia.komisc.ru

The "Russian Post" catalogue subscription index 52047

*The journal is included in the list of peer-reviewed scientific publications of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation*

© Federal State Budgetary Institution  
of Science Federal Research Centre  
"Komi Science Centre, Ural Branch, RAS", 2024

## ISSN 1994-5655

Registered by the Russian Federal Surveillance Service  
for Compliance with the Law in Mass Communications  
and Cultural Heritage Protection.

The certificate of mass media registration -  
ПИ № ФС 77-26969 dated 11 January, 2007

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Ю. Л. Ронкин, И. С. Чашухин</b> Лерцолитовые массивы Крака (Южный Урал): геохимия, геохронология, генезис, геодинамика .....	5
<b>Ю. В. Денисова</b> Петрология гранитов Кожимского массива (Приполярный Урал).....	18
<b>К. С. Попвасев, И. Л. Потапов</b> Парагнейсы няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты (Приполярный Урал): метаморфизм, минеральные и структурные особенности .....	27
<b>О. В. Удортатина, И. Д. Соболев, А. С. Шуйский</b> Диориты массива «Диоритовый» (Полярный Урал): геохронологические и изотопно-геохимические данные .....	41
<b>А. Н. Евдокимов, А. Юсуфзай, А. М. Мусазаи</b> Внутреннее строение и закономерности распределения минеральных типов редкометалльных пегматитов в долине Дарай Печ (провинция Кунар, Афганистан).....	52
<b>Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов</b> Особенности состава и формирования россыпей алмазов в краевых частях древних кратонов (на примере северо-востока Сибирской платформы) .....	63
<b>О. В. Гракова, Н. Ю. Никулова, В. Б. Хубанов</b> U/Pb-возраст и источники сноса обломочного циркона из верхнерифейских песчаников Немской возвышенности (Южный Тиман) .....	76
<b>Н. В. Конанова, В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова, Ю. Е. Езимова</b> Комплексная интерпретация геофизических данных в районе локальных гравитационных аномалий на севере Волго-Уральской антеклизы.....	87
<b>Н. Н. Носкова</b> Землетрясение 26 декабря 2023 года в Кировско-Кажимском авлакогене .....	98
<b>А. Н. Вихоть, В. А. Лютоеv</b> Взаимосвязь динамики оползневого процесса в долине реки Воркуты и основных климатических параметров.....	106
<b>В. И. Силаев, А. С. Шуйский, И. В. Смолева, С. Н. Шанина, Е. А. Васильев, Д. В. Киселёва, А. Ф. Хазов, Б. А. Макеев, А. Е. Сухарев, А. К. Фокина</b> Предголоценовый таймырский мамонт Петя: минералого-изотопно-геохимические свойства костей, мягких тканей, кожи, волос и палеоэкологические реконструкции.....	116
<b>Е. В. Машина</b> Характеристика холелитов кристаллического строения .....	136
<b>Н. Н. Тимонина, Н. Н. Рябинкина</b> Памяти Н. И. Тимонина, посвятившего свою жизнь геологии .....	145
<b>В. И. Силин</b> Памяти географа-палинолога Евгении Сергеевны Малясовой (к 100-летию со дня рождения).....	152

## CONTENTS

<b>Yu. L. Ronkin, I. S. Chashchukhin</b> The Kraka lherzolite massifs (Southern Urals): geochemistry, geochronology, genesis, geodynamics .....	5
<b>Yu. V. Denisova</b> Petrology of granites of the Kozhim massif (Subpolar Urals) .....	18
<b>K. S. Popvasev, I. L. Potapov</b> Paragneisses of the Nyartinskiy metamorphic complex and the Mankhobeinskaya suite (Subpolar Urals): metamorphism, mineral and structural properties .....	27
<b>O. V. Udoratina, I. D. Sobolev, A. S. Shuyskiy</b> Diorites of the Dioritoviy massif (Polar Urals): geochronological and isotope-geochemical data.....	41
<b>A. N. Evdokimov, A. Yosufzai, A. M. Mosazai</b> Internal structure and patterns of distribution of mineral types of rare metal pegmatites in the Darai Pech valley (Kunar province, Afghanistan) .....	52
<b>N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov</b> Features of the composition and formation of diamond placers in the marginal parts of ancient cratons (on the example of the North-East of the Siberian platform).....	63
<b>O. V. Grakova, N. Yu. Nikulova, V. B. Khubanov</b> U/Pb age and sources of detrital zircon from Upper Riphaeen sandstones of the Nemskaya Upland (South Timan) .....	76
<b>N. V. Konanova, V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova, Yu. E. Ezimova</b> Integrated interpretation of geophysical data in the area of local gravity anomalies in the North of the Volga-Ural anteclise.....	87
<b>N. N. Noskova</b> Earthquake on December 26, 2023 in the Kirov-Kazhim aulacogen.....	98
<b>A. N. Vikhot, V. A. Lyutoev</b> Relationship between the dynamics of landslide process in the Vorkuta River valley and the main climatic parameters.....	106
<b>V. I. Silaev, A. S. Shuyskiy, I. V. Smoleva, S. N. Shanina, E. A. Vasiliev, D. V. Kiseleva, A. F. Khazov, B. A. Makeev, A. E. Sukharev, A. K. Fokina</b> Pre-Holocene Taymyr mammoth Petya: mineralogical-isotope-geochemical properties of bones, soft tissues, skin, hairs and paleoecologic reconstructions .....	116
<b>E. V. Mashina</b> Characteristics of gallstones with crystal structure.....	136
<b>N. N. Timonina, N. N. Ryabinkina</b> To the memory of N. I. Timonin who devoted his life to geology.....	145
<b>V. I. Silin</b> To the memory of the geographer-palynologist Evgenia Sergeevna Malyasova (to her 100th birthday) .....	152

## Лерцолитовые массивы Крака (Южный Урал): геохимия, геохронология, генезис, геодинамика

Ю. Л. Ронкин, И. С. Чашухин

Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург  
y-ronkin@mail.ru  
chashchukhin@igg.uran.ru

### Аннотация

В развитие изучения лерцолитов массива Северный Крака, входящего в состав крупнейшего (более 900 км<sup>2</sup>) лерцолитового аллохтона (сложенного островодужными и океаническими комплексами, надвинутыми с восточного склона Урала на батиальные и шельфовые отложения пассивной континентальной окраины Восточно-Европейской платформы), представлены REE ID-ICP-MS, <sup>86</sup>Sr/<sup>87</sup>Sr и <sup>147</sup>Sm-<sup>143</sup>Nd ID-TIMS результаты, свидетельствующие о плавлении уже истощенного протолита, который можно идентифицировать как мантийный источник с параметрами, подобными MORB. Сравнение имеющихся на сегодня геохимических и геохронологических сигнатур массивов Крака с аналогичными материалами Центральной и Западной Европы дает возможность коррелировать образованные в результате этой фазы складчатости структуры тиманиды с кадомидами, что в конечном итоге на основании глобальных реконструкций континентов для конца протерозоя санкционирует выдвижение гипотезы о существовании кадомского орогена на периферии Гондваны.

### Ключевые слова:

лерцолиты массивов Крака (Южный Урал), REE ID-ICP-MS, Sr-Nd ID-TIMS изотопная систематика, кадомский ороген

### Введение

В соответствии с имеющимися представлениями, лерцолит (lherzolite, Lherzolith, lherzolite, lherzolita), именуемый от названия р. Эр (Hers), или Лер (Lherz), протекающей во французских Пиренеях, является крупнокристаллической глубинной магматической горной породой ультраосновного состава нормального ряда из семейства перидотитов, сложенной оливином (от 40 до 90 % массы породы), ромбическим (10–50 %) и моноклинным (10–50 %) пироксенами, с примесью роговой обманки (до 5 %). Лерцолиты широко распространены по земному шару, в том числе в ассоциации с другими ультраосновными породами в складчатых областях, характеризуя основной компонент литосферы ниже раздела Мохоровичича, в свою очередь

## The Kraka lherzolite massifs (Southern Urals): geochemistry, geochronology, genesis, geodynamics

Yu. L. Ronkin, I. S. Chashchukhin

Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritskiy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg  
y-ronkin@mail.ru  
chashchukhin@igg.uran.ru

### Abstract

The study on lherzolites of the North Kraka massif, which is part of the largest (more than 900 km<sup>2</sup>) lherzolite allochthon (composed of island-arc and oceanic complexes thrust from the eastern slope of the Urals onto bathyal and shelf deposits of the passive continental margin of the East European Platform), contains REE ID-ICP-MS, <sup>86</sup>Sr/<sup>87</sup>Sr and <sup>147</sup>Sm-<sup>143</sup>Nd ID-TIMS results indicating melting of the already depleted protolith, which can be identified as a mantle source with parameters similar to MORB. Comparison of the currently available geochemical and geochronological signatures of the Kraka massifs with the similar materials from Central and Western Europe allows to correlate the structures of Timanides with Cadomids formed as a result of this folding phase, which ultimately, based on global reconstructions of the continents for the end of the Proterozoic, authorize the hypothesis of the Cadomian orogen existence on the periphery of Gondwana.

### Keywords:

lherzolite from the Kraka massif (Southern Urals), REE ID-ICP-MS, Sr-Nd ID-TIMS isotope systematics, Cadomian orogen

маркирующего нижнюю границу земной коры и мантии соответственно. При этом наиболее существенные знания и свидетельства о принадлежности лерцолитов к глубинным зонам подконтинентальной мантии и декомпрессионном перемещении их из области высоких давлений в нижнюю кору были получены при исследованиях детально изученных массивов западного Средиземноморья [1, 2]. Тем не менее многие из типовых особенностей (ассоциация с нижнекоровыми гранулитами, высокотемпературные пластические деформации, присутствие высокотемпературных гранат-пироксеновых обособлений и др.), выявленных при изучении массивов Бени-Бушера (Beni Bouchera, Марокко) и Ронда (Ronda, Испания), обнару-

живаются в лерцолитовых массивах и других орогенных поясов. К этому формационному типу, помимо массивов Лерц (Lherz) и других Северо-Пиренейской зоны, Финеро (Finero) и Ланцо (Lanzo) в Западных Альпах [1, 2], принадлежат гранатовые перидотиты Западного гнейсового региона Норвегии [2].

Что касается Уральского складчатого пояса, то подобными объектами можно считать массивы Крака (рис. 1), расположенные на западном склоне Южного Урала. Первые геологические исследования в пределах массивов проводились в 60-х гг. XIX в. и были направлены на поиски и разработку хромитовых месторождений. Результаты этих работ сохранились фрагментарно. Следующий этап изучения, начавшийся в 1930-х гг. (в результате чего было открыто большинство из известных хромитовых проявлений и месторождений) и продолжающийся до настоящего времени, связан с многочисленным списком имен, а количество публикаций по массивам Крака, к примеру, на сайте elibrary.ru, достигает 1252. Тем не менее возраст, генетическая сторона и геодинамическая позиция массивов до сих пор являются предметом споров и разночтения.

В общепринятых представлениях по комплексу геологических и минералого-геохимических данных образование массивов Крака связывается с верхней мантией либо в рамках континентально-рифтогенной структуры [3], либо пассивной континентальной окраины [4].

Фокусируясь на изученности массивов Крака методами изотопной геологии, которые, как известно, дают возможность получать информацию о возрасте, разнообразных аспектах эволюции нашей планеты, ее ранней аккреции; формировании коры, дифференциации мантии, эволюции системы кора-мантия, генетических аспектах и т.д., следует отметить более чем ограниченный объем этих исследований [5-7], в связи с чем актуальность настоящей работы не вызывает сомнений.

### Геологическое положение и краткое описание строения Кракинского аллохтона и массивов Крака

Согласно имеющимся представлениям [8], Уральский складчатый пояс состоит из нескольких литотектониче-

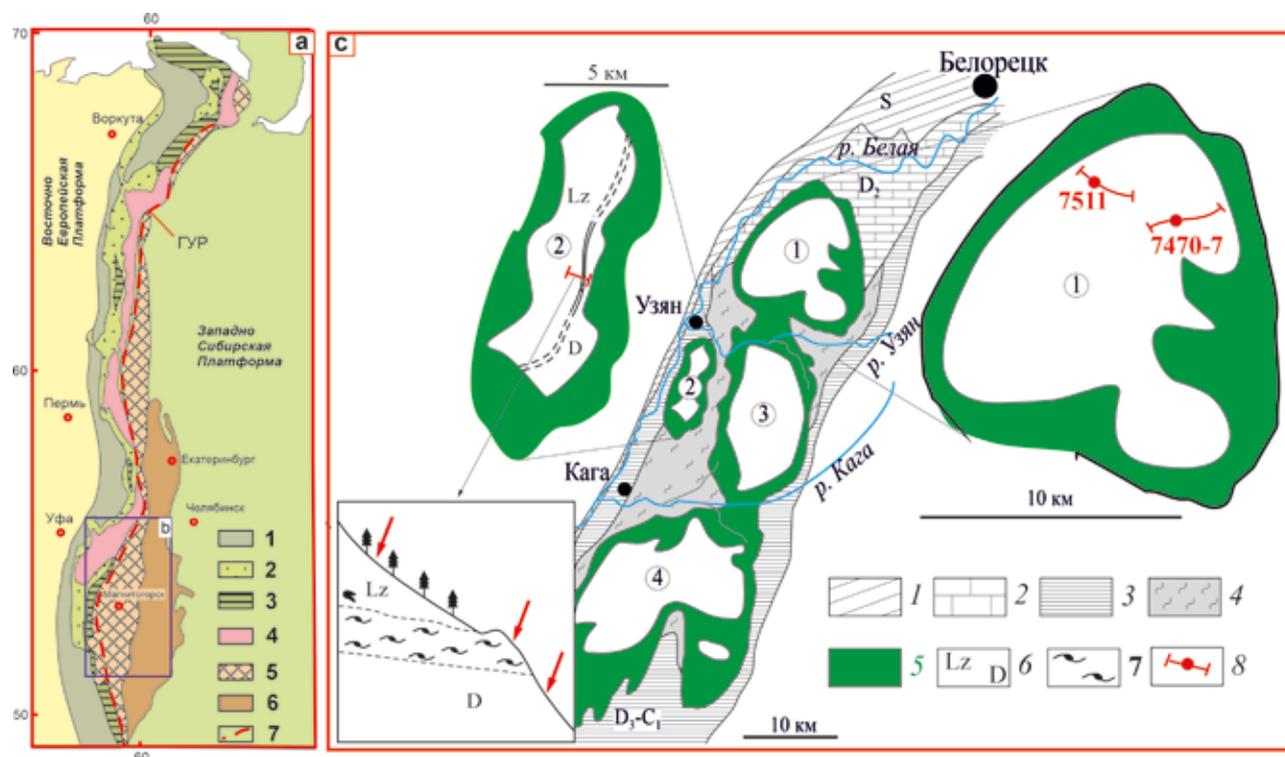


Рисунок 1. Схемы [6, 9] с дополнениями: (а) литотектонических зон Уральского складчатого пояса; (б) локализации объектов; (с) строения Кракинского аллохтона и массивов Крака.

Условные обозначения: а) 1 – Предуральский краевой прогиб; 2 – Западно-Уральские шельфовые отложения; 3 – Западно-Уральские батинальные отложения; 4 – Центрально-Уральская зона; 5 – Тагило-Магнитогорская зона; 6 – Восточно-Уральская зона; 7 – Главный Уральский разлом; 8 – профили мест отбора образцов для датирования U-Pb SHRIMP-II и  $^{147}\text{Sm}-^{144}\text{Nd}$  ID-TIMS методами изотопной геологии. Цифрами в кружках обозначены массивы Кракинской группы: 1 – Северный, 2 – Узыанский, 3 – Средний, 4 – Южный Крака. Стрелками во вставку (левая нижняя часть рисунка) обозначены места отбора проб, из которых были выделены цирконы для U-Pb SHRIMP-II датирования.

Figure 1. Sketch-maps [6, 9] with additions: (a) lithotectonic zones of the Ural fold belt; (b) localization of objects; (c) structure of the Kraka allochthon and the Kraka massifs.

Symbols: a) 1 – Pre-Ural marginal trough; 2 – West-Ural shelf deposits; 3 – West-Ural bathyal deposits; 4 – Central Ural zone; 5 – Tagil-Magnitogorsk zone; 6 – East-Ural zone; 7 – Main Ural fault; 8 – profiles of sampling sites for U-Pb SHRIMP-II and  $^{147}\text{Sm}-^{144}\text{Nd}$  ID-TIMS dating using isotope geology methods. Figures in circles indicate the massifs of the Kraka group: 1 – Northern, 2 – Uzyansky, 3 – Middle, 4 – Southern Kraka. Arrows in the inset (left lower part of the figure) indicate the sampling sites where zircons were extracted for U-Pb SHRIMP-II dating.

ских зон (Предуральский краевой прогиб, Западно-Уральская, Центрально-Уральская, зона Главного Уральского разлома, Тагило-Магнитогорская и Восточно-Уральская), сменяющих друг друга в направлении от восточной окраины Восточно-Европейской платформы до мезозойского осадочного чехла Западно-Сибирской платформы, перекрывающего восточную часть складчатого пояса.

Массивы Северный, Средний и Южный Крака (рис. 1) представляют собой расчлененный аллохтон и расположены в северной, осевой части крупной синформной тектонической структуры (длина ~300 км, ширина до 50 км) – Зилаирского синклинория, который, в свою очередь, на северо-западе граничит с Башкирским антиклинорием, сложенным рифейскими толщами. Южная часть Зилаирского синклинория надвинута на Предуральский краевой прогиб, выполненный позднепалеозойскими отложениями. На востоке Зилаирский синклинорий контактирует с Уралтауским поднятием метаморфических толщ.

Породы, подстилающие ультрамафиты массивов Крака, представлены терригенно-кремнистыми, карбонатными и вулканогенными толщами с возрастным диапазоном ранний карбон–ранний ордовик и относятся к двум фациальным комплексам – шельфовому и батинальному. Массивы разделены и подстилаются серпентинитовым меланжем с блоками преимущественно эффузивов основного состава. Ультрамафиты представлены гарцбургит-шпинель-лерцолитовыми сериями с разным соотношением лерцолитов и гарцбургитов и подчиненными им амфиболовыми и плагиоклазовыми разностями, а также дунитами и пироксенитами, включая гранатсодержащие. Контакты с вмещающими породами тектонические и сложены преимущественно хризотил-лизардитовыми серпентинитами. Структура пород порфирикластическая и представлена порфирикластами ортопироксена (размером до 8 мм), оливина, клинопироксена (в лерцолитах) и хромшпинели (все до 2–3 мм) и окружающим их мелкозернистым (0.п–0.0п мм) агрегатом неомасов этих же минералов и амфибола. Плагиоклаз развит в основном вокруг хромшпинели. Контакты между лерцолитами и гарцбургитами постепенные, свидетельствующие об их принадлежности к единому комплексу с разной степенью частичного плавления.

Существует мнение [3, 4], что на Южном Урале к лерцолитовому типу, помимо Крака, относятся также массивы Нурали и Миндяк [6, 9].

## Материалы и методы

В рамках настоящей работы использовались образцы шпинелевых лерцолитов 7511 и 7470-7, наименее известных из известных на Урале [7], отобранные в северной части массива Северный Крака (рис. 1, с, позиция 2, обрамленная кружком).

Химические и модальные составы (мас. %): **образец 7511.** SiO<sub>2</sub>=46.02; TiO<sub>2</sub>=0.14; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.001; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=3.35; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.47; FeO\*=6.98; MnO=0.12; MgO=40.21; NiO=0.28; CaO=2.71; Na<sub>2</sub>O=0.07; K<sub>2</sub>O=0.01. Минеральный состав: Crx=10; Орх=28; Ол=57. **Образец 7470-7.** SiO<sub>2</sub>=46.23; TiO<sub>2</sub>=0.05; V<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.01; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=2.21; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>=0.45; FeO\*=7.49; MnO=0.12; MgO=41.51; NiO=0.12;

CaO=1.94; Na<sub>2</sub>O=0.02; K<sub>2</sub>O=0.01. Минеральный состав: Crx=8; Орх=32; Ол=60.

Изученные разности сложены шпинелевыми лерцолитами, испытывавшими последовательные этапы высокотемпературных пластических и хрупких деформаций. Первые выражены в форме волнистого погасания оливинов и орто- и клинопироксенов, а также изгиба линий спайности и пластинчатых ламелей распада. Хрупкие деформации привели к формированию ясно представленной порфирикластической структуры. Размеры порфирикластов достигают 3 мм в ортопироксене, 2 мм в клинопироксене и 1.5 мм в хромшпинели. В ходе хрупких деформаций оливин, как наименее устойчивый минерал, дробился сильнее: максимальный размер его порфирикластов не превышает 0.7 мм. Ламели распада в порфирикластах ортопироксена сложены клинопироксеном, в порфирикластах клинопироксена – ортопироксеном.

Необласти являются продуктом дробления и перекристаллизации порфирикластов и представлены тонким агрегатом гранобластовых зерен орто- и клинопироксенов, оливина и хромшпинели без признаков пластических деформаций. Размер зерен неомасов на 1–2 порядка меньше размера порфирикластов, что свидетельствует, вероятно, о высокой скорости хрупких деформаций.

## Пробоподготовка

Образец лерцолита 7470-7 (порода в целом) подвергался стандартной процедуре дробления и пробоподготовки для аналитических процедур.

Для пробы 7511 измельченный препарат просеивали через сита 350 и 250 мкм для предварительного выделения Орх, а также Crx, после чего соответствующие концентраты чистили ультразвуком в тридистиллированной воде. После магнитной сепарации минеральные зерна Орх и Crx отбирали вручную с помощью бинокулярного микроскопа. Далее каждая из монофракций была разделена на две части: первая, а также порода, была последовательно подвергнута кислотному выщелачиванию (Acid Leaching, AL) с помощью кислот: 5М HCl при температуре 125 °С в течение ~8 ч, далее в горячей (100 °С) 7М HNO<sub>3</sub> для растворения осадка, и, наконец, на финише осуществляли промывку тридистиллированной водой. Вторая часть минералов и породы не подвергалась воздействию кислотами.

Весовые соотношения в результате пробоподготовки образца лерцолита 7511 приведены в табл. 1. Более подробные сведения об AL процедурах, примененных в том числе для лерцолитов массива Ронда (Испания), можно обнаружить в статье [10].

## Аналитические процедуры

Определение содержаний REE в лерцолите выполнялось масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления (ID) с применением кислотного разложения смеси исходного образца со смешанным трассером <sup>138</sup>La+<sup>142</sup>Ce+<sup>145</sup>Nd+<sup>149</sup>Sm+<sup>153</sup>Eu+<sup>157</sup>Gd+<sup>161</sup>Dy+<sup>168</sup>Er+<sup>171</sup>Yb+<sup>176</sup>Lu, ионообменной хроматографии и последующего анализа с помощью секторного (SF) масс-спектрометра (HR/ICP-MS) Element2. Контроль точности и воспроизводимости измерений кон-

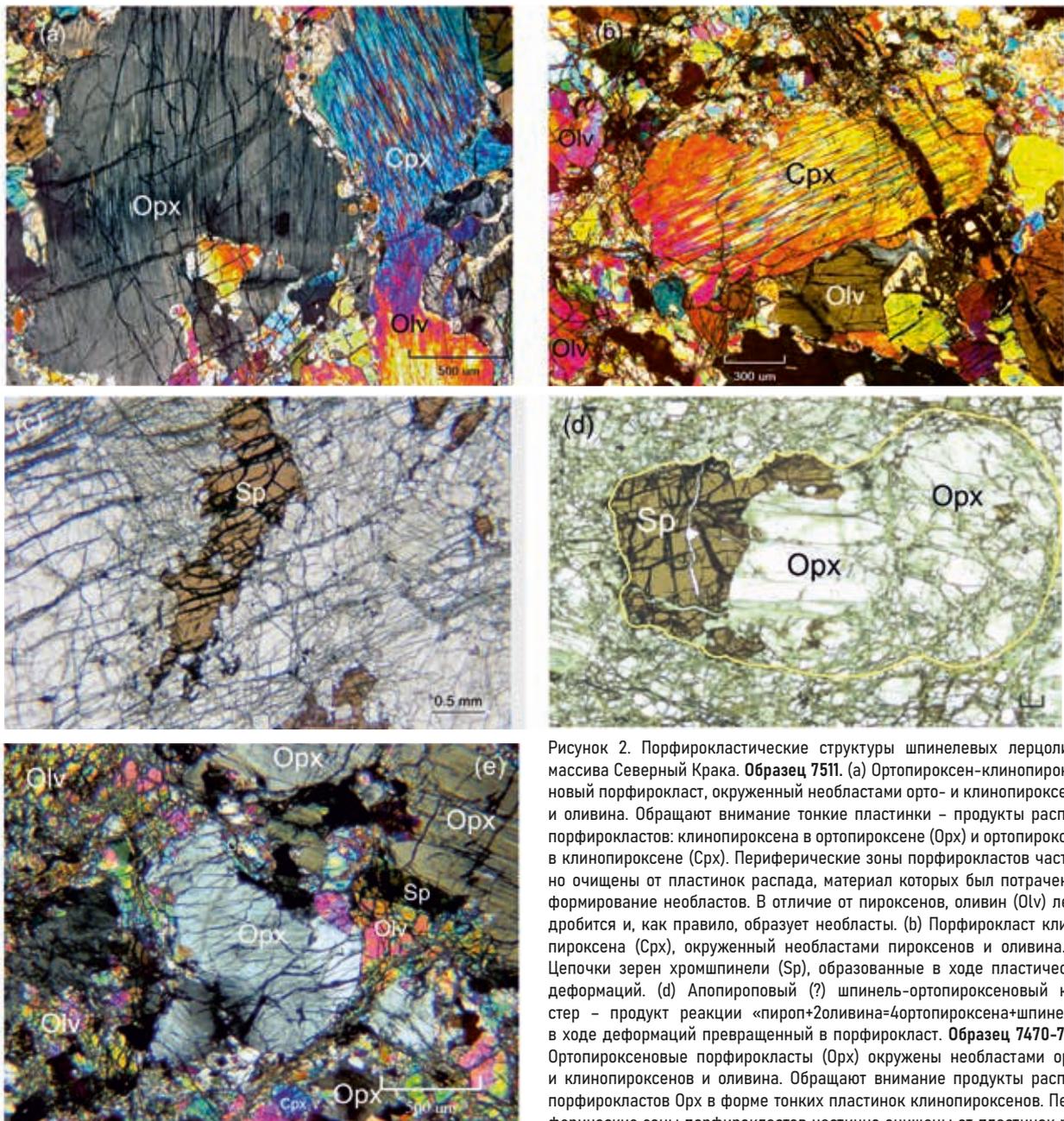


Рисунок 2. Порфирикластические структуры шпинелевых лерцолитов массива Северный Крака. **Образец 7511.** (а) Ортопироксен-клинопироксеновый порфирикласт, окруженный необластами орто- и клинопироксенов и оливина. Обращают внимание тонкие пластинки – продукты распада порфирикластов: клинопироксена в ортопироксене (Орх) и ортопироксена в клинопироксене (Срх). Периферические зоны порфирикластов частично очищены от пластинок распада, материал которых был потрачен на формирование необластов. В отличие от пироксенов, оливин (Оlv) легко дробится и, как правило, образует необласты. (b) Порфирикласт клинопироксена (Срх), окруженный необластами пироксенов и оливина. (c) Цепочки зерен хромшпинели (Sp), образованные в ходе пластических деформаций. (d) Апопироповый (?) шпинель-ортопироксеновый кластер – продукт реакции «пироп+2оливина=4ортопироксена+шпинель», в ходе деформаций превращенный в порфирикласт. **Образец 7470-7.** (e) Ортопироксеновые порфирикласты (Орх) окружены необластами орто- и клинопироксенов и оливина. Обращают внимание продукты распада порфирикластов Орх в форме тонких пластинок клинопироксенов. Периферические зоны порфирикластов частично очищены от пластинок распада, материал которых был потрачен на формирование необластов. В отличие от пироксенов, большая часть зерен оливина (Olv) легко дробится и, как правило, образует необласты.

пада, материал которых был потрачен на формирование необластов. В отличие от пироксенов, большая часть зерен оливина (Olv) легко дробится и, как правило, образует необласты.

Figure 2. Porphyroclastic structures of spinel hercynites of the Northern Kraka massif. **Sample 7511.** (a) Orthopyroxene-clinopyroxene porphyroclast surrounded by neoblasts of ortho- and clinopyroxenes and olivine. Remarkable are thin plates – decomposition products of porphyroclasts: clinopyroxene in orthopyroxene (Opx) and orthopyroxene in clinopyroxene (Cpx). The peripheral zones of porphyroclasts are partially cleared of decay plates, the material of which was spent on the formation of neoblasts. Unlike pyroxenes, olivine (Olv) is easily crushed and, as a rule, forms neoblasts. (b) Clinopyroxene porphyroclast (Cpx) surrounded by pyroxene and olivine neoblasts. (c) Chains of Cr-spinel (Sp) grains formed during plastic deformation. (d) Apopyrope (?) spinel-orthopyroxene cluster is a reaction product of "pyrope + 2olivine = 4orthopyroxene + spinel" transformed into porphyroclast during deformation. **Sample 7470-7.** (e) Orthopyroxene porphyroclasts (Opx) are surrounded by ortho- and clinopyroxene and olivine neoblasts. Remarkable are decay products of Opx porphyroclasts in form of thin clinopyroxene plates. The peripheral zones of porphyroclasts are partially cleared of decay plates, the material of which was spent on the formation of neoblasts. Unlike pyroxenes, most olivine (Olv) grains are easily crushed and tend to form neoblasts.

центраций REE осуществлялся путем анализа стандартного образца перидотита РСС-1. Детали аналитических процедур описаны в [11].

Анализ концентраций Rb, Sr, Sm, Nd и отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  осуществляли масс-спектрометрическим методом изотопного разбавления (ID), предусматривающим кислотное разложение смеси исходного образца со смешанными спайками  $^{85}\text{Rb}+^{86}\text{Sr}$ ,

$^{149}\text{Sm}+^{150}\text{Nd}$ , ионообменную хроматографию и последующий анализ результирующих реагентов с помощью мультиколлекторного твердофазного анализатора Triton (TIMS) в статическом режиме. Для оптимизации параметров изотопного разбавления производили предварительное измерение содержаний Rb, Sr, Sm и Nd методом HR/ICP-MS. Более подробное описание аналитических процедур приведено в [12].

Таблица 1  
Весовые соотношения в результате AL пробоподготовки образца лерцолита 7511 массива Северный Крака [7]

Table 1  
Weight ratios as a result of AL sample preparation of lherzolite sample 7511 from the Northern Kraka massif [7]

Материал	Необработанный материал	Кислотное выщелачивание		
	Навеска, г	Исходная навеска, г	Остаток после растворения, г	Ушло в раствор, г
Ортопироксен (Орх)	0.9	1.2283	1.1072	0.1211
Клинопироксен (Срх)	0.4	0.7483	0.4158	0.3325
Порода в целом (Wr)	1.0	2.3528	1.696	0.7832

Контроль точности и воспроизводимости измерений концентраций Sm ( $6.535 \pm 0.032$ , MSWD=1.4), Nd ( $28.55 \pm 0.17$ , MSWD=1.6), отношений  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $0.710242 \pm 0.000026$ , MSWD=0.98, n=88), ( $0.70800 \pm 0.00002$ , MSWD=0.85, n=84),  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  ( $0.13820 \pm 0.00024$ , MSWD=1.07),  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  ( $0.512638 \pm 0.000009$ , MSWD=0.97), ( $0.511856 \pm 0.000005$ , MSWD=0.67, n=51) проводили путем анализа стандартов BCR-2 USGS, Eimer & Amend, SRM-987, La Jolla соответственно.

### Результаты и их обсуждение

Спектры распределения REE шпинелевых лерцолитов Северного Крака в координатах «элемент –  $C_{Wr}/C_{Ch}$ », где  $C_{Wr}$ ,  $C_{Ch}$  – концентрации элементов в породе в целом и хондрите соответственно, показаны на рис. 3, из которого следует, что изученные образцы характеризуются

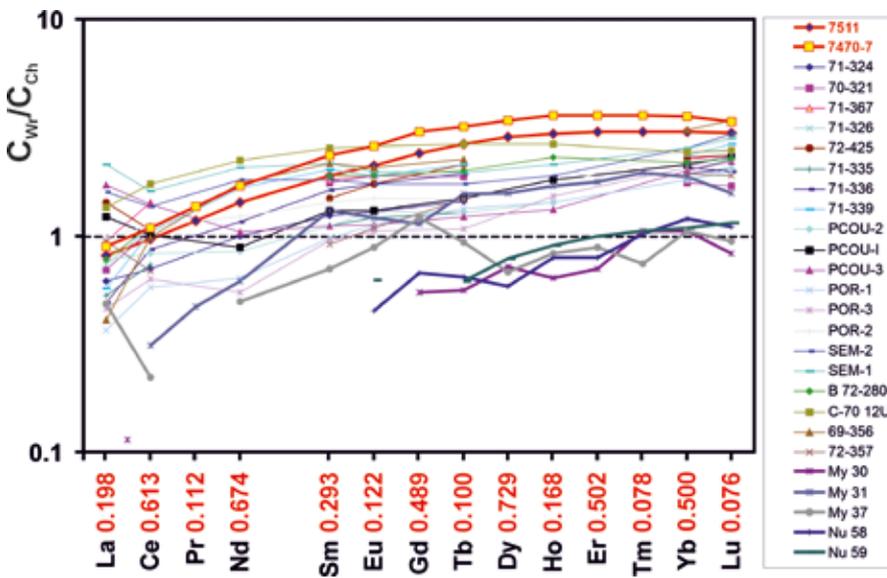


Рисунок 3. Спектры распределения REE в лерцолитах [7] с дополнениями. Тонкие цветные линии – классические лерцолиты восточных Пиреней, номера проб (71-324, ..., 72-357) соответствуют таковым из табл. 1А, 1В, 1С [13]. Красные утолщенные линии характеризуют спектры распределения REE образцов 7511 (синие ромбы) и 7470-7 (желтые квадраты), изученных в настоящей работе. Остальные утолщенные цветные линии – лерцолиты массивов Миндяк и Нурали, Южный Урал. Номера проб соответствуют таковым из табл. 1 [14].  $C_{Wr}$ ,  $C_{Ch}$  – концентрации REE в породе и хондрите соответственно. Коэффициенты нормализации указаны красными цифрами по оси абсцисс.

Figure 3. REE distribution patterns in lherzolites [7] with additions. Thin colored lines are classic lherzolites of the Eastern Pyrenees, sample numbers (71- 324, ..., 72-357) correspond to those in Tables 1A, 1B, 1C [13]. Red bold lines characterize the REE distribution spectra of samples 7511 (blue rhombs) and 7470-7 (yellow squares) studied in this work. The least bold colored lines are lherzolites of the Mindyak and Nurali massifs, Southern Urals. Sample numbers correspond to those in Table 1 [14].  $C_{Wr}$ ,  $C_{Ch}$  – REE concentrations in rock and chondrite, respectively. Normalization coefficients are indicated in red numbers on the x-axis.

обеднением цериевой части лантаноидов. Аномалий Ce и Eu не выявлено. Существует мнение [2], что такая форма распределения REE отражает процесс дифференциации вещества мантийного источника, обедненного легкими REE.

Для сравнения на этот же график нанесены спектры распределения РЗЭ орогенных лерцолитов восточных Пиреней, Lherz, Freychinede, Pic Couder, Porteteny, Sem, Bestiac [13], а также аналогичных пород из массивов Миндяк и Нурали, Южный Урал [14].

### $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$ изотопные ограничения

Результаты изучения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  изотопных систем в шпинелевых лерцолитах 7511 и 7470-7 массива Северный Крака приведены в табл. 2, а графическая интерпретация этих данных представлена на рис. 4–6.

Размах осцилляции концентраций Sm, Nd в изученном образце породы в целом 7511, ортопироксене и клинопироксене, не подвергнутых кислотному выщелачиванию, определяется интервалами 0.149–0.227 ppm и 0.516–0.448 ppm соответственно, диапазоны наблюдаемых атомных отношений  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  идентифицируются значениями 0.1745–0.3058, 0.513014–0.513479 (или +7.4...+16.4 в единицах  $\epsilon_{Nd}$ ). Аналогичные параметры для разностей, испытавших воздействие кислот, демонстрируют сравнительное обогащение величин Sm, Nd [ppm],  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  от 1.40, 0.80, 1.13, 1.0002 до 1.68, 1.49, 1.75, 1.0011 соответственно (табл. 2), что значительно увеличивает «растяжку» положения фигуративных точек по осям координат эволюционной диаграммы (рис. 5). Использование программного обеспечения Isoplot/Ex ver. 3,6 [21] для  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  изотопных сигнатур Wr, Орх, Срх позволяет выявить эрохронную зависимость (MSWD=2.6<sup>1</sup>), определяющую возраст 542±33 млн лет. Единообраз-

<sup>1</sup> В первом приближении MSWD есть мера отношения наблюдаемого отклонения фигуративных точек (от аппроксимирующей линии регрессии) к ожидаемому разбросу (от наблюдаемых погрешностей и их корреляций). MSWD нельзя отождествлять с коэффициентом детерминации R<sup>2</sup>. Более того, MSWD не является мерой того, насколько сильно коррелируют значения X и Y по осям координат. Если присвоенные погрешности являются единственной причиной вариаций, величина MSWD будет иметь тенденцию быть близкой к единице. Значения MSWD, намного превышающие единицу, как правило, указывают либо на заниженные аналитические погрешности, либо на наличие «неаналитического» разброса, связанного с геохимической дисперсией. MSWD <1 обычно указывают на завышенные аналитические погрешности или на скрытые погрешности корреляции. Более подробно см. в [21].

$^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  данные для шпинелевых лерцолитов 7511 [7] и 7470-7 массива Северный Крака

Таблица 2

$^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  data for spinel lherzolites 7511 [7] and 7470-7 of the Northern Kraka massif

Table 2

Образец	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(545)$
7511 Wr	0.149	0.516	0.1745	0.0005	0.513014	0.000022	+7.4	+8.9
7511 Opх	0.0791	0.186	0.2568	0.0008	0.513331	0.000028	+13.6	+9.4
7511 Срх	0.227	0.448	0.3058	0.0009	0.513479	0.000019	+16.4	+8.9
7511 Wr <sub>AL</sub>	0.249	0.752	0.2001	0.0006	0.513105	0.000023	+9.1	+8.9
7511 Opх <sub>AL</sub>	0.133	0.277	0.2900	0.0009	0.513427	0.000024	+15.4	+8.9
*7511 Срх <sub>AL</sub>	0.339	0.584	0.3509	0.0018	0.513637	0.000015	+19.5	+8.8
7511 Срх <sub>AL</sub>	0.348	0.602	0.3494	0.0016	0.513648	0.000018	+19.7	+9.1
7470-7 Wr	0.520	1.00	0.3136	0.0016	0.513490	0.000022	16.7	+8.5

Примечание.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{7511} = 0.703021 \pm 0.000035$ ,  $\epsilon_{\text{Sr}}(0) = -21.0$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{7470-7} = 0.703009 \pm 0.000031$ ,  $\epsilon_{\text{Sr}}(0) = -21.2$ . При расчете  $\epsilon_{\text{Sr}}(0)$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(545)$  использованы значения возраста 545 млн лет и характеристик UR, CHUR, DM:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512636$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2135$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$  соответственно.

Note.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{7511} = 0.703021 \pm 0.000035$ ,  $\epsilon_{\text{Sr}}(0) = -21.0$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_{7470-7} = 0.703009 \pm 0.000031$ ,  $\epsilon_{\text{Sr}}(0) = -21.2$ . When calculating  $\epsilon_{\text{Sr}}(0)$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(545)$  and  $\epsilon_{\text{Nd}}(545)$ , we used the age values of 545 Ma and the UR, CHUR, DM characteristics:  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512636$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2135$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$ , respectively.

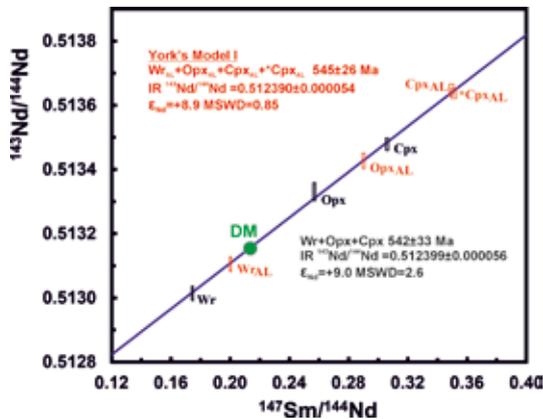


Рисунок 4.  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  AL ID-TIMS эволюционная диаграмма для лерцолита 7511 массива Северный Крака [7]. Размеры прямоугольников пропорциональны погрешностям  $\pm 2\sigma$  атомных отношений  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ . Wr – порода в целом, Opх – ортопироксен, Срх – клинопироксен. Нижний индекс «AL» идентифицирует разности подвергнутых кислотному выщелачиванию. MSWD – Mean Square of Weighted Deviates. Параметры CHUR см. в примечании к табл. 2. DM:  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2135$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$ .

Figure 4.  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  AL ID-TIMS evolution diagram for lherzolite 7511 of the Northern Kraka massif [7]. The sizes of the rectangles are proportional to  $\pm 2\sigma$  errors of  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  atomic ratios. Wr – rock as a whole, Opх – orthopyroxene, Срх – clinopyroxene. The subscript «AL» identifies varieties that have been acid-leached, MSWD – Mean Square of Weighted Deviates. For CHUR parameters see Note for Table 2. DM:  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2135$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$ .

ные расчеты для Wr<sub>AL</sub>, Opх<sub>AL</sub>, Срх<sub>AL</sub>, \*Cрх<sub>AL</sub> (дубликат для оценки воспроизводимости) диагностируют наличие изохроны (MSWD=0.85, York's model I [21]) с возрастом  $545 \pm 26$  млн лет и высоким значением инициального отношения  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0 = 0.512390 \pm 0.000054$  (рис. 5), соответствующим в рамках представлений относительно модельных резервуаров величине  $\epsilon_{\text{Nd}} = +8.9$ . Примечательно положение фигуративной точки DM (depleted mantle) на диаграмме (рис. 5), практически удовлетворяющее линии регрессии/изохроне с тангенсом угла наклона 0.00357 (соответствующей возрасту 545 млн лет) и разницей между

значениями величин ординат между  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{DM}}$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}(545)$  всего лишь 0.000007 (абс.), менее чем полученные  $\pm 2\sigma$  погрешности (табл. 2).

Содержания Sm, Nd [ppm], значения  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  и  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  в образце 7511 породы в целом 0.520, 1.00, 0.3136, 0.513490 значимо выше, в сравнении с лерцолитом 7511, тогда как величины  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  для обеих проб практически тождественны (коэффициент вариации 0.0012 %).

Регрессионные параметры аппроксимирующей линии на графике в координатах  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  –  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (рис. 4) приведены в табл. 3-4.

### Возрастные ограничения

В соответствии с ранними представлениями 1960-х гг., приведенными в объяснительной записке к государственной геологической карте РФ масштаба 1 : 200 000 (издание второе, серия Южно-Уральская, лист N-40-XXII, «Тулан»; [http://geo.mfvsegei.ru/200k/Zap/Zap\\_N-40-XXII.pdf](http://geo.mfvsegei.ru/200k/Zap/Zap_N-40-XXII.pdf)), возраст массивов Крака трактуется в широком диапазоне – от докембрийского до послераннекаменноугольного, тем не менее авторами по непонятной причине принят силурийский возраст ( $\nu\sigma$ ,  $\sigma$ ,  $\Sigma\nu$  Ok).

В более современных работах [5, 6] на основании U-Pb SHRIMP-II датирования цирконов, выделенных из массива Узянского Крака (рис. 1, с, позиция 2), выявлен еще более широкий диапазон  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  возрастов, превышающий 1800 млн лет (от PR<sub>3</sub> до J<sub>1</sub>), а именно от  $2037 \pm 20$  млн лет (цирконы лерцолита) до  $196 \pm 4$  млн лет (цирконы дунита). Анализируя полученную U-Pb SHRIMP-II возрастную сигнатуру, авторы выделяют три этапа (NP<sub>3</sub>, D<sub>2</sub>-O<sub>3</sub> и J<sub>1</sub>-C<sub>1</sub>), делая вывод о том, что цирконы из лерцолита, гранатового пироксенита и дунита массива Узянского Крака представляют полигенно-полихронное сообщество, сосуществующие разновидности которого определяются длительностью эволюции пород, их прогрессивными-регрессивными изменениями. При этом постулируется отчетливая преемственность между всеми выделенными типами цирконов из лерцолита, гранатового пироксенита и дунита массива Узянский Крака. Интерпретируя полученные U-Pb SHRIMP-II результаты, авторы полагают, что исходные лерцолиты с минимальным возрастом 2037 млн лет испытывали термальные воздействия, обусловленные пульсационным функционированием мантийных плюмов, на протяжении всей позднекембрийской рифтогенной предыстории Урала.

Сравнивая  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  AL ID-TIMS данные ( $545 \pm 26$  млн лет, MSWD=0.85), полученные нами в [7], с результатами U-Pb SHRIMP-II датирования цирконов, выделенных из

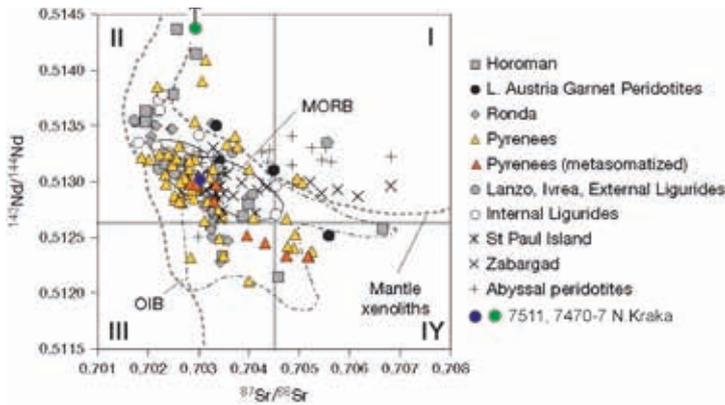


Рисунок 5. Корреляционная диаграмма  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  для лерцолитов 7511 и 7470-7 массива Северный Крака (синий кружок) и клинопироксенитов, выделенных из орогенных, офиолитовых и абиссальных перидотитов, пироксенитов Horoman, Lower Austria, Ronda, Pyrenees, Western Alps (Balmuccia, Lanzo, and the External Ligurides), Zabargad, Internal Ligurides, а также для океанических перидотитов [2]. Mid-Ocean Ridge Basalt (MORB) из базы данных Petrological Database of the Ocean Floor (PetDB [https://wiki5.ru/wiki/Petrological\\_Database\\_of\\_the\\_Ocean\\_Floor](https://wiki5.ru/wiki/Petrological_Database_of_the_Ocean_Floor)). Ocean-Island Basalt (OIB) из базы данных Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents (GEOROC <https://georoc.eu/georoc/new-start.asp>, данные по Французской Полинезии, Исландии, Гавайям, Галапагосским островам и Буве). I, II, III, IV – квадранты, выделенные (горизонтальная и вертикальные серые линии) относительно изотопного состава Sr и Nd модельного резервуара CHUR (параметры указаны в примечании к табл. 2).

Figure 5.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  correlation diagram for lherzolites 7511 and 7470-7 of the Northern Kraka massif (blue circle) and clinopyroxenites isolated from orogenic, ophiolitic and abyssal peridotites, pyroxenites of Horoman, Lower Austria, Ronda, Pyrenees, Western Alps (Balmuccia, Lanzo, and the External Ligurides), Zabargad, Internal Ligurides, as well as for oceanic peridotites [2]. Mid-Ocean Ridge Basalt (MORB) from the Petrological Database of the Ocean Floor (PetDB [https://wiki5.ru/wiki/Petrological\\_Database\\_of\\_the\\_Ocean\\_Floor](https://wiki5.ru/wiki/Petrological_Database_of_the_Ocean_Floor)). Ocean-Island Basalt (OIB) from the Geochemistry of Rocks of the Oceans and Continents database (GEOROC <https://georoc.eu/georoc/new-start.asp>, data on French Polynesia, Iceland, Hawaii, Galapagos Islands and Bouvet). I, II, III, IV – quadrants highlighted (horizontal and vertical grey lines) relatively to Sr and Nd isotopic composition of the CHUR model reservoir (parameters are indicated in Note for Table 2).

Таблица 3

Регрессионные параметры

Table 3

Regression parameters

Параметр	Наклон линии регрессии	Ордината пересечения с линией регрессии
Налучшее соответствие	0.003573	0.512390
1σ априори	0.000086	0.000027
1σ наблюдаемый разброс	0.000080	0.000025
95% доверительный предел	0.00017	0.000053

Таблица 4

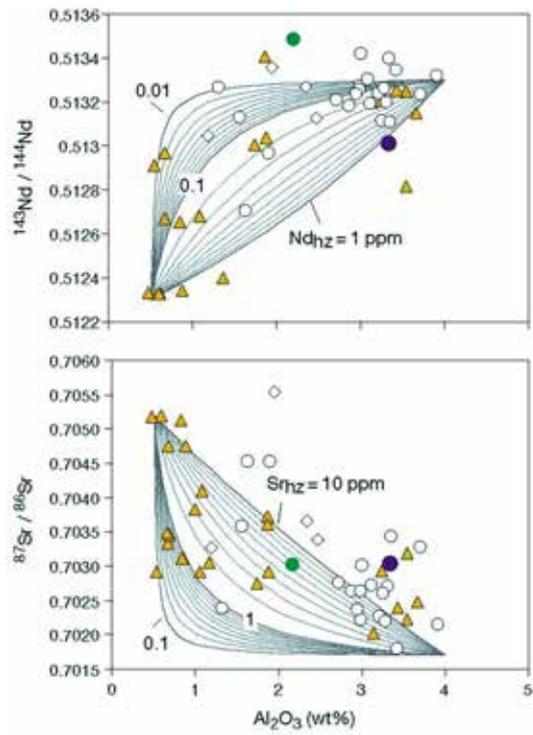
Монте Карло регрессионные параметры

Table 4

Monte Carlo regression parameters

Параметр	Наклон линии регрессии	Ордината пересечения с линией регрессии
Налучшее соответствие	0.003573	0.512390
68.3% доверительный предел	-0.000083+0.000088	-0.000028+0.000026
95% доверительный предел	-0.00016+0.00017	-0.000054+0.000051

массива Узянского Крака, можно отметить удовлетворительное совпадение вычисленных возрастов, поскольку основной, статистически обоснованный (n=7) объедини-



▲-Pyrenees ◊-Balmuccia ○-Lanzo ● 7511, 7470-7 N.Kraka

Рисунок 6. Зависимости  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  от  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (вес. %) для орогенных перидотитов из массивов Пиренеев, Западных Альп и шпинелевых лерцолитов массива Северный Крака [1, 15–20]. Элементный и изотопный составы конечных членов:  $\text{Al}_2\text{O}_3=4\%$ ,  $\text{Nd}=0.7\text{ ppm}$ ,  $\text{Sr}=12\text{ ppm}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5133$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7017$  для лерцолита и  $\text{Al}_2\text{O}_3=0.5\%$ ,  $\text{Nd}$  варьируется от 0,01 до 1 ppm,  $\text{Sr}$  от 0.1 до 10 ppm,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5123$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7052$  для харцбургита.

Figure 6. Dependences of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (wt. %) for orogenic peridotites from the Pyrenees massifs and Western Alps and spinel lherzolites of the Northern Kraka massif [1, 15–24]. Elemental and isotopic compositions of end-members:  $\text{Al}_2\text{O}_3=4\%$ ,  $\text{Nd}=0.7\text{ ppm}$ ,  $\text{Sr}=12\text{ ppm}$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5133$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7017$  for lherzolite and  $\text{Al}_2\text{O}_3=0.5\%$ ,  $\text{Nd}$  varies from 0.01 to 1 ppm,  $\text{Sr}$  from 0.1 to 10 ppm,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.5123$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7052$  for harzburgite.

тельный кластер, соответствующий фигуративным точкам кратеров (3, 11.3, 9, 11.2, 5, 6, 7.2) цирконов лерцолита K55 [6, табл. 2], определяет U-Pb конкордантный возраст  $536.8 \pm 4.6\text{ Ma}$  (2σ), MSWD=1.17.

К выводам о наличии кадомского этапа орогенеза в эволюции Миндякского массива (считающегося, по мнению некоторых геологов, аналогом<sup>2</sup> Крака, но локализованного северо-восточнее, в зоне Главного Уральского глубинного разлома) пришли и авторы работы [14], изучая соответствующие породы  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  и Re-Os методами изотопной геологии.

Здесь следует отметить, что целесообразность аналитических приемов, реализованных при изучении Re-Os изотопной систематики пород Миндякского массива, вызывает определенные сомнения. Это наглядно демонстрируют результаты повторного анализа образца Му-35

<sup>2</sup> Фокусируясь на дискуссии об аналогии массивов Нурали, Миндяк и Крака, географически разобщенных в настоящее время, можно процитировать утверждение авторов [6] о том, что реактивация Краинского массива в среднем палеозое в соответствии с U-Pb SHRIMP-II возрастным интервалом 390–445 млн лет предполагает связь с процессами выведения мантийного блока и его аллохтонным перемещением в верхнюю кору.

(n=11, табл. 3, [14]), которые позволяют оценить величины коэффициентов вариации концентраций Re, Os и отношений  $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ ,  $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ , равные 28.8, 24.8, 66.6 и 56.7 % соответственно. По нашему опыту, а также имеющимся литературным данным, применение метода низкотемпературного кислотного разложения в случае таких пород, как пироксениты, вряд ли оправдано. Метрологически более обоснованными выглядят  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  ID-TIMS данные для габбро и диоритов Миндякского массива, для которых получена изохронная зависимость (MSWD=0,90), определяющая возраст  $540 \pm 18$  млн лет и  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0 = 0.512263 \pm 0.000024$  [14]. Результатом исследований, проведенных методами изотопной геологии, является вывод о том, что Миндякский лерцолитовый массив может быть «первой находкой неопротерозойской кадомской дуги на Южном Урале» [14].

Таким образом, резюмируя сведения относительно возрастных ограничений в рамках данного раздела, можно полагать, что совпадение U-Pb SHRIMP-II цирконовых датировок и  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  AL ID-TIMS данных в интервале 590–540 млн лет в главных породных ассоциациях массива Узьянский и шпинелевом лерцолите Северного Крака со всей определенностью свидетельствует о формировании стратифицированного разреза массивов Крака до открытия Уральского палеоокеана.

Итоговые сведения об изученности массивов Крака методами изотопной геологии, выполненные к настоящему времени, приведены в табл. 5.

#### Генетические ограничения

В соответствии с имеющимися представлениями (например, [23] и др.), орогенные лерцолиты часто интерпретируются

Таблица 5

Изученность пород массивов Крака методами изотопной геологии [6, 7]

Table 5

State of knowledge on rocks of the Kraka massifs using isotope geology methods [6, 7]

Массив	Порода/минерал	N	Метод	Возраст [млн лет]	Графическое представление	Интерпретация
Узьянский Крака	Лерцолит/циркон	15	U-Pb SHRIMP-II* [6]	$529.2 \pm 2.3^1$ ; $529 \pm 96^2$ (MSWD=1510); $652 \pm 210^3$ ; $511 \pm 37^4$ ; $539 \pm 27/-94^5$		Интервал 1800 млн лет (от PR3 до J1) с выделением трех этапов (NP <sub>3</sub> , D <sub>2</sub> -O <sub>3</sub> и J <sub>1</sub> -C <sub>1</sub> ), связан с пульсационными процессами термального воздействия мантийных плюмов на исходные лерцолиты (с минимальным возрастом 2037 млн лет), на протяжении всей позднедокембрийской рифтогенной предыстории Урала.
	Гранатовый пироксенит/циркон	6		$428.8 \pm 4.5^1$ ; $429 \pm 140^2$ (MSWD=573); $428 \pm 92^3$ ; $511 \pm 37^4$ ; $417 \pm 540/-39^5$		Интервал 390–445 млн лет. Предполагается связь с процессами выведения мантийного блока и его аллохтонным перемещением в верхнюю кору.
	Дунит/циркон	10		$301.5 \pm 2.8^1$ ; $302 \pm 75^2$ (MSWD=550); $363 \pm 94$ ; $364 \pm 110$ ; $330 \pm 220/-110$		Интервал 299–196 млн лет, обусловлен высокой флюидонасыщенностью («серпентинизацией») дунитов. Эндогенным стимулом при этом могли служить сдвиговые деформации и заключительные импульсы гранитообразования, распространенные в это время на Урале.
Северный Крака	Лерцолит/Орх, Срх	7	$^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$ AL TIMS [7]	$545 \pm 26$ , $\epsilon_{\text{Nd}} = +8.9$ , MSWD=0.85		Проявления поздневендской фазы (эпохи) складчатости и орогенеза на Урале в интервале $545 \pm 26$ млн лет. Сравнение этих данных с материалами по геологии Центральной и Западной Европы позволяет коррелировать образованные в результате указанной фазы складчатости структуры тиманид с кадомидами.

Примечания. 1. \* – пересчитано на U-Pb конкордантные возрасты; 2. N – количество фигуративных точек. Возраст [млн лет], вычисленный по различным статистическим алгоритмам: <sup>1</sup> –  $\pm 2\sigma$ ; <sup>2</sup> – 95 % conf. ( $=t\sigma/\text{MSWD}$ ); <sup>3</sup> – 95 % conf. с учетом неопределенностей констант распада; <sup>4</sup> – 95 % conf. робастная оценка Tukey's Biweight [22]); <sup>5</sup> – 96.9 % conf. (Median); линия согласования (reference line).

Note. \* – calculated to U-Pb concordant ages; N – number of figurative points. Age [Ma] calculated using various statistical algorithms: <sup>1</sup> –  $\pm 2\sigma$ ; <sup>2</sup> – 95 % conf. ( $=t\sigma/\text{MSWD}$ ); <sup>3</sup> – 95 % conf. taking into account the uncertainties of decay constants; <sup>4</sup> – 95 % conf. Tukey's Biweight robust estimate [22]); <sup>5</sup> – 96.9 % conf. (Median); reference line.

тируются как фрагменты континентальной литосферной мантии, тектонически внедренные в земную кору. Рассматриваемая модель находит подтверждение для цирконов лерцолитов Узянского Крака (рис. 1, с, позиция 2) на основании анализа дискриминационных диаграмм в координатах Yb-U, Hf-U/Yb, Y-U/Th [5], позволяющих, как известно, с большой долей вероятности дифференцировать циркон континентального и океанического происхождения. В выводах этой работы постулируется, что фигуративные точки цирконов всех возрастных кластеров (диапазон от 2037 до 196 млн лет) в лерцолитах, гранатовых пироксенитах и серпентинитах Узянского Крака на упомянутых выше диаграммах соответствуют полю вещества континентального генезиса, что не противоречит в целом представлениям о формировании этих пород при рифтовом растяжении континентальной литосферы [5, 6].

Альтернативная гипотеза о происхождении орогенных лерцолитов из океанической коры была предложена авторами в работе [24], полагающими, что орогенные лерцолиты представляют собой подтип офиолитов, отличающийся от распространенного гарцбургитового более тонким разрезом коры и непосредственным контактом с метаморфизованной континентальной корой. По мнению, изложенному в [24], орогенные лерцолиты могут быть связаны с трансформными разломами или очень медленно эволюционирующими спрединговыми центрами, где литосферный фронт проникает на расстоянии первых десятков километров в нижележащую мантию.

Полученные REE данные,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  изотопная систематика шпинелевых лерцолитов массива Северный Крака, позволяют идентифицировать генетическую принадлежность изученного вещества. Об этом свидетельствует наблюдаемая корреляционная зависимость  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  (в частности, особенность положения соответствующей фигуративной точки по оси  $^{87}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ , II квадрант графика, рис. 5), что вместе со спецификой спектра распределения REE (рис. 3) не противоречит гипотезе о происхождении, предполагающем плавление уже истощенного протолита, который можно идентифицировать как мантийный источник, с параметрами, подобными MORB.

Другим аргументом в пользу изложенного в предыдущем абзаце является позиция фигуративной точки DM на графике Николайсена (рис. 4), поскольку изотопный состав Sm и Nd в рамках наблюдаемых погрешностей практически точно ( $\Delta=0.0014\%$ ) соответствует параметрам линии регрессии (slope 0.00357, табл. 3, 4). Иными словами, эволюционные параметры  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  деплетированного резервуара DM тождественны изотопному составу Sm и Nd изученного вещества.

Другой особенностью изученных разностей является наличие корреляции между современным изотопным составом Sr-Nd и степенью истощения этих пород лег-

коплавкими компонентами. Эта взаимосвязь проиллюстрирована на рис. 6 в виде положительной корреляции между соотношением  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  и содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  для перидотитов из Западных Альп (Balmuccia и Lanzo), Восточных Пиреней и массива Северный Крака. Аналогичная, но относительно менее выраженная картина характеризует комплементарную взаимосвязь между  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

#### Геодинамические следствия

Полученный  $^{147}\text{Sm}-^{143}\text{Nd}$  AL ID-TMS изохронный возраст  $545\pm 26$  млн лет для шпинелевых лерцолитов массива Северный Крака в сочетании с имеющимся комплексом геологических и геохимических данных позволяет с большой вероятностью утверждать [4, 7, 14] о проявлении поздневендской фазы (эпохи) складчатости и орогенеза на Урале в интервале 620–540 млн лет, ответственной за образование тиманид. Сравнение этих данных с материалами по геологии Центральной и Западной Европы дает возможность коррелировать образованные в результате этой фазы складчатости структуры тиманид с кадомидами ([https://ru.wikibrief.org/wiki/Cadomian\\_Orogeny](https://ru.wikibrief.org/wiki/Cadomian_Orogeny)). Глобальные реконструкции континентов для конца протерозоя санкционируют выдвижение гипотезы о существовании кадомского орогена на периферии Гондваны (рис. 7).

Согласно имеющимся палеомагнитным построениям [27], Восточно-Европейский и Сибирский континенты располагались в южном полушарии, напротив кадомской Перигондваны, тем не менее на существенном удалении от нее. Вместе с тем Палеоурал, Палеотаймыр и Перигондванские кадомиды находились, согласно этим же данным, на очень близких широтах [4]. Имея в виду, что палеомагнитные данные не позволяют однозначно определить палеодолготу, можно откорректировать реконструкцию [27] таким образом, чтобы полагать, что Палеоурал, Палеотаймыр и Перигондванские кадомиды представляли компактный, более крупный ороген в составе следующего после Родинии<sup>3</sup> суперконтинента Паннотия.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

<sup>3</sup> Родиния – гипотетический суперконтинент, предположительно существовавший в протерозое – зоне докембрия. Возник около 1,1 млрд лет назад и распался около 750 млн лет назад. В то время планета состояла из единичных гигантских частей суши и океана, получившего название Мировия. Родиния часто считается древнейшим известным суперконтинентом, однако ее позиция и очертания все еще являются предметами споров. Существуют предположения, что до Родинии существовали и другие суперконтиненты: Кенорленд – максимальная сборка  $\approx 2.75$  млрд лет назад, Нуна (Колумбия, Хадсонленд) – максимальная сборка  $\approx 1.8$  млрд лет назад. После распада Родинии на Прото-Лавразию (северный континент) и Прото-Гондвану (южный континент) континенты вновь объединились в суперконтинент Паннотия с 600 по 540 млн лет назад. После распада Паннотии континенты объединились в суперконтинент Пангея, который в конечном итоге снова диссоциировался до современного состояния (<https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F>).

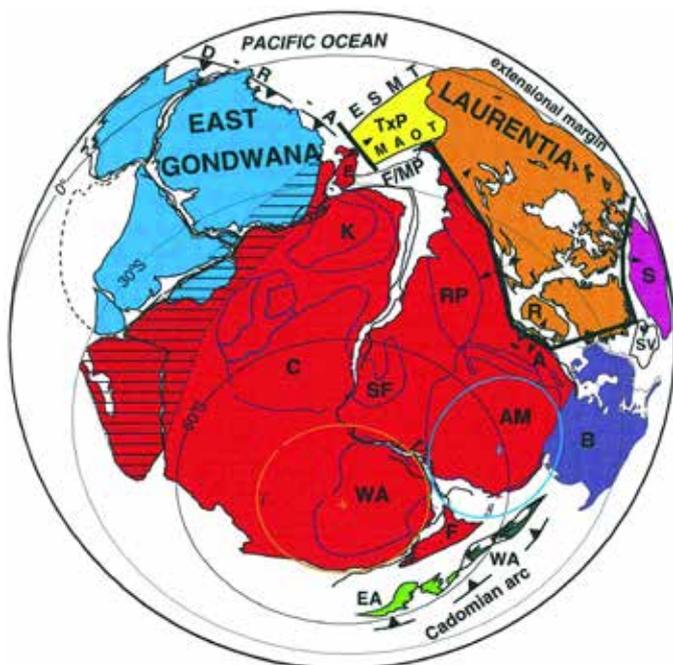


Рисунок 7. Геологически обусловленная реконструкция суперконтинента Паннотия, который, вероятно, существовал вблизи докембрийско-кембрийской границы, 600–540 млн лет [7, 25]. Панафриканско-бразильские (паннотские; [26]) бассейны показаны закрытыми, хотя некоторые из них, возможно, сохранились до кембрия (см. [11]). Примечательно, что авторы [27] интерпретировали палеомагнитные данные как требующие разделения Лаврентии и Гондваны более чем на 5000 км на границе докембрия и кембрия. Трактовка основана в первую очередь на геологических аргументах, поскольку показанные палеомагнитные полюса не подтверждают такое близкое соседство Лаврентии и Гондваны [25]. Pacific ocean – Тихий океан; Extensional margin – расширение восточной окраины Тихого океана; East Gondwana – восточная часть суперконтинента Гондвана; Laurentia – суперконтинент Лаврентия; Cadomian arc – кадомская магматическая дуга; A – Arequipa massif; AM – Amazonian craton; B – Baltica (Russian craton); C – Congo craton; D-R-A – Delamerian-Ross arc; E – Ellsworth-Whitmore mountains block (in Pangea position); EA – East Avalonia (southern British Isles); ESMT – hypothetical Ellsworth-Sonora-Mojave transform; F/MP – Falkland-Malvinas Plateau; K – Kalahari craton; MAOT – hypothetical Malvinas-Alabama-Oklahoma transform; R – Rockall Plateau with adjacent northwest Scotland and northwest Ireland; RP – Rio de la Plata craton; S – Siberia (Angara craton); SF – São Francisco craton; SV – Svalbard block (Barentia); WA – West African craton; TxP – hypothetical Texas plateau. Линии с черными треугольниками – верхние плиты зон субдукции (кадомский ярус) и зарождающихся зон субдукции (дуга Деламерия – Росса, D-R-A); жирные линии – зарождающиеся mid-lapetus хребты; диагональные линии – коллизионный ороген восточной Африки, включающий восточную и западную Гондвану. Figure 7. Geologically determined reconstruction of the Pannotia supercontinent, which probably existed near the Precambrian-Cambrian boundary, 600–540 million years [7, 25]. The pan-African-Brazilian (Pannotian; [26]) basins are shown closed, although some of them possibly retained till the Cambrian (see [11]). Notably, the authors of [27] interpreted paleomagnetic data as requiring a separation of Laurentia and Gondwana by more than 5000 km at the Precambrian-Cambrian boundary. The interpretation is primarily based on geological arguments, since the paleomagnetic poles shown do not confirm such a close proximity of Laurentia and Gondwana [25]. Symbols: extensional margin – expansion of the eastern margin of the Pacific Ocean; Cadomian arc – Cadomian magmatic arc; A – Arequipa massif; AM – Amazonian craton; B – Baltica (Russian craton); C – Congo craton; D-R-A – Delamerian-Ross arc; E – Ellsworth-Whitmore mountains block (in Pangea position); EA – East Avalonia (southern British Isles); ESMT – hypothetical Ellsworth-Sonora-Mojave transform; F/MP – Falkland-Malvinas Plateau; K – Kalahari craton; MAOT – hypothetical Malvinas-Alabama-Oklahoma transform; R – Rockall Plateau with adjacent northwest Scotland and northwest Ireland; RP – Rio de la Plata craton; S – Siberia (Angara craton); SF – São Francisco craton; SV – Svalbard block (Barentia); WA – West African craton; TxP – hypothetical Texas Plateau. Lines with black triangles are upper plates of subduction zones (Cadomian stage) and incipient subduction zones (Delameria-Ross arc, D-R-A); bold lines – incipient mid-lapetus ridges; diagonal lines – collisional orogen of Eastern Africa, including Eastern and Western Gondwana.

## Литература

1. Bodinier, J.-L. Geochemistry and petrogenesis of the Lanzo peridotite body, Western Alps / J.-L. Bodinier // *Tectonophysics*. – 1988. – 149. – P. 67–88.
2. Bodinier, J.-L. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites / J.-L. Bodinier, M. Godard // *Treatise on Geochemistry*. – 2007. – P. 1–73. doi:10.1016/b0-08-043751-6/02004-1.
3. Saveliev, D. E. Accessory Cr-spinel from peridotite massifs of the South Urals: morphology, composition and origin / D. E. Saveliev, V. V. Shilovskikh, D. K. Makatov, R. A. Gataullin // *Mineralogy and Petrology*. – 2022. – 116. – P. 401–427.
4. Пучков, В. Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала / В. Н. Пучков. – Уфа : Даурия, 2000. – 146 с.
5. Аникина, Е. В. Изотопно-геохимическая систематика циркона из ультрабазитов массива Узянский Крака / Е. В. Аникина, И. А. Русин, А. И. Русин, А. А. Краснобаев // *Труды Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого*. – 2014. – № 161. – С. 158–166.
6. Краснобаев, А. А. Цирконы, цирконовая геохронология и вопросы петрогенезиса лерцолитовых массивов Южного Урала / А. А. Краснобаев, А. И. Русин, И. А. Русин, С. В. Бушарина // *Геохимия*. – 2011. – Т. 5. – С. 506–522.
7. Ronkin, Yu. L. Spinel lherzolite of the Northern Kraka massif (Southern Urals): The first REE ID-ICP-MS,  $^{87}\text{Sr}$ - $^{86}\text{Sr}$ , and  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  AL ID-TIMS isotope constraints // Yu. L. Ronkin, I. S. Chashchukhin, V. N. Puchkov // *Dokl. Earth Sc.* – 2023. – <https://doi.org/10.1134/S1028334X23602365>.
8. Puchkov, V. N. Structure and geodynamics of the Uralian orogen. In: *Orogeny Through Time*. Geological Society, London, Special Publication / Ed. J.-P. Burg and M. Ford. – 1997. – № 121 (1). – P. 201–236. DOI: 10.1144/gsl.sp.1997.121.01.09.
9. Денисова, Е. А. Строение и деформационные структуры офиолитовых массивов с лерцолитовым типом разреза / Е. А. Денисова // *Геотектоника*. – 1990. – № 2. – С. 14–27.
10. Garrido, C. J. Incompatible trace element partitioning and residence in anhydrous spinel peridotites and websterites from the Ronda orogenic peridotite / C. J. Garrido, J.-L. Bodinier, O. Alard // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2000. – 181(3). – P. 341–358. DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00201-6.
11. Ронкин, Ю. Л. Определение ультрамалых содержаний REE в геологических образцах ID-SF-HR/ICP-MS методом: на примере стандартных образцов дунита и перидотита / Ю. Л. Ронкин, Д. З. Журавлев, О. П. Лепихина, Г. А. Лепихина // *Информационный сборник научных трудов. Институт геологии и геохимии*. – Екатеринбург, 2008. – С. 409–420.

12. Ronkin, Yu. L. The first  $^{147}\text{Sm}$ - $^{143}\text{Nd}$  data on rocks from the 6925.2- to 8250-m interval of the SG-7 superdeep borehole (West Siberian oil-and-gas province) / Yu. L. Ronkin, T. V. Karaseva, A. V. Maslov // *Dokl. Earth Sc.* – 2021. – 496. – P. 130–134. – <https://doi.org/10.1134/S1028334X2102015X>.
13. Bodinier, J-L. Geochemistry and petrogenesis of Eastern Pyrenean peridotites / J-L. Bodinier, C. Dupuy, J. Dostal // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1988. – 52 (12). – P. 2893–2907. – doi: 10.1016/0016-7037(88)90156-1.
14. Tessalina, S. G. Complex Proterozoic to Paleozoic history of the upper mantle recorded in the Urals lherzolite massifs by Re-Os and Sm-Nd systematics / S. G. Tessalina, B. Bourdon, A. Gannoun, F. Capmas, J.-L. Birck, C.J. Allègre // *Chemical Geology.* – 2007. – 240(1-2). – P. 61–84. – doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.02.006.
15. Bodinier, J-L. Distribution des terres rares dans les massifs lherzolitiques de Lanzo et de l'Ariège. PhD Thesis, Montpellier, France. – 1989. – 177 p.
16. Bodinier, J-L. Continental to oceanic mantle transition – REE and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Lanzo lherzolite massif. Orogenic lherzolites and mantle processes / J-L. Bodinier, M. A. Menzies, M. Thirlwall // *Journal of Petrology.* – 1991. – 20. – P. 191–210.
17. Voshage, H. Isotopic constraints on the origin of ultramafic and mafic dikes in the Balmuccia peridotite (Ivrea Zone) / H. Voshage, S. Sinigoi, M. Mazzucchelli, G. Demarchi, G. Rivalenti [et al.] // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1988. – 100. – P. 261–267.
18. Bodinier, J-L. REE and Sr-Nd isotopic geochemistry of Eastern Pyrenean peridotite massifs: sub-continental lithospheric mantle modified by continental magmatism / J-L. Bodinier, H. Downes, M. F. Thirlwall, J.-P. Lorand, J. Fabries // *Journal of Petrology.* – 1991. – P. 97–115. – DOI: 10.1093/petrology/special\_volume.2.97.
19. McPherson, E. Geochemistry of silicate melt metasomatism in Alpine peridotite massifs. PhD thesis. – London : University of London, 1994.
20. McPherson, E. Geochemistry of metasomatism adjacent to amphibole-bearing veins in the Lherz peridotite massif / E. McPherson, M. F. Thirlwall, I. J. Parkinson, M. A. Menzies, J-L. Bodinier [et al.] // *Chemical Geology.* – 1996. – 134(1-3). – P. 135–157. – DOI: 10.1016/S0009-2541(96)00084-8.
21. Ludwig, K. R. User's Manual for Isoplot / EX ver. 3.6. Berkeley Geochronology Center, Special Publication. – 2008. – № 4. – 77 p.
22. Hoaglin, D. C. Understanding robust and exploratory data analysis / D. C. Hoaglin, F. Mosteller, J. W. Tukey // *John Wiley and Sons.* – 1983. – P. 345–349.
23. Reisberg, L. C. The Re-Os systematics of the Ronda ultramafic complex of Southern Spain / L. C. Reisberg, C. J. Allègre, J.-M. Luck // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1991. – 105. – P. 196–213.
24. Boudier, F. Harzburgite and lherzolite subtypes in ophiolitic and oceanic environments / F. Boudier, A. Nicolas // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1985. – 76. – P. 84–92.
25. Dalziel, I. W. D. On the organization of American plates in the Neoproterozoic and the breakout of Laurentia // *GSA Today.* – 1992. – Vol. 2. – № 11. – P. 237–241.
26. Stump, E. Construction of the Pacific margin of Gondwana during the Pannotios cycle. In: *Gondwana Six: Stratigraphy, sedimentology, and paleontology.* Ed. G. D. McKenzie / E. Stump // *American Geophysical Union Geophysical Monograph.* – 1987. – 41. – P. 77–87.
27. Torsvik, T. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic – A tale of Baltica and Laurentia / T. Torsvik, M. Smethurst, J. Meert, R. Vandervoo, W. Mckerrow [et al.] // *Earth-Science Reviews.* – 1996. – 40 (3–4). – P. 229–258. – DOI: 10.1016/0012-8252(96)00008-6.

## References

1. Bodinier, J-L. Geochemistry and petrogenesis of the Lanzo peridotite body, Western Alps / J-L. Bodinier // *Tectonophysics.* – 1988. – 149. – P. 67–88.
2. Bodinier, J-L. Orogenic, ophiolitic, and abyssal peridotites / J-L. Bodinier, M. Godard // *Treatise on Geochemistry.* – 2007. – P. 1–73. doi:10.1016/b0-08-043751-6/02004-1.
3. Saveliev, D. E. Accessory Cr-spinel from peridotite massifs of the South Urals: morphology, composition and origin / D. E. Saveliev, V. V. Shilovskikh, D. K. Makatov, R. A. Gataullin // *Mineralogy and Petrology.* – 2022. – 116. – P. 401–427.
4. Puchkov, V. N. Paleogeodinamika Yuzhnogo i Srednego Urala [Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals] / V. N. Puchkov. – Ufa : Dauria, 2000. – 146 p.
5. Anikina, E. V. Izotopno-geokhimeskaya sistematika tsirkona iz ul'trabazitov massiva Uzyanskiy Kraka [Isotope-geochemical systematics of zircon from ultramafic rocks of the Uzyansky Kraka massif] / E. V. Anikina, I. A. Rusin, A. I. Rusin, A. A. Krasnobaev // *Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritskiy.* – 2014. – № 161. – P. 158–166.
6. Krasnobaev, A. A. Tsirkony, tsirkonovaya geokhronologiya i voprosy petrogenezisa lertsolitovykh massivov Yuzhnogo Urala [Zircons, zircon geochronology and issues of petrogenesis of lherzolite massifs of the Southern Urals] / A. A. Krasnobaev, A. I. Rusin, I. A. Rusin, S. V. Busharina // *Geokhimiya [Geochemistry].* – 2011. – Vol. 5. – P. 506–522.
7. Ronkin, Yu. L. Spinel lherzolite of the Northern Kraka massif (Southern Urals): The first REE ID–ICP–MS,  $^{87}\text{Sr}$ – $^{86}\text{Sr}$ , and  $^{147}\text{Sm}$ – $^{143}\text{Nd}$  AL ID–TIMS isotope constraints // Yu. L. Ronkin, I. S. Chashchukhin, V. N. Puchkov // *Dokl. Earth Sc.* – 2023. – <https://doi.org/10.1134/S1028334X23602365>.
8. Puchkov, V. N. Structure and geodynamics of the Uralian orogen. In: *Orogeny Through Time.* Geological Society, London, Special Publication / Ed. J.-P. Burg and M. Ford. – 1997. – № 121 (1). – P. 201–236. DOI: 10.1144/gsl.sp.1997.121.01.09.
9. Denisova, E. A. Stroyeniye i deformatsionnyye struktury ofiolitovykh massivov s lertsolitovym tipom razreza [Structure and deformation structures of ophiolite mas-

- sifs with lherzolite type of section] // *Geotektonika [Geotectonics]*. – 1990. – № 2. – P. 14–27.
10. Garrido, C. J. Incompatible trace element partitioning and residence in anhydrous spinel peridotites and websterites from the Ronda orogenic peridotite / C. J. Garrido, J.-L. Bodinier, O. Alard // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2000. – 181(3). – P. 341–358. DOI: 10.1016/S0012-821X(00)00201-6.
  11. Ronkin, Yu. L. Opredeleniye ul'tramalykh sodержaniy REE v geologicheskikh obraztsakh ID-SF-HR/ICP-MS metodom : na primere standartnykh obraztsov dunita i peridotita [Determination of ultra-low REE contents in geological samples by the ID-SF-HR/ICP-MS method : using the example of standard samples of dunite and peridotite] / Yu. L. Ronkin, D. Z. Zhuravlev, O. P. Lepikhina, G. A. Lepikhina // *Information Collection of Scientific Works. Institute of Geology and Geochemistry*. – Ekaterinburg, 2008. – P. 409–420.
  12. Ronkin, Yu. L. The first  $^{147}\text{Sm}$ – $^{143}\text{Nd}$  data on rocks from the 6925.2- to 8250-m interval of the SG-7 superdeep borehole (West Siberian oil-and-gas province) / Yu. L. Ronkin, T. V. Karaseva, A. V. Maslov // *Dokl. Earth Sc.* – 2021. – 496. – P. 130–134. – <https://doi.org/10.1134/S1028334X2102015X>.
  13. Bodinier, J.-L. Geochemistry and petrogenesis of Eastern Pyrenean peridotites / J.-L. Bodinier, C. Dupuy, J. Dostal // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1988. – 52 (12). – P. 2893–2907. – doi: 10.1016/0016-7037(88)90156-1.
  14. Tessalina, S. G. Complex Proterozoic to Paleozoic history of the upper mantle recorded in the Urals lherzolite massifs by Re-Os and Sm-Nd systematics / S. G. Tessalina, B. Bourdon, A. Gannoun, F. Capmas, J.-L. Birck, C.J. Allègre // *Chemical Geology*. – 2007. – 240(1–2). – P. 61–84. – doi: 10.1016/j.chemgeo.2007.02.006.
  15. Bodinier, J.-L. Distribution des terres rares dans les massifs lherzolitiques de Lanzo et de l'Ariège. PhD Thesis, Montpellier, France. – 1989. – 177 p.
  16. Bodinier, J.-L. Continental to oceanic mantle transition – REE and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Lanzo lherzolite massif. Orogenic lherzolites and mantle processes / J.-L. Bodinier, M. A. Menzies, M. Thirlwall // *Journal of Petrology*. – 1991. – 20. – P. 191–210.
  17. Voshage, H. Isotopic constraints on the origin of ultramafic and mafic dikes in the Balmuccia peridotite (Ivrea Zone) / H. Voshage, S. Sinigoi, M. Mazzucchelli, G. Demarchi, G. Rivalenti [et al.] // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1988. – 100. – P. 261–267.
  18. Bodinier, J.-L. REE and Sr-Nd isotopic geochemistry of Eastern Pyrenean peridotite massifs: sub-continental lithospheric mantle modified by continental magmatism / J.-L. Bodinier, H. Downes, M. F. Thirlwall, J.-P. Lorand, J. Fabries // *Journal of Petrology*. – 1991. – P. 97–115. – DOI: 10.1093/petrology/special\_volume.2.97.
  19. McPherson, E. Geochemistry of silicate melt metasomatism in Alpine peridotite massifs. PhD thesis. – London : University of London, 1994.
  20. McPherson, E. Geochemistry of metasomatism adjacent to amphibole-bearing veins in the Lherz peridotite massif / E. McPherson, M. F. Thirlwall, I. J. Parkinson, M. A. Menzies, J.-L. Bodinier [et al.] // *Chemical Geology*. – 1996. – 134(1–3). – P. 135–157. – DOI: 10.1016/S0009-2541(96)00084-8.
  21. Ludwig, K. R. User's Manual for Isoplot / EX ver. 3.6. Berkeley Geochronology Center, Special Publication. – 2008. – № 4. – 77 p.
  22. Hoaglin, D. C. Understanding robust and exploratory data analysis / D. C. Hoaglin, F. Mosteller, J. W. Tukey // *John Wiley and Sons*. – 1983. – P. 345–349.
  23. Reisberg, L. C. The Re-Os systematics of the Ronda ultramafic complex of Southern Spain / L. C. Reisberg, C. J. Allègre, J.-M. Luck // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1991. – 105. – P. 196–213.
  24. Boudier, F. Harzburgite and lherzolite subtypes in ophiolitic and oceanic environments / F. Boudier, A. Nicolas // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 1985. – 76. – P. 84–92.
  25. Dalziel, I. W. D. On the organization of American plates in the Neoproterozoic and the breakout of Laurentia // *GSA Today*. – 1992. – Vol. 2. – № 11. – P. 237–241.
  26. Stump, E. Construction of the Pacific margin of Gondwana during the Pannotios cycle. In: *Gondwana Six: Stratigraphy, sedimentology, and paleontology*. Ed. G. D. McKenzie / E. Stump // *American Geophysical Union Geophysical Monograph*. – 1987. – 41. – P. 77–87.
  27. Torsvik, T. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic – A tale of Baltica and Laurentia / T. Torsvik, M. Smethurst, J. Meert, R. Vandervoo, W. Mckerrow [et al.] // *Earth-Science Reviews*. – 1996. – 40 (3–4). – P. 229–258. – DOI: 10.1016/0012-8252(96)00008-6.

#### Благодарность (госзадание)

Авторы признательны старшим научным сотрудникам ИГГ УрО РАН О. П. Лепихиной и Н. В. Чередниченко за помощь в пробоподготовке изученного материала. Исследование выполнено в рамках реализации государственного задания ИГГ УрО РАН по теме № FUMZ-2022-0002 (номера государственной регистрации 123011800013-6 и 122022600107-1).

#### Acknowledgements (state task)

The authors thank Senior Researchers of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS O. P. Lepikhina and N. V. Cherednichenko for their assistance in sample preparation of the studied material. The studies were conducted within the theme № FUMZ-2022-0002 of the state tasks of the Institute of Geology and Geochemistry UB RAS (state registration numbers 123011800013-6 and 122022600107-1).

#### **Информация об авторах:**

**Ронкин Юрий Лазаревич** – старший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН; <http://www.igg.uran.ru/?q=ru/node/1080> (620110, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, д. 15; e-mail: y-ronkin@mail.ru).

**Чашухин Игорь Степанович** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения РАН; <http://www.igg.uran.ru/?q=ru/node/6> (620110, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, д. 15; e-mail: chashchukhin@igg.uran.ru).

#### **About the authors:**

**Yuri L. Ronkin** – Senior Researcher at the Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritskiy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <http://www.igg.uran.ru/?q=ru/node/1080> (15 Academician Vonsovskiy st., Ekaterinburg, 620110, Russian Federation; e-mail: y-ronkin@mail.ru).

**Igor S. Chashchukhin** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritskiy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <http://www.igg.uran.ru/?q=ru/node/6> (15 Academician Vonsovskiy st., Ekaterinburg, 620110, Russian Federation; e-mail: chashchukhin@igg.uran.ru).

#### **Для цитирования:**

Ронкин, Ю. Л. Лерцолитовые массивы Крака (Южный Урал): геохимия, геохронология, генезис, геодинамика / Ю. Л. Ронкин, И. С. Чашухин // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 5-17.

#### **For citation:**

Ronkin, Yu. L. Lercolitovye massivy Kraka (Yuzhnyi Ural): geohimiya, geohronologiya, genezis, geodinamika [The Kraka lherzolite massifs (Southern Urals): geochemistry, geochronology, genesis, geodynamics] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 5-17.

Дата поступления статьи: 12.12.2023

Прошла рецензирование: 27.01.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 12.12.2023

Reviewed: 27.01.2024

Accepted: 27.03.2024

## Петрология гранитов Кожимского массива (Приполярный Урал)

Ю. В. Денисова

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
yulden777@yandex.ru

### Аннотация

В работе приводятся результаты исследования гранитов Кожимского массива (Приполярный Урал), ранее объединяемого вместе с лежащим севернее Кузьпуаюским гранитным телом в общий Кожимский массив, вследствие чего многие выводы являлись обобщенными. Детальное изучение пород, включавшее анализы шлифов, аксессуарной и рудной минерализации, петрогенных и редких элементов, проведенное на базе «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН, позволило уточнить и дополнить информацию о гранитогенезе рассмотренного массива. Согласно полученным данным, исследованные породы представляют собой высококалиевые высокоглиноземистые лейкограниты нормальной и умеренной щелочности с повышенным содержанием ортоклаза, наличием плагиоклаза двух генераций. Их формирование проходило во внутриплитных геодинамических условиях с сильным воздействием постмагматических процессов в постколлизонное время из обогащенных лантаном и церием коровых материнских расплавов, для которых характерна зависимость концентраций калия и титана от изменений содержания кремнезема.

### Ключевые слова:

гранит, петрохимия, геодинамические условия образования, Кожимский массив, Приполярный Урал

### Введение

В пределах северной части Приполярного Урала развиты многочисленные магматические образования разнообразных возрастов (от раннепротерозойского до предположительно кембрийского). В частности, к рифейским интрузиям относятся пуйвинские и мороинские субвулканические образования, представленные метадолеритами и метагаббро-долеритами, а также граниты кожимского комплекса, представителем которого является Кожимский гранитный массив [1]. Кроме того, существуют предположения, что возраст массива может быть как вендским [2], так и поздневендско-раннекембрийским [3], что позволяет некоторым исследователям рассматривать породы массива как лейкограниты второй фазы сальнерско-маньхамбовского комплекса [4]. Ранее в состав Ко-

## Petrology of granites of the Kozhim massif (Subpolar Urals)

Yu. V. Denisova

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar  
yulden777@yandex.ru

### Abstract

The paper presents the study results on granites of the Kozhim massif (the Subpolar Urals). The joint Kozhim massif earlier included the Kuzpuayu granite body. It lies to the north of the Kozhim massif. For this reason, many previously obtained conclusions were summarizing. The detailed study on rocks that included analyses of cuts, accessory and ore mineralization, petrogenic and rare elements was conducted in the Geoscience subdivision at the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. This study helped to clarify and supplement the information about the granitogenesis of the considered massif. According to the obtained data, the granites under study are high-potassium high-alumina leucogranites of normal and moderate alkalinity with high content of orthoclase and the presence of plagioclase of two generations. The rocks were formed under intraplate and post-collision geodynamic conditions from crustal parent melts enriched with lanthanum and cerium. These melts are characterized by the dependence of potassium and titanium concentrations on changes in silica content.

### Keywords:

granite, petrochemistry, geodynamic conditions of formation, Kozhim massif, Subpolar Urals

жимского массива включали лежащее севернее гранитное тело [5]. Однако А. М. Пыстин и Ю. И. Пыстина [6] на основе данных геохронологического исследования установили, что северное тело, получившее название Кузьпуаюский массив, породы которого прорывают верхнерифейские отложения хобеинской и мороинской свит, является самостоятельным интрузивом и не может рассматриваться как составная часть Кожимского массива, залегающего среди отложений пуйвинской свиты среднего рифея. Учитывая, что ранее полученные выводы по петрохимии и геохимии были сделаны для разновозрастных массивов, возникла необходимость получить информацию именно для кожимских гранитов.

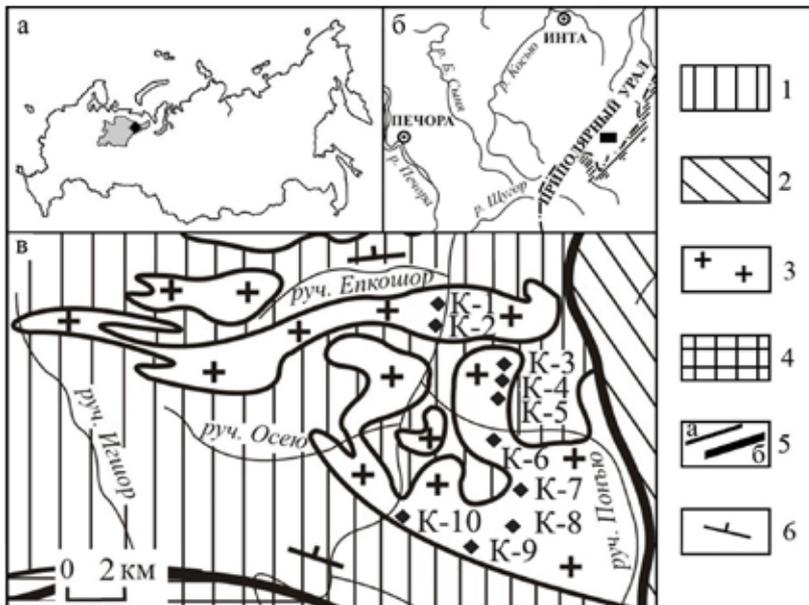


Рисунок 1. а) Карта России (выделенный регион – Республика Коми, квадрат – район исследования); б) Карта района исследований (квадрат – изученный массив); в) Кожимский гранитный массив (по [2]): 1 – слюдяно-кварцевые сланцы, ортосланцы, кварциты; 2 – слюдяно-кварцевые сланцы, порфириды, прослои мраморов и кварцитов; 3 – граниты; 4 – биотитовые и двуслюдяные гнейсы с прослоями амфиболитов; 5 – геологические границы: а – стратиграфические и магматические, б – тектонические; 6 – элементы залегания плоскостных структур. К-п (п – 1-10) – точки отбора образцов.

Figure 1. а) Map of Russia (the highlighted region is the Komi Republic (the square indicates the research area). б) Map of the research area (the square is the studied massif). в) Kozhim granite massif (according to [2]): 1 – mica-quartz shales, orthostanes, quartzites; 2 – mica-quartz shales, porphyrites, interlayers of marbles and quartzites; 3 – granites; 4 – biotite and double-mica gneisses with layers of amphibolites; 5 – geological boundaries: а – stratigraphic and magmatic, б – tectonic; 6 – elements of occurrence of planar structures. К-п (п – 1-10) – sampling points.

В настоящее время к Кожимскому массиву (рис. 1) отнесена группа изолированных гранитных тел, расположенных на левом и правом берегах Кожима в бассейнах рек Осейо и Понью. Массив рассечен с севера на юг зоной субмеридионального Кожимского надвига, граниты вблизи которого интенсивно катаклазированы, рассланцованы. Зоны рассланцевания, пересекающие граниты, ориентированы субгоризонтально, параллельно поверхности Кожимского надвига. В зоне свода Кожимской антиклинали наиболее интенсивные самые поздние смещения происходят вдоль контакта, в районе которого степень рассланцевания изученных гранитов увеличивается. Массив представляет собой межпластовую интрузию, залегающую среди зеленовато-серых мусковит-хлорит-альбит-кварцевых сланцев пуйвинской свиты, дополнительно обрамляемую ореолом маломощных согласных тел светло-серых мусковит-альбит-кварцевых сланцев.

Цель проведенного исследования гранитов Кожимского массива – выявление петрогеохимических особенностей пород и уточнение геодинамической обстановки их формирования.

## Материалы и методы

В ходе комплексного изучения гранитов Кожимского массива (Приполярный Урал), выполненного на основе 10 проб, были выявлены петрографические и петрохимические особенности породы. Изучение шлифов под

поляризационным микроскопом БиОптик СР-400 позволило провести оптическую диагностику породообразующих минералов (полевых шпатов, кварца, биотита, мусковита). Анализ акцессорной и рудной минерализации осуществляли с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6400 (аналитик А. С. Шуйский), содержание петрогенных и редких элементов определяли силикатным и ICP-MS методами соответственно (аналитики О. В. Кокшарова, Г. В. Игнатьев) на базе «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

## Петрографические особенности гранитов Кожимского массива

Кожимские граниты представляют собой среднезернистые породы розово-серого цвета с зеленовато-серым оттенком (рис. 2), основными породообразующими минералами которых являются калиевый полевой шпат (45 %), плагиоклаз (15); кварц (35); слюды – биотит (4) и мусковит (1 %).

Согласно исследованиям Л. В. Махлаева [7], отличительной особенностью рассматриваемых пород является разнообразие структур, среди которых отмечаются как неравномерно-зернистая гипидиоморфная, характеризующаяся присутствием крупных субидиоморфных вкрапленников полевых шпатов, окруженных средне- или мелкозернистыми скоплениями преимущественно неограниченных зерен кварца, полевых шпатов и чешуек слюд, так и среднезернистая аллотриоморфная, выделяющаяся наличием в среднезернистом цементе зерен минералов в несвойственной им кристаллографической форме. Необходимо также отметить, что рассмотренные граниты претерпели в той или иной степени влияние процессов катаклаза. Для некатаклазированных и умеренно катаклазированных разновидностей отмечается грубозернистая порфиридовидная структура, при которой крупные (более 10 мм) слегка уплощенные вкрапленники калиевого шпата погружены в среднезернистую слюди-кварц-полевошпатовую основную массу. В случае катаклазированных и сильно катаклазированных разновидностей устанавливаются элементы очковой структуры в виде линзовидных зерен полевого шпата в мелкозернистом кварц-биотит-полевошпатовом агрегате. Кроме того, этот исследователь установил, что массив сложен породами, относящимися, согласно классификации Б. Чаппела и А. Уайта, к гранитам А-типа.

В изучаемых автором шлифах основным породообразующим минералом, занимающим почти половину от всего объема породы, является калиевый полевой шпат, представленный ортоклазом, который может быть как оптически однородным, так и пронизан пертитовыми вростками. Трещины в минерале, проявившиеся при воздействии ка-

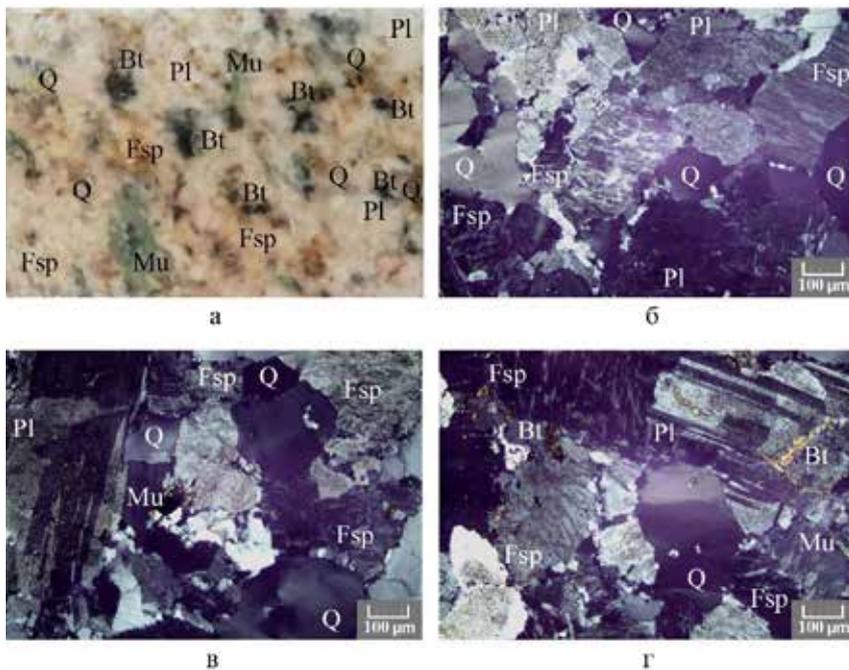


Рисунок 2. Фотографии аншлифа (а) и шлифов (б-г, с анализатором) гранитов Кожимского массива. Породообразующие минералы: Pl – плагиоклаз, Fsp – щелочной полевой шпат, Q – кварц, Bt – биотит. Figure 2. Photos of anisotropy (a) and sections (б-г, with analyzer) of granites of the Kozhim massif. Rock-forming minerals: Pl – plagioclase, Fsp – alkaline feldspar, Q – quartz, Bt – biotite.

таклаза, обычно заполнены вторичным альбитом. Вторая разновидность полевого шпата характеризуется наличием двух генераций минерала. Плагиоклаз первого типа, отнесенный к магматической стадии развития породы, встречается в виде вкрапленников и гипидиоморфных зерен, которые по анортитовому компоненту (от 8 до 15 %) относятся к альбиту и олигоклазу. Плагиоклаз второго типа, рассматриваемый как метасоматический, наблюдается в виде альбитовых жилок, секущих порфировых вкрапленников, линз в зоне наложенной перекристаллизации. Кварц, кристаллизующийся после основной массы полевого шпата, заполняет оставшиеся пространства в породе, что приводит к образованию ксеноморфных зерен минерала, размером, не превышающим 2 мм. Главный слюдястый минерал рассматриваемой породы – биотит, отмечаемый преимущественно в виде небольших (до 0.5 мм) скоплений темно-зеленых пластинок в основной массе породы. Ко вторичной разновидности слюды относится мусковит, светло-зеленые чешуйки которого можно наблюдать в виде включений во вкрапленниках ортоклаза. Исследование аншлифов породы выявило наличие ряда аксессуарных минералов, наиболее типичными среди них являются циркон, апатит и титанит. Так, можно наблюдать алланит, флюорит, гранат и монацит. Циркон, являющийся наиболее распространенным аксессуарным минералом для кожимских гранитов, отмечен преимущественно в виде прозрачных бесцветных короткопризматических кристаллов с размером зерен до 0.15 мм и коэффициентом удлинения до 2.0. Апатит представлен обычно светло-желтыми полупрозрачными удлиненными кристаллами гексагонального дипирамидально-призматического габитуса, размер которых не превышает 0.4 мм при коэффициенте удлинения до 3.5. Титанит наблюдает-

ся в виде полупрозрачных желтоватых кристаллов (размером до 0.3 мм) с неровными сглаженными гранями. Рудные минералы представлены преимущественно магнетитом, ильменитом, пиритом, молибденитом, также отмечаются пирротин, халькопирит, галенит и сфалерит. Магнетит представлен обломками (до 0.4 мм) кристаллов черного цвета с металлическим блеском. Ильменит встречается в виде коричневатых-черных зерен (до 0.6 мм) неправильной формы с металлическим блеском и раковистым изломом. Пирит образует правильные хорошо ограненные кристаллы (до 0.3 мм) кубического габитуса характерного золотого цвета. Молибденит присутствует в виде темно-серых чешуек (до 0.3 мм) с металлическим блеском неправильной формы.

### Петрогеохимические особенности гранитов Кожимского массива

Изучение данных силикатного анализа, проведенного для гранитов Кожимского массива (табл. 1), показало, что содержание маркерных петрогенных элементов ( $\text{SiO}_2$  – от 75.89 до 78.12 мас. %,  $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$  – от 7.17 до 8.32 мас. %) указывает на лейкократовую разновидность породы. Это подтверждается TAS-диаграммой [8], на которой видно, что рассмотренные породы относятся к двум типам лейкогранитов: нормальной и умеренной щелочности (рис. 3).

Анализ содержаний главных щелочных металлов с учетом диаграмм щелочности С. Р. Тейлора [9] (рис. 4, а, б) позволил сделать вывод, что рассмотренные породы по содержанию  $\text{K}_2\text{O}$  являются преимущественно высококалиевыми образованиями. Между кремнеземом и калием отмечена умеренная прямая линейная связь (коэффициент корреляции составляет 0.56). Установленное уравнение парной линейной регрессии указывает, что повышение концентрации содержания  $\text{SiO}_2$  в материнском расплаве на 1 мас. % приводит к увеличению содержания  $\text{K}_2\text{O}$  на 0.42 мас. %. Согласно индикаторному отношению  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  граниты Кожимского массива относятся к калиево-натриевому типу пород. Между маркерным отношением и кремнеземом также отмечается умеренная прямая линейная связь (коэффициент корреляции составляет 0.66). В этом случае увеличение содержания  $\text{SiO}_2$  на 1 мас. % приведет к увеличению  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  в среднем на 0.26 мас. %. Анализ закономерностей взаимосвязи между петрогенными компонентами и кремнеземом выявил единственную сильную линейную связь между кремнеземом и оксидом титана (коэффициент корреляции составляет -0.80). Диаграмма А. Харкера [10] наглядно демонстрирует, что большая часть фигуративных точек составов гранитов сконцентрировалась вдоль расчетной линии регрессии (рис. 4, в), согласно уравнению которой при увеличении содержания  $\text{SiO}_2$  на 1 мас. % содержание

Содержания петрогенных элементов в гранитах Кожимского массива, мас. %

Table 1

Contents of petrogenic elements in granites of the Kozhim massif, wt. %

Компонент	Номер пробы										Среднее
	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-6	K-7	K-8	K-9	K-10	
SiO <sub>2</sub>	77.78	76.89	75.95	75.89	76.49	78.12	77.54	76.26	77.48	76.95	76.94
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.22	0.48	0.52	0.48	0.11	0.24	0.42	0.31	0.59	0.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.88	11.95	12.69	12.52	10.05	11.34	11.78	12.22	11.09	10.92	11.64
FeO	1.72	1.29	1.15	1.24	0.56	0.50	0.59	0.62	0.61	1.03	0.93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.84	1.12	0.52	1.05	0.92	1.21	0.87	1.02	0.89	0.56	0.90
MnO	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.04	0.03	0.03	0.02
MgO	0.16	0.25	0.17	0.33	0.38	0.39	0.18	0.29	0.19	0.18	0.25
CaO	0.31	0.29	0.22	0.38	0.59	0.28	0.45	0.42	0.37	0.51	0.38
Na <sub>2</sub> O	3.65	3.33	4.22	4.02	3.08	3.15	3.22	4.51	3.01	3.89	3.61
K <sub>2</sub> O	3.88	4.51	4.09	3.89	4.15	5.17	4.99	3.78	4.65	3.28	4.24
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02
ппп	0.05	0.29	0.59	0.15	0.75	0.62	0.39	0.98	1.02	1.23	0.61
Σ	100.46	100.17	100.10	100.02	97.50	100.92	100.28	100.57	99.68	99.19	-
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.07	0.09	0.10	0.11	0.12	0.13	0.09	0.02	0.05	0.06	0.08
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.06	1.35	0.97	0.97	1.35	1.64	1.55	0.84	1.54	0.84	-
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.53	7.84	8.31	7.91	7.23	8.32	8.21	8.29	7.66	7.17	-
Ka	0.63	0.66	0.65	0.63	0.72	0.73	0.70	0.68	0.69	0.66	0.68
al'	4.37	4.49	6.90	4.78	5.40	5.40	7.18	6.33	6.56	6.16	5.76
Kf	0.91	0.84	0.87	0.79	0.60	0.56	0.77	0.68	0.76	0.85	0.76

Примечание. Содержания элементов получены силикатным методом в «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик О. В. Кожшарова).

Note. Petrogenic elements were isolated using the silicate method in the Centre for Collective Use "Science" at the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (analyst O. V. Koksharova).

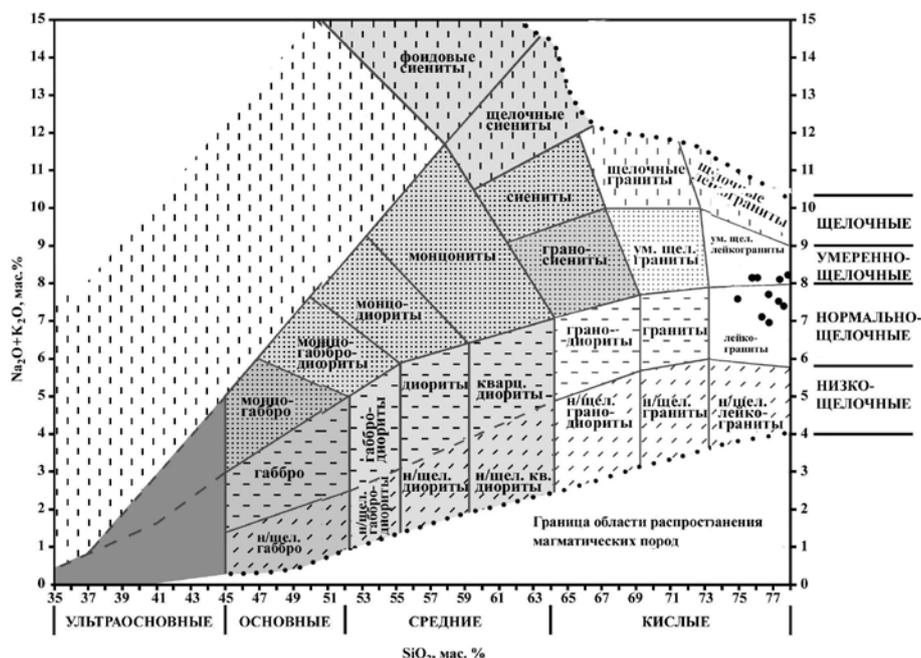


Рисунок 3. TAS-диаграмма для химической классификации плутонических горных пород с позицией точек состава гранитов Кожимского массива.

Figure 3. TAS diagram for the chemical classification of plutonic rocks with the position of composition points of granites of the Kozhim massif.

TiO<sub>2</sub> в гранитах уменьшится на 0.17 мас. %. Коэффициенты корреляции, определяющие взаимосвязь между кремнеземом и другими главными элементами, значительно меньше ( $r(\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3) = -0.36$ ;  $r(\text{SiO}_2, \text{MgO}) = 0.12$ ;  $r(\text{SiO}_2, \text{CaO}) = -0.12$ ;  $r(\text{SiO}_2, \text{MnO}) = -0.12$ ;  $r(\text{SiO}_2, \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3) = 0$ ).

о наибольшем количестве безводных силикатов, сформировавшихся на завершающей стадии магматического этапа [11–13].

Анализ данных ICP-MS метода (табл. 2) с использованием индикаторных отношений и нормирования содержания редких элементов по хондриту [14] и по примитивной

По величине коэффициента глиноземистости ( $al' = \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})$ : 5.76 (4.37–7.18)) граниты Кожимского массива представляют собой весьма высокоглиноземистые породы, так как все коэффициенты находятся в диапазоне от 2 до 10. Для точки отбора пробы К-7 отмечается наибольшее значение  $al' = 7.18$ . Коэффициент агаитности ( $Ka = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / \text{Al}_2\text{O}_3$ : 0.68 (0.63–0.73)), значения которого не превышают 1, указывает не только на преобладание глинозема над общим количеством щелочных металлов, но и на концентрацию всего количества калия и натрия в полевых шпатах при образовании породы. Максимальный коэффициент железистости ( $Kf = \text{FeO} / (\text{FeO} + \text{MgO})$ : 0.76 (0.56–0.91)), наблюдаемый в пробе К-1, позволяет говорить

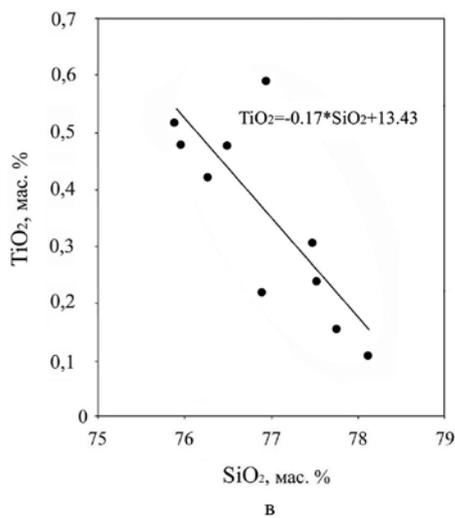
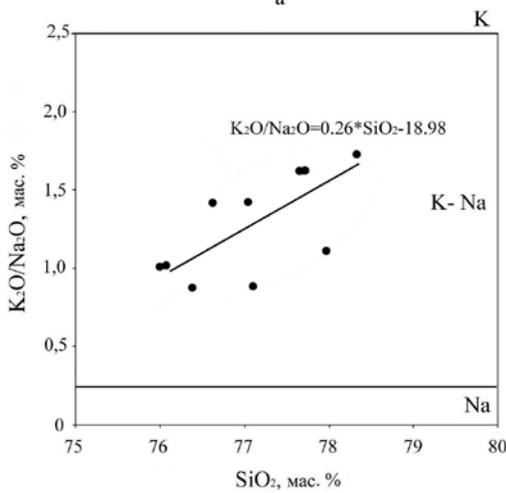
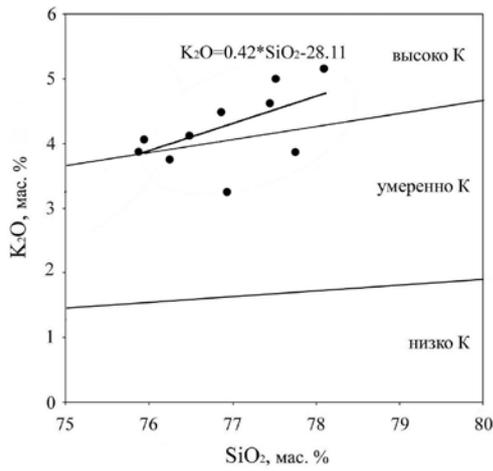


Рисунок 4. Выборочные диаграммы С. Р. Тейлора (а, б) и А. Харкера (в) для гранитов Кожимского массива.

Условные обозначения: а) высоко К – высококалиевый, умеренно К – умеренно калиевый, низко К – низкокалиевый тип; б) К-Na – калиево-натриевый, Na – натриевый тип.

Figure 4. Sample diagrams of S. R. Taylor (a, b) and A. Harker (v) for granites of the Kozhim massif.

Keys: а) высоко К – high potassium; умеренно К – moderate potassium; низко К – low potassium type; б) К-Na – potassium-sodium; Na – sodium type.

мантии [15] (табл. 3) позволил выявить геохимические особенности гранитов Кожимского массива.

Для всех изучаемых образцов характерно преобладание легких редкоземельных элементов над тяжелыми, причем наиболее явно это выражено в образце К-1, характеризующем особенности северо-восточной части Кожимского массива, что подтверждается индикаторным отношением La/Yb, отклоняющимся от среднего значения на +76.06 %. Европиевый дефицит, характеризующий активное удаление полевых шпатов в процессе преобразования материнского расплава в результате фракционной кристаллизации [16], равномерен по всему объему рассмотренного массива, что подтверждается достаточно узким диапазоном значений от 0.7 до 0.12 и в среднем 0.09. Наименьшая величина отношения Eu/Eu\* наблюдается для образца К-1 (превышение от среднего на 33.33 %).

В работе Л. П. Рихванова с коллегами [17] показано, что с помощью торий-уранового отношения можно определить степень воздействия (высокая при Th/U<1) процессов метасоматоза на породу. В случае же магматических

Таблица 2

Содержания редких элементов в гранитах Кожимского массива, г/т

Table 2

Contents of rare elements in granites of the Kozhim massif, ppm

Элемент	Номер пробы					Среднее
	К-1	К-2	К-4	К-6	К-9	
Rb	113.47	149.22	146.78	152.56	148.52	142.11
Ba	448.17	348.98	321.88	352.56	322.56	358.83
Th	13.73	13.89	11.78	14.23	11.26	12.98
Ta	1.56	1.79	1.45	1.86	1.43	1.62
Nb	18.58	22.44	30.87	22.36	31.75	25.20
Hf	3.38	4.88	3.67	3.78	4.45	4.03
Zr	60.62	99.77	82.23	102.23	88.15	86.60
Y	27.89	35.22	39.02	35.11	38.89	35.23
U	1.86	2.87	2.89	2.89	3.01	2.70
Sr	42.52	45.12	38.11	39.15	43.02	41.58
La	36.08	33.02	33.92	32.59	33.58	33.84
Ce	74.95	62.15	59.16	64.89	58.88	64.01
Pr	8.56	7.22	6.89	7.59	6.59	7.37
Nd	32.86	30.05	27.15	29.58	25.48	29.02
Sm	6.66	8.02	9.45	7.91	9.89	8.39
Eu	0.77	0.71	0.62	0.68	0.59	0.67
Gd	6.4	7.77	7.12	7.89	7.16	7.27
Tb	1.11	1.39	1.31	1.46	1.29	1.31
Dy	7.17	8.78	8.06	8.89	7.89	8.16
Ho	1.5	1.72	1.59	1.73	1.45	1.60
Er	4.65	5.88	5.11	5.71	4.89	5.25
Tm	0.71	0.88	0.72	0.85	0.68	0.77
Yb	4.77	5.22	7.89	5.02	8.29	6.24
Lu	0.69	0.69	0.65	0.75	0.62	0.68
Eu/Eu*	0.12	0.09	0.08	0.09	0.07	0.09
La/Yb	7.56	6.33	4.30	6.49	4.05	5.75
Th/U	7.38	4.84	4.08	4.92	3.74	4.99
Y/Nb	1.50	1.57	1.26	1.57	1.22	1.43

Примечание. Содержания элементов определены методом ICP-MS в «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (аналитик Г. В. Игнатьев).  
Note. Contents of elements were evaluated by the ICP-MS method in the Centre for Collective Use "Science" at the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (analyst G. V. Ignatyev).

Таблица 3  
 Нормирование по хондриту и примитивной мантии, г/г  
 Table 3  
 Normalization by chondrite and primitive mantle, ppm

Элемент	Среднее	Хондрит [14]	Примитивная мантия [15]	Нормализованные средние данные	
				по [14]	по [15]
Rb	142.11	-	0.635	-	223.80
Ba	358.83	-	6.989	-	51.34
Th	12.98	-	0.085	-	152.71
Ta	1.62	-	0.041	-	39.51
Nb	25.2	-	0.713	-	35.34
Hf	4.03	-	0.309	-	13.04
Zr	86.6	-	11.2	-	7.73
Y	35.23	-	4.55	-	7.74
U	2.7	-	0.021	-	128.57
Sr	41.58	-	21.1	-	1.97
La	33.84	0.24	0.687	141.00	49.26
Ce	64.01	0.61	1.775	104.93	36.06
Pr	7.37	0.09	0.276	81.89	26.70
Nd	29.02	0.46	1.354	63.09	21.43
Sm	8.39	0.15	0.444	55.93	18.90
Eu	0.67	0.06	0.168	11.17	3.99
Gd	7.27	0.21	0.596	34.62	12.20
Tb	1.31	0.04	0.108	32.75	12.13
Dy	8.16	0.25	0.737	32.64	11.07
Ho	1.6	0.06	0.0566	26.67	28.27
Er	5.25	0.17	0.1655	30.88	31.72
Tm	0.77	0.03	0.0255	25.67	30.20
Yb	6.24	0.17	0.17	36.71	36.71
Lu	0.68	0.03	0.0254	22.67	26.77

пород индикаторный диапазон этого отношения будет составлять 2.5–5. Хотя существуют и другие примеры [18, 19]. Величины Th/U-отношения для всех проб гранитов Кожимского массива превышают значение 3.74, что является свидетельством очень слабого процесса метасоматоза на изученную породу. В образце К-1 отмечается самое высокое значение Th/U=7.38, что значительно превышает верхнюю планку характерного диапазона (отклонение от среднего значения данного отношения составляет 67.61%). Содержание урана в этой точке наименьшее по массиву (отклонение от среднего содержания U по массиву – 45.16%). Вынос некоторого количества более подвижного урана может быть связан с воздействием гидротермальных флюидов. Иттрий-ниобиевое отношение позволяет установить тип материнского источника, который можно рассматривать как коровый при Y/Nb>1.2 [20]. В нашем случае все значения, полученные при расчете маркерного отношения, выполняют данное неравенство, что указывает на коровый тип кожимских гранитов.

Нормализация по хондриту подтверждает, что изученные граниты обогащены редкоземельными элементами (преимущественно легкой группы). Наиболее повышенные концентрации характерны для элементов

La и Ce, максимальные значения которых наблюдаются в точке К-1. Нормирование избранных элементов относительно примитивной мантии указывает на высокие содержания Rb и Th, отмечается в виде положительных аномалий не только этих элементов, но и урана на соответствующем графике (рис. 5).

#### Геодинамические условия образования гранитов Кожимского массива

Имеющиеся данные по содержаниям петрогенных и редких элементов также позволяют оценить предполагаемую геодинамическую обстановку формирования кожимских гранитов. Одной из основных петрохимических диаграмм, по мнению автора, является диаграмма Д. Папу [21]. Потери главных элементов при воздействии наложенных процессов минимальны, что позволяет рассматривать схему, базирующуюся на содержаниях кремнезема и глинозема, как информативную. На данной диаграмме (рис. 6, а) фигуративные точки гранитов Кожимского массива лежат в поле пород континентальных рифтов или внутриплитных образований. Это согласуется с предположением Л. В. Махлаева [7] об образовании массива при внутриплитной обстановке. Диаграмма Н. Б. Харриса [22] (рис. 6, б) указывает на иной геодинамический режим при становлении массива. По содержаниям Rb, Та и Hf кожимские граниты отвечают постколлизонным образованиям. Положение на диаграммах Дж. А. Пирса [23] (рис. 7) указывает на внутриплитовую природу гранитов. Незначительное отклонение фигуративных точек в поле островодужных гранитов может свидетельствовать об аккумуляции плагиоклаза.

Несколько позже Дж. А. Пирсом [24] в диаграмму, основанную на содержаниях Rb, Y и Nb, было предложено добавить область постколлизонных гранитов, в которой, согласно обновленной диаграмме, оказались наши фигуративные точки. Это несколько изменило наши представления. Такое положение точек составов кожимских гранитов может указывать на сильное влияние постмагматических процессов, что подтверждает предположение А. М. Пыстина [6] о процессах ремобилизации в исходных гранитах.

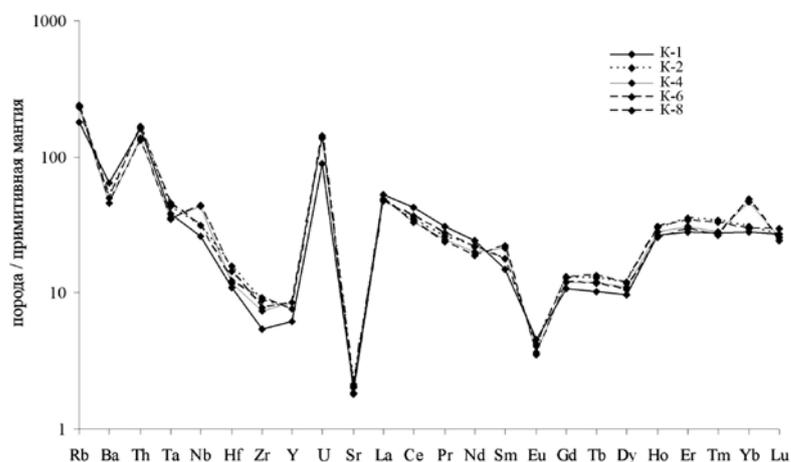


Рисунок 5. Содержания редких элементов в гранитах Кожимского массива, нормализованных по примитивной мантии.  
 Figure 5. Contents of rare elements in granites of the Kozhim massif normalized by the primitive mantle.

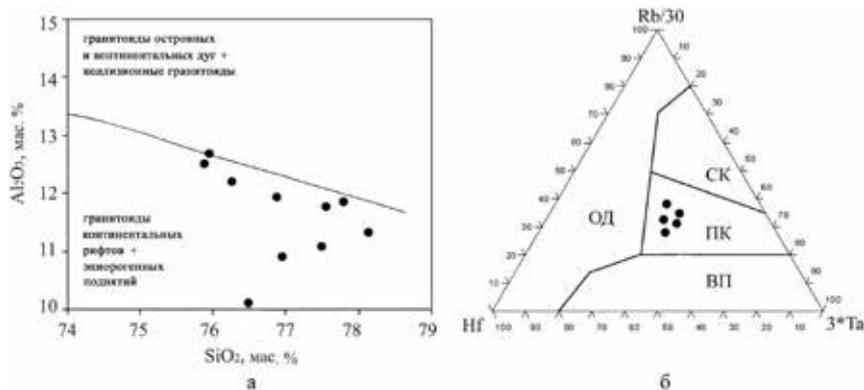


Рисунок 6. Диаграммы Д. Папу (а) и Н. Б. Харриса (б) для гранитов Кожимского массива: СК – синколлизийные, ВП – внутриплитовые, ОД – островодужные, ПК – постколлизийные граниты.  
Figure 6. Diagrams by D. Papu (a) and N. B. Harris (b) for granites of the Kozhim massif: SK – syncollisional granites, ВП – intraplate granites, ОД – island-arc granites, ПК – postcollisional granites.

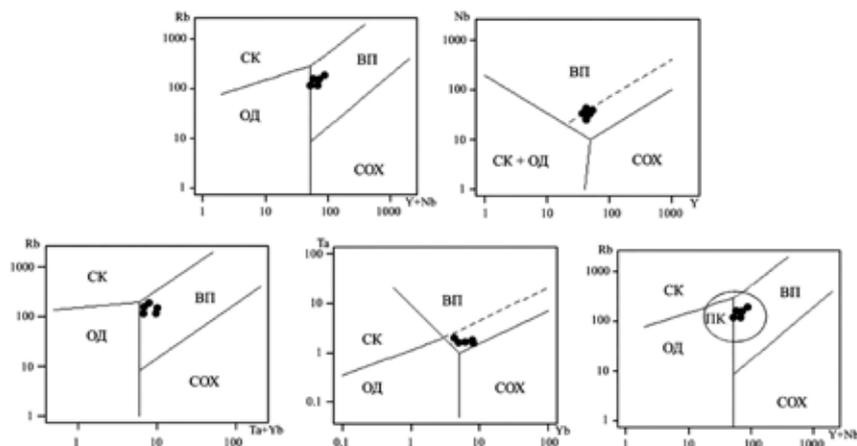


Рисунок 7. Диаграммы Дж. А. Пирса для гранитов Кожимского массива: СК – синколлизийные, ПК – постколлизийные, ВП – внутриплитовые, ОД – островодужные, COX – граниты срединно-океанических хребтов.  
Figure 7. Diagrams by J. A. Pearce for granites of the Kozhim massif: SK – syncollisional; ПК – postcollisional, ВП – intraplate, ОД – island-arc, COX – granites of mid-oceanic ridges.

## Заключение

Комплексное изучение пород Кожимского массива (Приполярный Урал), включающее в себя петрографические, петрохимические и геохимические исследования, показало, что граниты представляют собой среднезернистые породы розово-серого цвета с зеленовато-серым оттенком, характеризующиеся повышенным содержанием ортоклаза, наличием плагиоклаза как в виде альбитовых и олигоклазовых вкрапленников, так и в виде поздних прожилков вторичного альбита. По соотношению  $SiO_2$ , щелочей и глинозема породы данного массива являются высококалийными высокоглиноземистыми лейкогранитами нормальной и умеренной щелочности, относящимися к калиево-натриево-типу. Граниты образовались из обогащенных преимущественно лантаном и церием коровых материнских расплавов, для которых характерна зависимость концентраций калия и титана от изменений содержания кремнезема.

Становление Кожимского массива проходило при внутриплитных геодинамических условиях одновременно с процессами континентального рифтогенеза на начальных стадиях заложения Протоуралид-Тиманид [1]. Впоследствии в ходе субдукционно-коллизийного

и постколлизийного этапов Протоуралид-Тиманид породы изученного массива претерпели сильное воздействие постмагматических процессов, что указывает на более сложную историю образования массива, чем предполагалось М. В. Фишманом, его коллегами и Л. В. Махлаевым [5, 7].

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Голдин, Б. А. Магматические формации западного склона севера Урала и их минерагения / Б. А. Голдин, Е. П. Калинин, В. Н. Пучков. – Сыктывкар : Коми НЦ УрО РАН, 1999. – 213 с.
2. Пыстин, А. М. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры / А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина // Литосфера. – 2008. – № 11. – С. 25-38.
3. Иванов, В. Н. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 2 000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка / В. Н. Иванов, Т. Б. Жаркова, И. Ю. Курзанов [и др.]. – Москва : МФ ВСЕГЕИ, 2013. – 252 с.
4. Удоратина, О. В. Гранитоиды Кожимского массива (Приполярный Урал): U-Pb, Lu-Hf данные / О. В. Удоратина, А. С. Шуйский, В. А. Капитанова // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2020. – № 1 (41). – С. 96-105. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-1-96-105.
5. Фишман, М. В. Гранитоиды центральной части Приполярного Урала / М. В. Фишман, Б. А. Голдин. – Москва-Ленинград : АН СССР, 1963. – 105 с.
6. Пыстин, А. М. Новые данные о возрасте гранитоидов Приполярного Урала в связи с проблемой выделения кожимской среднерифейской гранит-риолитовой формации / А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2011. – № 4 (8). – С. 73-78.
7. Махлаев, Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал) / Л. В. Махлаев. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 189 с.
8. Шарпенко, Л. Н. TAS-диаграмма сумма щелочей – кремнезем для химической классификации и диагностики plutonических пород / Л. Н. Шарпенко, А. Е. Костин, Е. А. Кухаренко // Региональная геология и металлогения. – 2013. – № 56. – С. 40-50.
9. Taylor, S. R. The continental crust : Its composition and evolution / S. R. Taylor, S. M. McLennan // Blackwell, Oxford, 1985. – P. 1-312.

10. Harker, A. The natural history of igneous rocks / A. Harker. – Methuen. London, 1909. – 452 p. DOI: 10.1017/CBO9780511920424.
11. Ефремова, С. В. Петрохимические методы исследования горных пород / С. В. Ефремова, К. Г. Стафеев. – Москва : Недра, 1985. – 512 с.
12. Кузнецов, Н. Б. Доордовикские гранитоиды Тимано-Уральского региона и эволюция протииуралитид – тимаид / Н. Б. Кузнецов, А. А. Соболева, О. В. Удоратина, М. В. Герцева. – Сыктывкар : Геопринт, 2005. – 100 с.
13. Удоратина, О. В. Гранитоиды севера Урала: геохронология, эволюция, источники / О. В. Удоратина, К. В. Куликова, А. С. Шуйский, А. А. Соболева, В. Л. Андреичев [и др.]. – Сыктывкар : ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2022. – 120 с.
14. Sun, S. S. Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle / S. S. Sun // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1982. – Vol. 46. – P. 179–192.
15. McDonough, W. F. The composition of the Earth / W. F. McDonough, S. S. Sun // *Chemical Geology*. – 1995. – Vol. 120. – P. 223–253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.
16. Балашов, Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов / Ю. А. Балашов. – Москва : Наука, 1976. – 267 с.
17. Рихванов, Л. П. Радиогеохимические методы поисков месторождений нефти и газа / Л. П. Рихванов, И. С. Соболев, Н. Г. Лященко // *Прикладная геохимия*. – 2002. – № 3. – С. 383–394.
18. Hoskin, P. W. O. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis / P. W. O. Hoskin, U. Schaltegger // *Rev Mineral Geochem*. – 2003. – Vol. 53. – P. 27–62.
19. Rubatto, D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism / D. Rubatto // *Chemical Geology*. – 2002. – Vol. 184. – P. 123–138, DOI : 10.1016/S0009-2541(01)00355-2.
20. Eby, G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications / G. N. Eby // *Geology*. – 1992. – Vol. 20. – P. 641–644.
21. Papu, D. Tectonic discrimination of granitoids / D. Papu, M. Piccoli, P. Piccoli // *Bull. 396. Geol. Soc. Amer.* – 1989. – Vol. 101. – P. 635–643.
22. Harris, N. B. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism / N. B. Harris, J. A. Pearce, A. G. Tindle // *Geol. Soc. Sp. Publ.* – 1986. – Vol. 19. – P. 67–81.
23. Pearce, J. A. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks / J. A. Pearce, V. B. W. Harris, A. G. Tindle // *J. Petrol.* – 1984. – Vol. 25. – P. 956–983.
24. Pearce, J. A. Sources and settings of granitic rocks / J. A. Pearce // *Episodes Journal of International Geoscience*. – 1996. – Vol. 19 (4). – P. 120–125.
3. Ivanov, V. N. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1 : 2 000. North Ural series. List Q-41-XXV. Explanatory note. – V. N. Ivanov, T. B. Zharkova, I. Yu. Kurzanov [et al.]. – Moscow : MF VSEGEI, 2013. – 252 p.
4. Udoratina, O. V. Granitoidy Kozhimskogo massiva (Pripolyarnyj Ural) : U-Pb, Lu- Hf dannye [Granitoids of the Kozhim massif (Subpolar Urals): U-Pb, Lu-Hf data] / O. V. Udoratina, A. S. Shuyskiy, V. A. Kapitanova // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. – 2020. – № 1 (41). – P. 96–105. DOI: 10.19110/1994-5655-2020-1-96-105.
5. Fishman, M. V. Granitoidy central'noj chasti Pripolyarnogo Urala [Granitoids of the central part of the Subpolar Urals] / M. V. Fishman, B. A. Goldin. – Moscow; Leningrad : AS USSR, 1963. – 105 p.
6. Pystin, A. M. Novye dannye o vozraste granitoidov Pripolyarnogo Urala v svyazi s problemoj vydeleniya kozhimskoj srednerifejskoj granit-riolitovoj formacii [New data on the age of granitoids of the Subpolar Urals in view of the identification problem of the Kozhim Middle Riphaean granite-rhyolite formation] / A. M. Pystin, Yu. I. Pystina // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. – 2011. – № 4(8). – P. 73–78.
7. Makhlaev, L. V. Granitoidy severa Central'no-Ural'skogo podnyatiya (Polyarnyj i Pripolyarnyj Ural) [Granitoids of the North of the Central Ural uplift (Polar and Subpolar Urals)]. – L. V. Makhlaev. – Ekaterinburg : UB RAS, 1996. – 189 p.
8. Sharpenok, L. N. TAS-diagramma summa shchelochej – kremnezem dlya himicheskoj klassifikacii i diagnostiki plutonicheskikh porod [TAS-diagram sum of alkali - silica for chemical classification and diagnostics of plutonic rocks] / L. N. Sharpenok, A. E. Kostin, E. A. Kukharensko // *Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]*. – 2013. – № 56. – P. 40–50.
9. Taylor, S. R. The continental crust : Its composition and evolution / S. R. Taylor, S. M. McLennan // *Blackwell, Oxford*, 1985. – P. 1–312.
10. Harker, A. The natural history of igneous rocks / A. Harker. – Methuen. London, 1909. – 452 p. DOI: 10.1017/CBO9780511920424.
11. Ефремова, С. В. Петрохимические методы исследования горных пород [Petrochemical study methods of rocks] / С. В. Ефремова, К. Г. Стафеев. – Москва : Недра, 1985. – 512 с.
12. Кuznetsov, N. B. Doordovikskie granitoidy Timano-Ural'skogo regiona i evolyuciya protiiuralid-timanid [Pre-Ordovician granitoids of the Timan-Ural region and the evolution of protiiuralids-timanids] / N. B. Kuznetsov, A. A. Soboлева, O. V. Udoratina, M. V. Gertseva. – Сыктывкар : Геопринт, 2005. – 100 p.
13. Udoratina, O. V. Granitoidy severa Urala: geohronologiya, evolyuciya, istochniki [Granitoids of the Northern Urals: geochronology, evolution, sources] / O. V. Udoratina, K. V. Kulikova, A. S. Shuisky, A. A. Soboлева, V. L. Andreichev

## References

1. Goldin, B. A. Magmatichekie formacii zapadnogo sklona severa Urala i ih minerageniya [Magmatic formations of the western slope of the Northern Urals and their minerageny] / B. A. Goldin, E. P. Kalinin, V. N. Puchkov. – Сыктывкар, Komi SC UB RAS, 1999. – 213 p.
2. Pystin, A. M. Metamorfizm i granitoobrazovanie v prote-rozojsko- rannepaleozojskoj istorii formirovaniya Pripol-

- [et al.]. – Syktyvkar : Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2022. – 120 p.
14. Sun, S. S. Chemical composition and origin of the Earth's primitive mantle / S. S. Sun // *Geochim. Cosmochim. Acta*. – 1982. – Vol. 46. – P. 179–192.
  15. McDonough, W. F. The composition of the Earth / W. F. McDonough, S. S. Sun // *Chemical Geology*. – 1995. – Vol. 120. – P. 223–253. DOI: 10.1016/0009-2541(94)00140-4.
  16. Balashov, Yu. A. Geohimiya redkozemel'nyh elementov [Geochemistry of rare earth elements] / Yu. A. Balashov. – Moscow : Nauka, 1976. – 267 p.
  17. Rikhvanov, L. P. Radiogeohimicheskie metody poiskov mestorozhdenij nefiti i gaza [Radiogeochemical methods of prospecting oil and gas deposits] / L. P. Rikhvanov, I. S. Sobolev, N. G. Lyashchenko // *Prikladnaya geohimiya [Applied Geochemistry]*. – 2002. – № 3. – P. 383–394.
  18. Hoskin, P. W. O. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis / P. W. O. Hoskin, U. Schaltegger // *Rev Mineral Geochem*. – 2003. – Vol. 53. – P. 27–62.
  19. Rubatto, D. Zircon trace element geochemistry : Partitioning with garnet and the link between U–Pb ages and metamorphism / D. Rubatto // *Chemical Geology*. – 2002. – Vol. 184. – P. 123–138, DOI : 10.1016/S0009-2541(01)00355-2.
  20. Eby, G. N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications / G. N. Eby // *Geology*. – 1992. – Vol. 20. – P. 641–644.
  21. Papu, D. Tectonic discrimination of granitoids / D. Papu, M. Piccoli, P. Piccoli // *Bull. 396. Geol. Soc. Amer.* – 1989. – Vol. 101. – P. 635–643.
  22. Harris, N. B. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism / N. B. Harris, J. A. Pearce, A. G. Tindle // *Geol. Soc. Sp. Publ.* – 1986. – Vol. 19. – P. 67–81.
  23. Pearce, J. A. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks / J. A. Pearce, V. B. W. Harris, A. G. Tindle // *J. Petrol.* – 1984. – Vol. 25. – P. 956–983.
  24. Pearce, J. A. Sources and settings of granitic rocks / J. A. Pearce // *Episodes Journal of International Geoscience*. – 1996. – Vol. 19 (4). – P. 120–125.

#### Благодарность (госзадание)

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы», ГР № 122040600012-2.

#### Acknowledgements (state task)

The work was carried out within the frames of the state task of the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS “Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism and isotopic geochronology of the Timan-North Urals segment of the lithosphere”, state registration № 122040600012-2.

#### Информация об авторе:

**Денисова Юлия Вячеславовна** – младший научный сотрудник лаборатории региональной геологии Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: yulden777@yandex.ru).

#### About the author:

**Yulia V. Denisova** – Junior Researcher at the Laboratory of Regional Geology of the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: yulden777@yandex.ru).

#### Для цитирования:

Денисова, Ю. В. Петрология гранитов Кожимского массива (Приполярный Урал) / Ю. В. Денисова // *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле»*. – 2024. – № 3 (69). – С. 18–26.

#### For citation:

Denisova, Yu. V. Petrologiya granitov Kozhimskogo massiva (Pripolyarnyj Ural) [Petrology of granites of the Kozhim massif (Subpolar Urals)] / Yu. V. Denisova // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”*. – 2024. – № 3 (69). – P. 18–26.

Дата поступления статьи: 06.03.2024

Прошла рецензирование: 10.04.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 06.03.2024

Reviewed: 10.04.2024

Accepted: 27.03.2024

# Парагнейсы няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты (Приполярный Урал): метаморфизм, минеральные и структурные особенности

К. С. Попвасев, И. Л. Потапов

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар

kspopvasev@geo.komisc.ru  
ilpotapov@geo.komisc.ru

## Аннотация

Приведены минеральные и структурные особенности парагнейсов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты. Рассчитаны PT-параметры минеральных равновесий второго и третьего этапов метаморфизма с использованием компьютерных программ методами классической и мультиравновесной термобарометрии. В совокупности с микроструктурными особенностями подтверждено проявление в рассматриваемых породах трех самостоятельных тектоно-метаморфических этапов: первый устанавливается по распространению тесно сжатых и изоклинальных складок в парагенезисе со сланцеватостью первой генерации и реликтовым минералам, отсутствующим в вышележащих (верхнерифейских) отложениях. Второй этап – прогрессивный метаморфизм уровня эпидот-амфиболитовой фации (пик метаморфизма  $T=606-527$  °C,  $P=8.8-7.9$  кбар), сопровождающийся распространением асимметричных подобных складок в парагенезисе с кливажем-сланцеватостью. Третий этап (диафторез) проявлен в парагнейсах развитием вторичных изменений. Температурный диапазон кристаллизации хлоритов соответствует уровню фации зеленых сланцев ( $T=285-232$  °C).

## Ключевые слова:

Приполярный Урал, метаморфизм, парагнейсы, PT-условия, складки

## Введение

Докембрийский разрез, включающий няртинский метаморфический комплекс, маньхобеинскую, шокурьинскую, пуйвинскую, хобеинскую, мороинскую, саблегорскую свиты, обнажается в северной части Ляпинского антиклинория (Хобеизская антиклиналь) на Приполярном Урале и считается стратотипическим для Тимано-Североуральского региона (рис. 1). Систематические исследова-

# Paragneisses of the Nyartinskiy metamorphic complex and the Mankhobeinskaya suite (Subpolar Urals): metamorphism, mineral and structural properties

K. S. Popvasev, I. L. Potapov

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar

kspopvasev@geo.komisc.ru  
ilpotapov@geo.komisc.ru

## Abstract

The paper discusses mineral and structural properties of paragneisses of the Nyartinskiy complex and the Mankhobeinskaya suite. The PT-parameters of mineral equilibria of the second and third metamorphism stages have been estimated using the computer programs by the classical and multi-equilibrium mineral thermobarometry methods. By the microstructural parameters, the study rocks undergo three independent tectonic-metamorphic stages. The first stage is acknowledged by the presence of strongly compact and isoclinal folds in the paragenesis with first-generation foliation and by relict minerals that are absent in the overlying (Upper Rhiphaean) sediments. The second stage corresponds to the progressive metamorphism with principles of the epidote-amphibolite facies (metamorphism peak  $T=606-527$  °C,  $P=8.8-7.9$  kbar) and is accompanied by the development of asymmetric similar folds in the paragenesis with cleavage foliation. The third metamorphism stage (diaphoresis) in paragneisses means the development of secondary changes. The calculated crystallization temperatures of chlorites correspond to the facies of green shales ( $T=285-232$  °C).

## Keywords:

Subpolar Urals, metamorphism, paragneisses, PT-conditions, folds

ния вещественного состава пород Приполярного Урала, включая литолого-геохимические, петрологические, минералогические, минерагенические и возрастные аспекты, были начаты в 30-е годы. прошлого столетия. За это время неоднократно уточнялись состав, распространение и возраст стратифицированных и магматических образований, решались вопросы, связанные с метаморфизмом

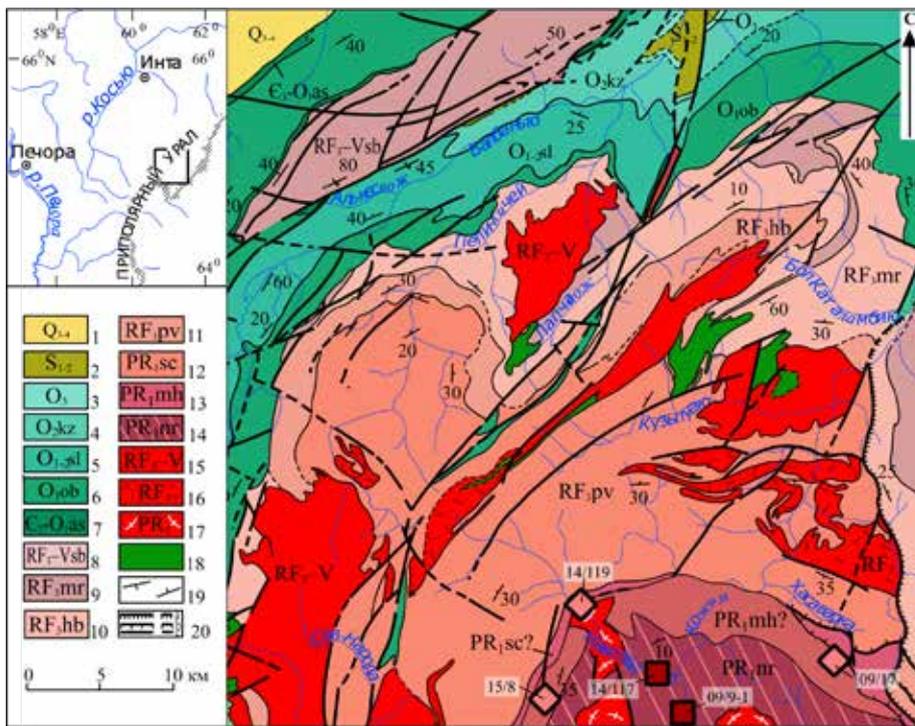


Рисунок 1. Геологическая карта и стратиграфическая схема докембрийских образований северной части Приполярного Урала [1].

Условные обозначения: 1 – верхнечетвертичные-современные отложения ( $Q_{3-4}$ ), 2 – силурийские отложения ( $S_{1-2}$ ), 3 – верхнеордовиковские отложения ( $O_3$ ), 4 – кожжимская свита ( $O_2$ ), 5 – салецкая свита ( $O_{1-2}$ ), 6 – обеизская свита ( $O_1$ ), 7 – алькесвожская толща ( $E_3-O$ ), 8 – саблегорская свита ( $RF_3-V$ ), 9 – мороинская свита ( $RF_3$ ), 10 – хобейнская свита ( $RF_3$ ), 11 – пуйвинская свита ( $RF_3$ ), 12 – шокуринская свита ( $PR$ ), 13 – маньхобейнская свита ( $PR$ ), 14 – няртинский комплекс ( $PR$ ), 15–17 – гранитоидные комплексы: 15 – сальнеро-маньхамбовский ( $RF_3-V$ ), 16 – кожжимский ( $RF_3$ ), 17 – николайшорский ( $PR$ ), 18 – хаталамбинский габбро-долеритовый комплекс ( $RF_3-V$ ), 19 – элементы залегания плоскостных структур (слоистости, полосчатости, сланцеватости), 20 – тектонические границы: а – шарьяжи и надвиги, б – всбросы и сбросы, с – крутопадающие дизъюнктивы.

Figure 1. Geological map and stratigraphic scheme of the Precambrian formations of the northern part of the Subpolar Urals [1].

Keys: 1 – Upper-Quaternary-modern sediments ( $Q_{3-4}$ ), 2 – Silurian sediments ( $S_{1-2}$ ), 3 – Upper Ordovician sediments ( $O_3$ ), 4 – Kozhim suite ( $O_2$ ), 5 – Saledy suite ( $O_{1-2}$ ), 6 – Obeiz suite ( $O_1$ ), 7 – Alkesvozh Formation ( $E_3-O$ ), 8 – Sablegorsk formation ( $RF_3-V$ ), 9 – Muroinskaya suite ( $RF_3$ ), 10 – Khibeinskaya suite ( $RF_3$ ), 11 – Puivinskaya suite ( $RF_3$ ), 12 – Shchokuryinskaya suite ( $PR$ ), 13 – Mankhobeinskaya suite ( $PR$ ), 14 – Nyartinskiy complex ( $PR$ ), 15–17 – granitoid complexes: 15 – Salnero-Mankhambovskiy ( $RF_3-V$ ), 16 – Kozhim ( $RF_3$ ), 17 – Nikolaihorshkiy ( $PR$ ), 18 – Khatalambinskiy gabbro-dolerite complex ( $RF_3-V$ ), 19 – attitude of planar structures (foliation, banding, cleavage), 20 – tectonic boundaries: a – shariages and thrust faults, b – hade faults, c – steeply dipping disjunctives.

и тектоникой района. На сегодняшний день некоторые вопросы, в том числе касающиеся метаморфизма и возраста отдельных стратифицированных подразделений, остаются спорными. Особо дискуссионным является вопрос о выделении/невыведении метаморфических образований маньхобейнской свиты и масштабах ее распространения в верховья р. Кожим. В последнее десятилетие появляется все больше данных, что породная ассоциация, известная как маньхобейнская свита, не имеет самостоятельного стратиграфического значения и выделена в ранге свиты ошибочно на месте зон развития ретроградного метаморфизма по породам няртинского комплекса [2–5].

Существующие представления о метаморфизме пород позволяют выделить две точки зрения. Согласно одной из них [6, 7] уровень метаморфизма в ядре Ляпинского антиклинория соответствовал амфиболитовой (гранулитовой?) фации (первый этап). Метаморфические преобразования второго этапа привели к прогрессив-

ному изменению верхнедокембрийских толщ и диафторезу более древних образований. Стретьим этапом связаны зеленосланцевое изменение палеозойских отложений и локально проявленный диафторез подстилающих толщ. По другой точке зрения в рассматриваемом районе выделяется зональный метаморфический комплекс, получивший название Верхнекожимский. Уровень метаморфизма не превышает эпидот-амфиболитовой фации и снижается к периферии Ляпинского антиклинория до уровня зеленосланцевой фации, с наложением более позднего зеленосланцевого диафтореза [8].

Цель работы – сравнение минеральных и структурных особенностей, метаморфизма парагенезисов, которые являются наиболее распространенными породами в няртинском комплексе и встречаются в виде реликтов среди низкотемпературных метаморфических пород (преимущественно слюдяных сланцев) в маньхобейнской свите, и на основе этих исследований получение дополнительных данных для решения вопроса о правомерности выделения маньхобейнской свиты в качестве самостоятельного стратиграфического подразделения.

## Материалы и методы

Пробы для исследования отобраны в ходе полевых работ из естественных обнажений на ручьях Николай-шор, Кожым-Вож, Хасаварка и верховьях р. Кожим.

Минеральный состав и структурно-текстурные особенности пород изучали в шлифах на поляризационном микроскопе Биоптик-400. Содержание породообразующих окислов определено традиционным 14-компонентным весовым химическим методом в лаборатории химии минерального сырья. Химические составы и фотографии минералов получены с помощью сканирующих электронных микроскопов JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link и Tescan Vega 3 LMH с энергодисперсионной приставкой Instruments X-Max 50 mm2 Oxford instruments при ускоряющем напряжении 20 кВ, размеры пучка – 180 нм, области возбуждения – до 5 мкм, с использованием программного обеспечения Aztec. Все аналитические исследова-

дования проведены в ЦКП «Геонаука» Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН. Для вычисления давления и температуры минеральных равновесий применялась программа RTQuick, написанная Д. В. Доливо-Добровольским. Проверка пиковых PT-условий метаморфизма выполнена методом мультиравновесной термобарометрии в программе TWQ [9] с использованием базы данных [10, 11].

Замеры структурных (плоскостных и линейных) элементов произведены авторами при полевых исследованиях. Обработка замеров проведена с использованием программы Stereonet 11.

### Петрографическая характеристика парагнейсов и химический состав главных минералов

Известно, что субстратом для двуслюдяных гнейсов и сланцев няртинского комплекса являлись полимиктовые алевролиты, граувакковые и аркозовые песчаники. В свою очередь исходным материалом для алевролитов и песчаников послужили как магматические породы основного и кислого составов, так и рециклированные осадочные отложения [12, 13]. Породы изменены метасоматическими процессами: окварцеванием, эпидотизацией, мусковитизацией, плагио- и калиевой фельдшпатизацией [12].

Для установления протолита рассматриваемых в работе образцов двуслюдяных гнейсов няртинского комплекса применена диаграмма А. А. Предовского [14] в координатах А-F (рис. 2). На эту же диаграмму вынесены составы гранатсодержащих двуслюдяных гнейсов маньхобеинской свиты, которые устанавливаются в виде реликтовых прослоев среди слюдяных альбит-кварцевых сланцев на ручьях Хасаварка (обр. 14/17), Кожим-Вож (обр. 15/8) и Николай-Шор (обр. 14/119). Результаты анализов данных пород приведены в табл. 1.

Анализ диаграммы позволяет установить, что три фигуративные точки составов гнейсов попадают в поля псаммитов (зернистых осадочных пород субграувакк), две точки составов – в поле пелитов (глин).

Макроскопически образцы гранатсодержащих двуслюдяных гнейсов представлены мелко- и среднезернистыми зеленовато-серыми, светло-серыми породами с отчетливой параллельно-сланцеватой текстурой. Часто в породах наблюдается метаморфическая полосчатость, выраженная наличием кварц-полевошпатовых прослоев и линз.

На микроуровне в породах устанавливаются гетеробластовая, порфиробластовая, лепидогранобластовая структуры и полосчато-сланцеватая текстура. Основная ткань пород имеет гранобластовую структуру и представлена кварцем и плагиоклазом на 40–60 %. Иногда плагиоклаз образует крупные порфиновые вкрапленники, сложенные нацело альбитом.

В составе гранатсодержащих двуслюдяных гнейсов (рис. 3) выделяются следующие минералы: кварц (30–50 %), плагиоклаз (20–40), биотит (10–20), мусковит (10–30),

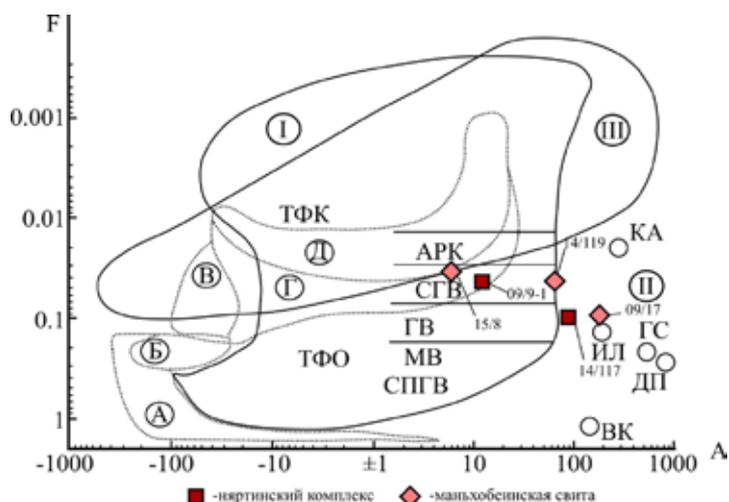


Рисунок 2. Диаграмма в координатах А-F А. А. Предовского [14]. Условные обозначения (здесь и рис. 4): поля осадочных и вулканогенно-осадочных пород (границы – сплошные линии): I – обломочных осадочных и смешанных (АРК – аркозы, СГВ – субграувакки, ГВ – граувакки, МВ – мелановакки, ТФК – туфы с кислым и средним материалом, ТФО – туфы с основным и ультраосновным материалом, СПГВ – смешанные продукты глубокого выветривания основных и ультраосновных пород), II – пелитов (КА – каолинит, ИЛ – гидрослюда, ГС – гиббсит, ДП – диаспор, ВК – вермикулит), III – хемогенных силицитов. Поля изверженных пород (границы – точечный пунктир): А – ультраосновных, Б – основных, В – щелочных, Г – средних и умеренно кислых, Д – кислых.

Figure 2. Diagram in A-F coordinates of A. A. Predovskiy [14]. Keys (here and in Figure 4): fields of sedimentary and volcanic-sedimentary rocks (boundaries – solid lines): I – clastic sedimentary and mixed rocks (АРК – arkoses, СГВ – subgrauvacies, ГВ – grauvacies, МВ – melanovacies, ТФК – tufts with acidic and medium material, ТФО – tufts with basic and ultrabasic material, СПГВ – mixed products of deep weathering of basic and ultrabasic rocks), II – pelites (КА – kaolinite, ИЛ – hydromica, ГС – gibbsite, ДП – diaspora, ВК – vermiculite), III – chemogenic silicites. Fields of eruptive rocks (boundaries – dotted line): А – ultrabasic, Б – basic, В – alkaline, Г – medium and moderately acidic, Д – acidic.

Таблица 1  
Результаты химических анализов парагнейсов  
няртинского комплекса и маньхобеинской свиты, мас. %

Table 1  
Results of chemical analyses of paragneisses  
of the Nyartinsky complex and the Mankhobeinskaya suite

№ пробы/ компонент	Няртинский комплекс		Маньхобеинская свита		
	09/9-1	117	09/17	14/119	15/8
SiO <sub>2</sub>	69.29	56.91	58.36	64.2	58.12
TiO <sub>2</sub>	0.52	0.94	1.00	0.96	1.16
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.90	20.55	20.60	15.93	17.93
FeO	2.82	5.99	5.75	5.49	3.79
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.55	1.22	1.91	1.65	3.39
MnO	0.09	0.18	0.15	0.08	0.21
MgO	1.01	2.45	2.33	2.23	2.35
CaO	2.48	1.97	1.19	1.18	4.98
Na <sub>2</sub> O	3.46	1.69	0.55	2.33	3.95
K <sub>2</sub> O	3.15	5.00	5.13	3.68	1.68
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.17	0.09	0.11	0.43
п.п.п.	1.59	2.93	2.93	2.08	99.46
H <sub>2</sub> O	0.28	не опр.	0.26	0.18	0.17
CO <sub>2</sub>	0.13	0.10	0.07	0.10	0.10
FeO <sup>от</sup>	4.37	7.21	7.66	7.14	7.18
Сумма	100.4	100	100	100	99.46
A	6.00	88.00	119.00	61.00	8.00
F	0.04	0.10	0.10	0.08	0.08

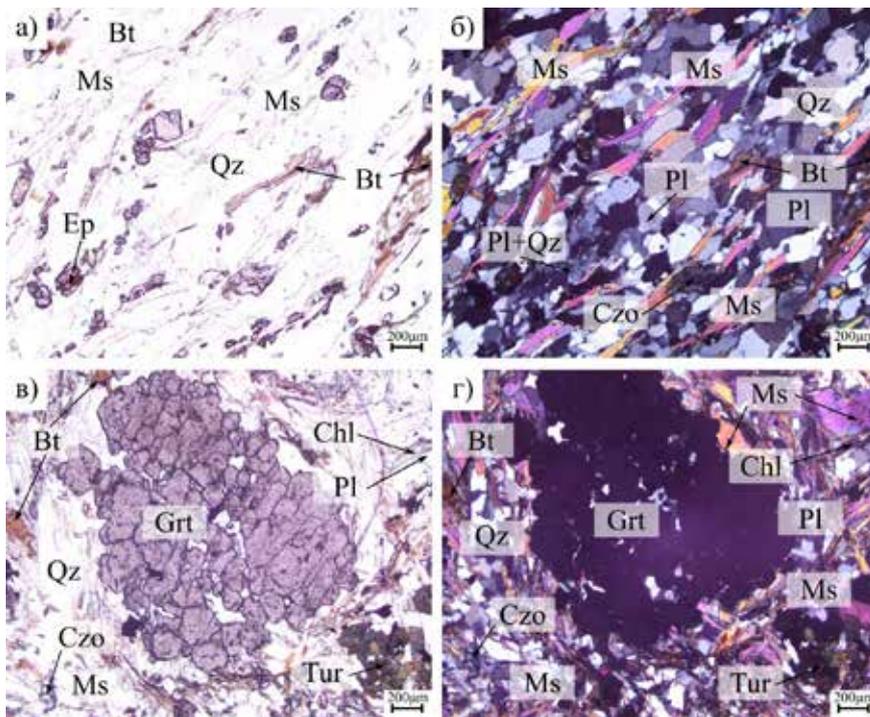


Рисунок 3. Микрофотографии шлифов парагнейсов няртинского комплекса (обр. 14/117 – а, б) и маньхобейнской свиты (обр. 09/17 – в, г). Обозначения минералов: Bt – биотит, Czo – клиноцоизит, Grt – гранат, Ms – мусковит, Pl – плагиоклаз, Tur – турмалин, Qz – кварц.  
 Figure 3. Microphotographs of paragneiss slides from the Nyartinskiy complex (sample 14/117 – а, б) and the Mankhobeinskaya suite (sample 09/17 – в, г). Mineral symbols: Bt – biotite, Czo – clinopyroxite, Grt – garnet, Ms – muscovite, Pl – plagioclase, Tur – tourmaline, Qz – quartz.

гранат (до 5 %). Кроме вышеперечисленных минералов в некоторых образцах могут присутствовать эпидот (клиноцоизит), хлорит, кальцит и калиевый полевой шпат. Среди аксессуарных минералов встречаются монацит, циркон, алланит, титанит и турмалин. Рудные минералы представлены ильменитом, пиритом, халькопиритом и пирротинном.

**Биотиты**, установленные в матрице пород и расположенные на контакте с гранатом или заполняющие его трещины, по форме выделения и химическому составу различаются незначительно. В последних наблюдаются пониженные содержания  $TiO_2$  (табл. 2). Биотиты преимущественно железистые  $X^{Fe}=0.50-0.70$  умеренноглиноземистые ( $Al^{VI}=0.28-0.52$ ). Железистость на контакте с гранатами ниже, чем в матрице, что, вероятно, определяется обменными Fe-Mg реакциями между минералами. В целом составы минералов отвечают ряду аннит-флогопит (рис. 4, а) и тяготеют к анниту. В составе маньхобейнской свиты биотиты более магниезальные ( $Mg=1.03-1.18$ ), менее железистые (табл. 2).

**Мусковит** отмечается как в основной ткани, так и в сростках с биотитом. Химические составы представлены в табл. 3. В целом содержания Si в минерале колеблются от 3.04 до 3.35 ф.е., ( $Mg+Fe^{tot}$ ) – 0.21–0.45 ф.е. при среднем значении 0.39, что, согласно классификации мусковитов, фенгитов и разновидностей селадонита Г. Тиендорфа с соавторами [15], соответствует промежуточному составу между мусковитом и фенгитом (рис. 4, б).

**Плагиоклазы**. В изученных породах плагиоклазы распространены как в виде порфировых вкрапленников, так и в матрице породы, и представлены преимущественно

альбитом и олигоклазом (рис. 4, в). Химические составы плагиоклазов приведены в табл. 4. В некоторых образцах зафиксированы зерна с увеличением An-компонента в краевых частях.

**Хлорит** развивается по биотиту, реже – гранату. В целом минеральный состав хлоритов однотипен и представлен преимущественно рипидолитом, реже – пикнохлоритом (рис. 4, г). Железистость колеблется в пределах от 39 до 78 %.

**Гранат**. На микроуровне гранаты устанавливаются как в виде гроздевидных агрегатов, сложенных субизометричными порфиробластами, так и в виде отдельных корродированных зерен. Часто по краям и трещинам развивается биотит, реже – хлорит. В пространстве между зернами развиваются мусковит и хлорит.

Порфиробласты граната имеют размеры от 0,1 до 2–3 мм.

Присутствуют гранаты гроссуляр-альмандиновые. В химическом плане они имеют неоднородное

строение за счет увеличения Alm при скомпенсированном уменьшении Sps минала от центра к краю (состав центральных частей –  $Alm_{59-62} Sps_{5-12} Prp_{3-4} Grs_{26}$ , краевых –  $Alm_{69-71} Sps_{1-2} Prp_{5-6} Grs_{23-24}$ ). Кроме того, наблюдаются незначительное понижение Grs минала и небольшое повышение Prp. Пример с данным типом зональности представлен на рис. 5, б и в табл. 5 (обр. 14/117). Гранаты с подобным типом отмечены в амфиболитах рассматриваемых подразделений [5, 7] и породах более молодых пуйвинской и хобейнской свит [7, 8]. Включения в центральных частях и каймах представлены кварцем, ильменитом и цирконом.

Установлены гранаты с обратным типом химической зональности (рис. 5, в). Их центральные части представлены пироп-альмандином, а краевые соответствуют гроссуляр-альмандину. Содержание Prp минала в центральных частях составляет 11 %. В краевых частях происходит уменьшение Prp при увеличении Grs. Значения Alm и Sps миналов остаются фиксированными (табл. 5, обр. 14/119).

Присутствуют гранаты со сложным типом химической зональности. В контрастных BSE-изображениях отчетливо выделяются кайма и пятнистое строение. Характер распределения зональности представлен на рис. 5, а, г и в табл. 5 (обр. 09/9-1, 09/17). На изображениях краевые части и темные области имеют более низкие содержания пиральспитовых миналов и более высокие значения Grs, по сравнению с более светлыми областями. В образце 09/17 в светлых областях значения Prp минала соответствуют содержанию Prp в ядрах вышеописанных регрессивно-зональных гранатов. В образце 09/9-1 в гранатах устанавливаются зоны, обогащенные Grs (50–51 %).

Таблица 2

Химические составы биотитов из парагнейсов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты по данным микрозондового анализа, мас. %

Table 2

Chemical compositions of biotites from paragneisses of the Nyartinskiy complex and the Mankhobeinskaya suite according to the microprobe analysis results

№ образца	Няртинский комплекс								Маньхобеинская свита								
	09/9-1			14/117					09/17		14/119						
Компонент/ точка	1_8	4_15	2_2	1_3	1_17	2_6	3_9	4a_6	4_10	2_8	1_4	1_6	1_9	1_15	2_1	3_3	3_6
SiO <sub>2</sub>	35.29	34.58	35.19	36.17	34.85	30.76	36.2	35.05	36.93	38.4	35.59	36.79	37.03	35.67	36.67	36.66	36.84
TiO <sub>2</sub>	2.33	2.36	2.28	2.13	1.67	1.15	1.53	1.46	1.74	1.42	1.34	1.36	1.63	0.31	0.96	1.34	0.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.12	16.53	17.44	16.79	17.25	17.75	16.95	18.67	17.62	18.31	18.89	19.42	18.25	19.92	19.81	19.15	19.3
FeO <sup>tot</sup>	25.79	25.62	24.96	22.29	23.31	29.9	22.66	24.5	19.61	19.41	21.49	19.9	19.97	20.44	19.39	20.05	20.19
MnO	0.39	0.36	0.41	0.3	0.32	0.69	0.23	0.27	0.17	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	5.22	5.05	4.89	7.71	7.16	5.66	7.82	7.01	10.22	10.76	9.07	9.71	9.72	9.44	9.74	9.58	9.88
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	0.15	-	-	-	-	-	0.16	-	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	8.38	9.05	9.34	9.65	9.83	6.37	9.28	9.76	9.63	9.59	9.15	9.38	9.36	9.38	9.37	9.53	9.40
Сумма	95.51	93.55	94.51	95.19	94.41	92.28	94.67	96.73	95.91	98.05	95.54	96.56	95.95	95.16	95.93	96.3	96.16
Расчет формульных коэффициентов биотитов на 22 положительных заряда катионов																	
Si	2.75	2.78	2.78	2.8	2.75	2.55	2.82	2.7	2.79	2.82	2.72	2.75	2.79	2.72	2.75	2.76	2.77
Ti	0.14	0.14	0.14	0.12	0.10	0.07	0.09	0.08	0.1	0.08	0.08	0.08	0.09	0.02	0.05	0.08	0.03
Al	1.66	1.56	1.63	1.53	1.6	1.73	1.55	1.7	1.57	1.58	1.7	1.71	1.62	1.79	1.75	1.7	1.71
Al <sup>IV</sup>	1.25	1.22	1.22	1.20	1.25	1.45	1.18	1.30	1.21	1.18	1.28	1.25	1.21	1.28	1.25	1.24	1.23
Al <sup>VI</sup>	0.41	0.34	0.41	0.34	0.35	0.28	0.37	0.40	0.36	0.40	0.42	0.46	0.41	0.51	0.51	0.45	0.48
Fe <sup>2+</sup>	1.68	1.72	1.65	1.44	1.54	2.07	1.47	1.58	1.24	1.19	1.37	1.24	1.26	1.3	1.22	1.26	1.27
Mg	0.61	0.6	0.58	0.89	0.84	0.70	0.91	0.81	1.15	1.18	1.03	1.08	1.09	1.07	1.09	1.07	1.11
Mn	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.05	0.02	0.02	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
K	0.83	0.93	0.94	0.95	0.99	0.67	0.92	0.96	0.93	0.90	0.89	0.90	0.90	0.91	0.90	0.91	0.90

Таблица 3

Химические составы мусковитов из парагнейсов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты по данным микрозондового анализа, мас. %

Table 3

Chemical compositions of muscovites from paragneisses of the Nyartinskiy complex and the Mankhobeinskaya suite according to the microprobe analysis results

№ образца	Няртинский комплекс								Маньхобеинская свита							
	09/9-1			14/117					09/17				14/119			
Компонент/ точка	1_7	5_3	1_6	1_13	2a_3	2a_5	3_8	4_1	2_3	4_8	2_5	2_7	1_8	2_2	2_7	3_7
SiO <sub>2</sub>	48.28	48.45	48.12	48.44	48.86	46.03	49.46	47.4	44.65	47.04	49.06	48.76	48.39	47.6	48.9	50.15
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.42	0.64	0.52	0.60	0.43	0.52	0.55	0.49	0.38	0.44	0.45	0.51	0.52	0.43	0.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.92	27.47	26.21	26.74	27.24	31.31	27.14	28.74	34.5	29.75	29.35	29.55	30.7	33.25	29.77	30.02
FeO <sup>tot</sup>	4.79	4.5	4.57	4.22	4.44	4.02	4.17	4.13	2.29	2.97	3.23	3.45	2.26	2.03	2.55	2.3
MnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MgO	2.23	2.12	2.67	2.54	2.46	1.3	2.72	2.08	0.77	2.19	2.73	2.5	2.45	1.53	2.57	2.54
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	-	-	-	0.25	0.2	0.32	0.27	0.31	0.78	0.33	0.41	0.49	0.78	0.76	0.46	0.49
K <sub>2</sub> O	10.88	11.05	10.53	10.8	10.71	10.81	10.87	10.67	10.27	10.47	10.55	10.62	10	10.23	10.3	10.43
Сумма	93.61	94.01	92.74	93.51	94.51	94.23	95.15	93.88	93.75	93.45	95.76	95.83	95.09	95.92	94.99	96.5
Расчет формульных коэффициентов мусковитов на 22 положительных заряда катионов																
Si	3.34	3.33	3.35	3.34	3.33	3.15	3.35	3.26	3.04	3.23	3.28	3.26	3.24	3.15	3.28	3.3
Ti	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
Al	2.19	2.22	2.15	2.18	2.19	2.53	2.17	2.33	2.77	2.41	2.31	2.33	2.42	2.6	2.35	2.33
Al <sup>IV</sup>	0.66	0.67	0.65	0.66	0.67	0.85	0.65	0.74	0.96	0.77	0.72	0.74	0.76	0.85	0.72	0.70
Al <sup>VI</sup>	1.53	1.55	1.50	1.52	1.53	1.68	1.52	1.58	1.81	1.65	1.59	1.60	1.66	1.75	1.63	1.63
Fe <sup>2+</sup>	0.28	0.26	0.27	0.24	0.25	0.23	0.24	0.24	0.13	0.17	0.18	0.19	0.13	0.11	0.14	0.13
Mg	0.23	0.22	0.28	0.26	0.25	0.13	0.27	0.21	0.08	0.22	0.27	0.25	0.24	0.15	0.26	0.25
Mn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.1	0.04	0.05	0.06	0.1	0.1	0.06	0.06
K	0.96	0.97	0.93	0.95	0.93	0.94	0.94	0.94	0.89	0.92	0.9	0.91	0.85	0.86	0.88	0.88

Химические составы плагиоклазов из парагнейсов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты по данным микрозондового анализа, мас. %

Table 4

Chemical compositions of plagioclases from paragneisses of the Nyartinskiy complex and the Mankhobeinskaya suite according to the microprobe analysis results

№ образца	Няртинский комплекс								Маньхобеинская свита								
	09/9-1				14/117				14/119								
Компонент/ точка	1_9	1_10	5_1	5_2	2a_1 c	2a_2 r	3_11	4_2	1_10 c	1_10 r	1_11_1	1_12	1_12_1	2_4	2_8	3_9	3_10
SiO <sub>2</sub>	64.18	67.9	63.86	68.14	68.89	63.11	68.61	69.04	67.63	66.78	64.24	68.47	63.46	66.04	63.5	62.11	69.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.75	19.92	18.85	20.11	19.4	23.61	19.57	19.93	19.91	21.41	22.96	19.94	23.74	22.16	23.31	24.24	20
CaO	–	0.29	–	0.35	–	4.63	0.11	–	0.39	3.74	3.62	0.32	4.54	2.63	3.98	5.64	0.21
Na <sub>2</sub> O	0.61	11.12	0.77	11.24	10.7	8.76	11.17	11.19	10.94	8.59	9.1	11.07	8.63	10	9.09	8.05	11.15
K <sub>2</sub> O	15.58	0.12	15.43	0.12	–	–	–	–	–	–	0.14	–	–	–	–	0.14	–
BaO	0.76	–	0.72	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Сумма	99.88	99.35	99.64	99.96	98.99	100.11	99.46	100.16	98.86	100.51	100.07	99.8	100.37	100.82	99.88	100.18	100.52
Расчет формульных коэффициентов плагиоклазов на восемь атомов кислорода																	
Si	2.83	3.00	2.82	3.01	3.04	2.79	3.03	3.05	2.99	2.95	2.84	3.02	2.80	2.92	2.80	2.74	3.05
Al	0.98	1.04	0.98	1.05	1.01	1.23	1.02	1.04	1.04	1.11	1.19	1.04	1.24	1.15	1.21	1.26	1.04
Ca	–	0.01	–	0.02	–	0.22	0.01	–	0.02	0.18	0.17	0.02	0.21	0.12	0.19	0.27	0.01
Na	0.05	0.95	0.07	0.96	0.92	0.75	0.96	0.96	0.94	0.74	0.78	0.95	0.74	0.86	0.78	0.69	0.95
K	0.88	0.01	0.87	0.01	–	–	–	–	–	0	0.01	–	–	–	–	0.01	–
Ba	0.01	–	0.01	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Alb	6	98	7	98	100	77	99	100	98	81	81	98	77	87	81	71	99
An	–	1	–	2	–	23	1	–	2	19	18	2	23	13	19	28	1
Ort	94	1	93	1	–	–	–	–	–	–	1	–	–	–	–	1	–

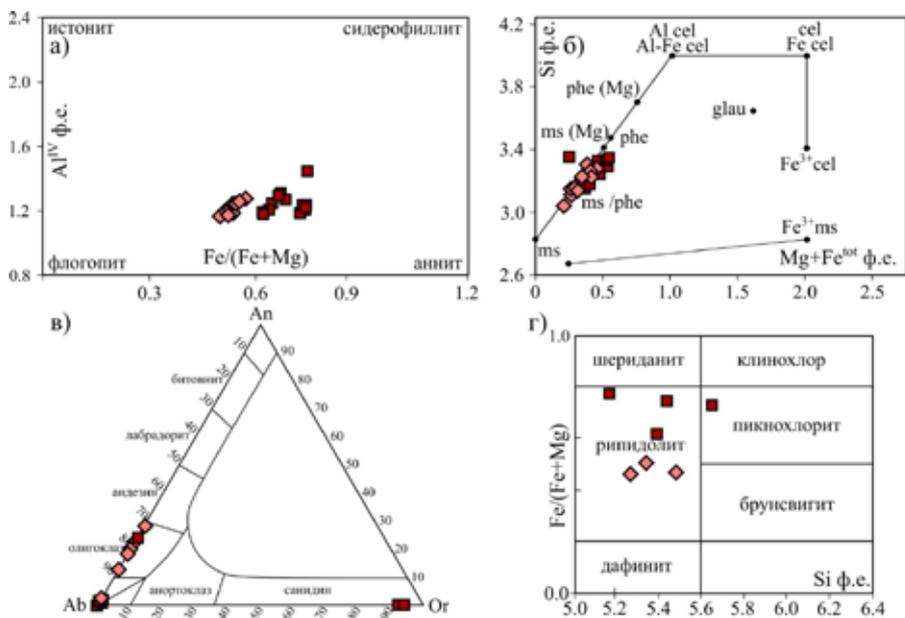


Рисунок 4. Химические составы минералов: а)  $(\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Al}^{\text{IV}})$  ф.е. для биотитов; б)  $\text{Mg}+\text{Fe}$  ф.е.- $\text{Si}$  ф.е. для мусковитов (по [15]); в) плагиоклазов; г)  $\text{Si}-(\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Al}^{\text{IV}})$  ф.е. для хлоритов [16].

Figure 4. Chemical compositions of minerals: a)  $(\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Al}^{\text{IV}})$  f.u. for biotites; б)  $\text{Mg}+\text{Fe}$  f.u.- $\text{Si}$  f.u. for muscovites (according to [15]); в) plagioclases; г)  $\text{Si}-(\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Al}^{\text{IV}})$  f.u. for chlorites [16].

Повышенные содержания CaO могут быть связаны с относительно высоким давлением, при котором неустойчивы Ca-плагиоклазы.

Включения представлены кварцем, апатитом, цирконом, рудными минералами. Закономерности в распределении включений в зонах разного химического состава не установлены.

Части обогащены относительно краевых частей магнием ( $\text{MgO}=2.42-2.49$  мас. %). Возможно, центральные части таких гранатов являются реликтовыми – продуктами более раннего этапа метаморфизма [7]. К первичным метаморфическим минералам в гнейсах няртинского комплекса и маньхобеинской свиты также можно отнести гранулитоморфный циркон (округлые мультифасеточные кристаллы), характерный для высокотемпературных и вы-

Минералы группы эпидота представлены преимущественно клинозоизитом ( $X_{\text{czo}}=0.79-0.84$ ).

#### Метаморфизм

Учитывая взаимоотношения между минералами и их химический состав, можно выделить несколько парагенезисов, предположительно отвечающих разным этапам метаморфического преобразования пород.

Первичные парагенезисы раннего метаморфизма в амфиболитах и гнейсах в значительной степени уничтожены более поздними процессами. В амфиболитах установлены реликты диопсида, высокотитанистой роговой обманки [6] и высокотитанистого биотита [7]. Согласно данным [7], в гнейсах отмечаются гранаты, в которых центральные

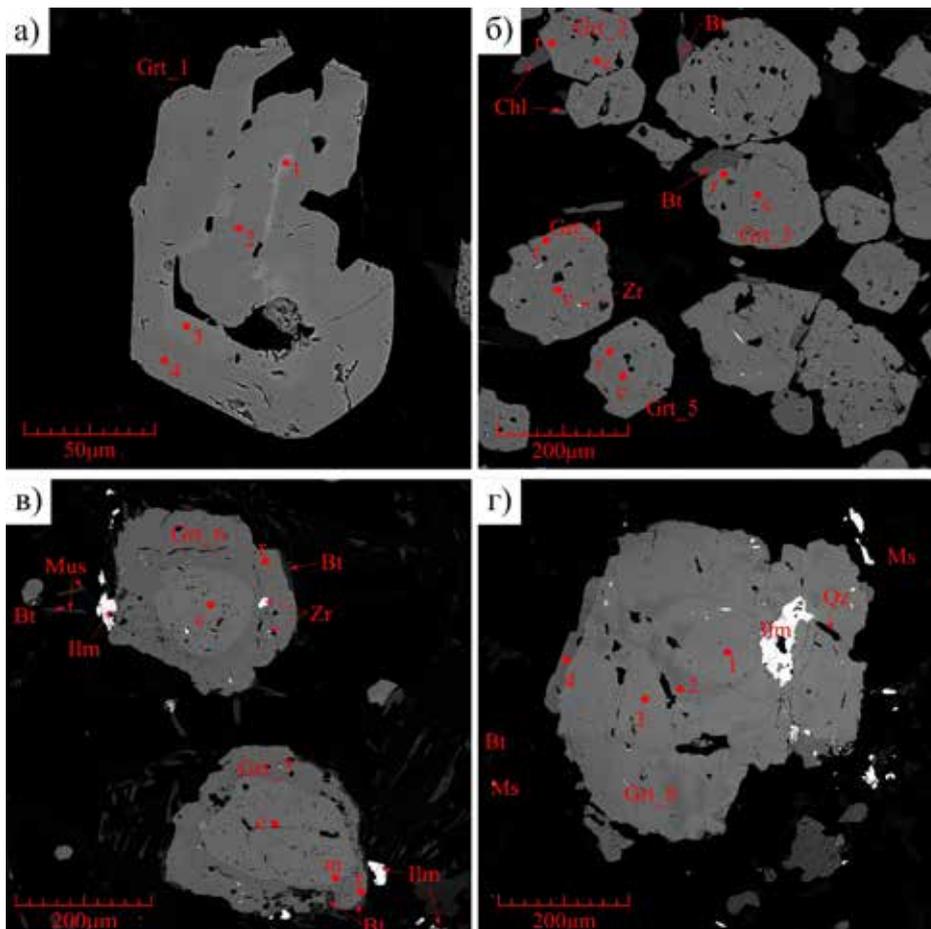


Рисунок 5. BSE-изображения гранатов из парагнейсов няртинского комплекса (а, б) и маньхобеинской свиты (в, г). Номера зерен гранатов и точек соответствуют значениям, приведенным в табл. 5. Обозначения минералов: Bt – биотит, Chl – хлорит, Grt – гранат, Ilm – ильменит, Ms – мусковит, Pl – плагиоклаз, Tur – турмалин, Qz – кварц, Zr – циркон.

Figure 5. BSE images of garnets from paragneisses of the Nyartinskiy complex (a, b) and the Mankhobeinskaya suite (v, g). Numbers of garnet grains and points correspond to the values given in Table 5. Mineral symbols: Bt – biotite, Chl – chlorite, Grt – garnet, Ilm – ilmenite, Ms – muscovite, Pl – plagioclase, Tur – tourmaline, Qz – quartz, Zr – zircon.

сокобарических метаморфитов [17]. Плохая сохранность минералов раннего этапа метаморфизма не представляет возможным использование минеральной термобарометрии ввиду отсутствия в реликтовых минералах равновесных с ними минеральных включений, пригодных для измерения PT-условий метаморфизма.

Наличие гранатов со сложной зональностью можно объяснить двумя гипотезами: первая подразумевает образование гранатов с прямой и сложной зональностью в рамках одного тектоно-метаморфического события при процессах нагревания-опускания до их поднятия-остывания с образованием гранатов на разных уровнях. Согласно второй гипотезы, образование данного типа зональности связано с процессами диафореза. Учитывая, что в краевых частях гранатов происходит понижение пиральспитовых миналов, указанная зональность не может быть проявлена в рамках одного тектоно-метаморфического этапа, так как в случае образования данных гранатов на регрессивном процессе метаморфизма должно наблюдаться повышение Sps при относительно индифферентном поведении Grs [18]. Следовательно, образование данного типа

зональности может быть связано с процессами диафореза или метасоматоза.

В изученных нами образцах к ранним минералам с определенной долей вероятности можно отнести пироп-альмандиновые ядра регрессивно-зональных гранатов и гранаты со сложной зональностью.

Гроссуляр-альмандиновые гранаты связаны с отдельным этапом метаморфизма и присутствуют как в гранатосодержащих породах няртинского комплекса и маньхобеинской свиты, так и в породах пуйвинской и нижней части хобеинской свит [7, 8]. Парагенезис данного этапа в парагнейсах  $Grt+Bt+Ms+Pl+Qz\pm Ep$ .

Поздние преобразования в парагнейсах связаны с частичной или полной перестройкой пород, развитием будинажа и процессов бластомилонитизации. В породах наблюдается хлорит, развивающийся по биотиту и гранату. Минеральные ассоциации неравновесны, так как во всех описанных образцах устанавливаются реликты вышеописанных парагенезисов.

На основе состава породообразующих минералов методом классической термобарометрии определены пиковые температуры и давления формирования парагнейсов. Учитывая минеральный состав, а именно наличие Grt, Bt, Ms, Pl, Qz, использовались взаимосогласованные Grt-Bt геотермометр [19–21] и Grt-Bt-Ms-Pl(Qz) [22], Grt-Bt-Pl-Qz [23] геобарометры. Диапазоны составов минералов, используемых для геотермобарометрии, не выходят за пределы калибровки термометров и барометров.

Рассчитанные оценки PT-условий метаморфизма пород по минеральным геотермобарометрам представлены в табл. 6.

Для образца няртинского комплекса свиты с использованием составов центральных частей прогрессивно-зональных гранатов и минералов, находящихся на контакте с ним, рассчитаны температуры и давления, соответствующие  $T=504-484\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P=7.3-6.7\text{ кбар}$ . Данные показатели характеризуют условия образования гранатов. Пиковые условия метаморфизма, рассчитанные с использованием состава краевой части граната и минералов основной ткани, составляют  $T=554-527\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=8.9-8.5\text{ кбар}$ .



В образцах маньхобеинской свиты парагенезисы краевых частей граната с минералами матрикса характеризуются значением температуры  $T=555\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлением  $P=7.9\text{ кбар}$ . Центральные части прогрессивно-зональных гранатов – температурой и давлением их образования  $T=468\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=5.3\text{ кбар}$ .

Дополнительно для оценки достоверности полученных результатов были определены пиковая температура и давление методом мультиравновесной термобарометрии с использованием программ TWQ и TWQ\_View, написанных Д. В. Доливо-Добровольским. Три независимых реакции, описывающие Grt-Bt термометр (реакция  $\text{Alm}+\text{Phl}=\text{Ann}+\text{Prp}$ ) и Gr-Bt-Ms-Pl геобарометр ( $\text{Alm}+\text{Grs}+\text{Ms}=\text{Ann}+3\text{An}$ ;  $\text{Grs}+\text{Ms}+\text{Prp}=3\text{An}+\text{Phl}$ ), указывают на неплохую сходимость с данными классической термобарометрии (рис. 6). Полученные значения для образ-

ца няртинского комплекса (14/117) соответствуют  $T=606\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P=8.4\text{ кбар}$ , для образца маньхобеинской свиты (14/119) –  $T=581\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=8.8\text{ кбар}$ .

Таким образом, исходя из вышеуказанных данных, полученные термометрические показатели PT-условий характеризуют прогрессивный тренд метаморфизма и, согласно фациальной схеме [24], соответствуют уровню эпидот-амфиболитовой фации относительно повышенных давлений.

### Структурные особенности парагнейсов

Няртинский комплекс сложен интенсивно дислоцированными породами, в которых относительно поздние процессы деформации и метаморфической перекристаллизации в значительной степени уничтожали информацию о первичных структурах. Распознать их удастся только в отдельных обнажениях.

Первичная сланцеватость погружается в основном на северо-запад под углами от  $5$  до  $50^{\circ}$ . В породах няртинского комплекса, как правило, встречаются развитые по гнейсам и амфиболитам изоклинальные или сжатые, лежащие, подобные, изредка ныряющие складки первой генерации. Их осевые поверхности погружаются на запад, северо-запад под небольшими углами. На сферических диаграммах (рис. 7, а, в) полюса плоскостных элементов контактов, полосчатости, сланцеватости и крыльев складок образуют рисунок по малому кругу, что может говорить об изменении их ориентировок при поздних деформациях. Шарниры складок на диаграммах (рис. 7, б, г) частично рассеиваются по дуге большого круга, близкого к ориентировкам проекций поверхностей поздних складок. Вторая генерация представлена асимметричными подобными складками с крутопадающими шарнирами и часто деформирует крылья и осевые поверхности складок первой генерации. Третья генерация представлена открытыми складками, которые образовались по крыльям складок первой генерации, их осевые поверхности падают на восток под крутыми углами, шарниры полого погружаются на юг и север.

Ранние структуры в породах маньхобеинской свиты встречаются реже, чем в няртинском комплексе, а в верхних частях свиты, особенно в кристаллических сланцах, практически не обнаруживаются. Такая редкая встречаемость связана, скорее всего, с широко развитыми здесь поздними процессами диафореза, рассланцевания и бластомилонитизации в частях свиты, приближенных к контактам с вышележащими свитами. Первичная сланцеватость по простиранию имеет северо-восточные ориентировки, реже – восточные и юго-вос-

Таблица 6  
Оценка PT-условий метаморфизма с использованием классической геотермобарометрии

Table 6  
Estimation of PT-conditions of metamorphism by classical geothermobarometry

Образец	T, °C				P, кбар		
	Минеральные геотермометры				Минеральные геобарометры		
	1	2	3	$T_{cp}$	4	5	$P_{cp}$
Няртинский комплекс							
14/117c <sub>1</sub>	477	507	528	504	6.5	6.8	6.7
14/117r <sub>1</sub>	541	546	573	554	8.3	8.7	8.5
14/117c <sub>2</sub>	459	486	508	484	7.8	6.8	7.3
14/117r <sub>2</sub>	517	520	545	527	9.5	8.2	8.9
Маньхобеинская свита							
14/119c	454	466	486	468	5.2	5.4	5.3
14/119r	542	552	572	555	8	7.8	7.9

Примечание. 1 – Grt-Bt термометр [19], 2 – Grt-Bt термометр [20], 3 – Grt-Bt термометр [21], 4 – Grt-Bt-Ms-Pl(Qz) [22], Grt-Bt-Pl-Qz [23].

Note. 1 – Grt-Bt thermometer [19], 2 – Grt-Bt thermometer [20], 3 – Grt-Bt thermometer [21], 4 – Grt-Bt-Ms-Pl(Qz) [22], Grt-Bt-Pl-Qz [23].

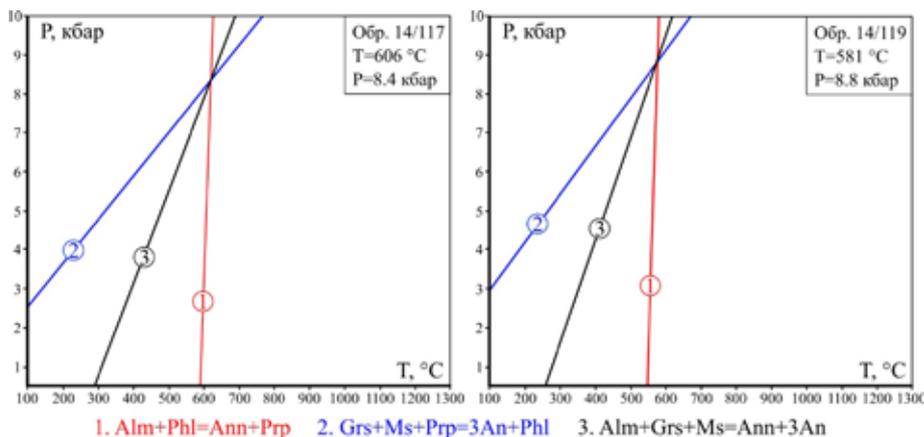


Рисунок 6. PT- параметры пиковых условий метаморфизма, полученные для краевых зон граната и минералов основной ткани с использованием программы TWQ: а) няртинский комплекс (обр. 14/117), б) маньхобеинская свита (обр. 14/119). Обозначения минералов: Alm – альмандин, An – анортит, Ann – аннит, Grs – гроссуляр, Phl – флогопит, Prp – пироп, Ms – мусковит.

Figure 6. PT-parameters of peak metamorphism conditions obtained for the marginal zones of garnet and essential minerals using the TWQ program: а) the Nyartinskiy complex (sample 14/117), б) the Mankhobeinskaya suite (sample 14/119). Mineral symbols: Alm – almandine, An – anorthite, Ann – annite, Grs – grossular, Phl – phlogopite, Prp – pyrope, Ms – muscovite.

точные с падением под пологими углами на северо-запад. К ранним складкам в породах маньхобеинской свиты относятся сжатые и изоклиналильные, морфологически сходные с ранними складками в породах няртинского комплекса. В породах маньхобеинской свиты также развиты асимметричные подобные складки второй генерации. Они развиты в основном по контактам прослоев кварцитов и кристаллических сланцев и наиболее часто встречаются в верхах свиты. Полюса крыльев данной генерации на стереографических диаграммах накладываются на дугу большого круга (рис. 7, д). Шарниры погружаются главным образом на северо-запад под углами 10–40° (рис. 7, е). Так же как и в породах няртинского комплекса, в породах маньхобеинской свиты отмечаются прямые открытые и пологие складки третьей генерации, развитые на крыльях ранних складок, шарниры которых погружаются на север под малыми углами.

## Результаты и их обсуждение

Анализ минеральных и структурных особенностей парагнейсов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты в совокупности с данными классической и мультиравновесной минеральной термобарометрии устойчивых парагенезисов позволяет судить о длительном и многоэтапном процессе преобразования пород. По полученным в работе данным установлены два самостоятельных тектоно-метаморфических этапа. Учитывая данные [5–7], а именно наличие реликтовых минералов в гнейсах и амфиболитах (гранатов, в которых центральные части зерен обогащены магнием, высокотитанистой роговой обманки, биотита, а также гранулитоморфного циркона) и распространение в изученных обнажениях ранних изоклиналильных складок первой генерации в парагенезисе со сланцеватостью первой генерации, отсутствующие в вышележащих, верхнерифейских отложениях, можно предположить ранний тектоно-метаморфический этап. Условия указанного этапа метаморфизма могли достигать амфиболитовой [6] или даже гранулитовой [7, 18] фаций. В последние годы получен U–Pb возраст гранулитоморфных цирконов из гранат-биотитового гнейса, отобранного в истоках р. Кожим, по 44 локальным определениям, равным 2127±31 млн лет [3]. Полученный возраст интерпретируется как время проявления раннего этапа метаморфизма, а возраст 1950±35 млн лет, определенный по цирконам мигматитового типа [17], отражает проявления метаморфизма амфиболитовой фации и процессов мигматизации. Согласно модели метаморфизма доуралид Приполярного Урала [25], вышеуказанные геохронологические возрасты относятся к эволюции Восточно-Европейской платформы, что совпадает со временем сочленения Волго-Урала с Сарматией и Волго-Сарматии с Фенноскандией [25].

Второй тектоно-метаморфический этап привел к частичной или полной перекристаллизации

парагнейсов няртинского комплекса и маньхобеинской свиты и первичному метаморфизму рифейско-вендских метаморфитов. В минеральных парагенезисах с гранатом намечается прогрессивный тренд метаморфизма с пиковыми условиями T=606–527 °C и P=8.8–7.9 кбар. Полученные температуры и давления соответствуют уровню эпидот-амфиболитовой фации регионального метаморфизма V<sub>3</sub> [24]. Данный этап связан с развитием орогена протоуралид-тиманид и становлением метаморфической зональности в условиях эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций в вендское время – 640–550 млн лет [18]. Совместно с процессами метаморфизма образуются складки второй генерации в парагенезисе с кливажем-сланцеватостью. Данные структуры проявлены во всех докембрийских обнажениях рассматриваемого района.

Следующий этап метаморфизма пород (низкотемпературный диафорез) проявляется во всех докембрий-

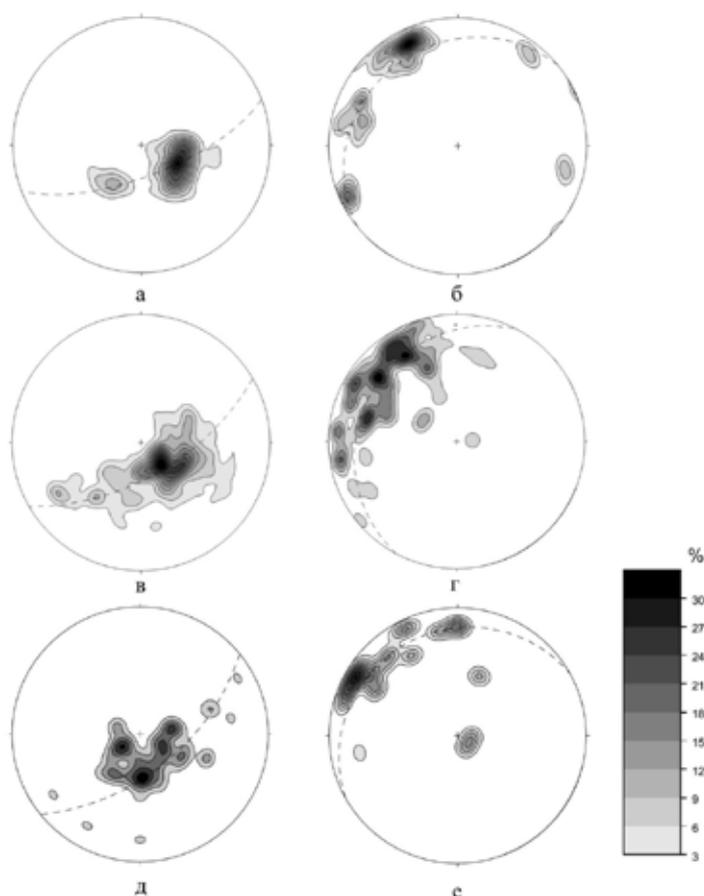


Рисунок 7. Стереографические диаграммы (нижняя полусфера, равноугольная сетка) замеров плоскостных структурных элементов (слоистости, сланцеватости, контактов, крыльев складок) и шарниров для няртинского комплекса: (а) плоскостные элементы (количество замеров n=152) и (б) шарниры (n=70) в районе верховья р. Кожим до устья ручья Николай-Шор, (в) плоскостные элементы (n=88) и (г) шарниры (n=32) в районе приустьевой части ручья Николай-Шор; для маньхобеинской свиты: (д) плоскостные (n=52) и (е) шарниры (n=34) в районе горы Хасаварка-Из и ручья Хасаварка.

Figure 7. Stereographic diagrams (lower hemisphere, equirectangular grid) of measurements of in-plane structural elements (foliation, cleavage, contacts, limbs of folds) and hinges for the Nyartinskiy complex: (a) planar elements (number of measurements n=152) and (b) hinges (n=70) in the area of the Upper Kozhim River to the mouth of the Nikolai-Shor stream, (v) planar elements (n=88) and (r) hinges (n=32) in the area of the mouth of the Nikolai-Shor stream; for the Mankhobeinskaya suite: (d) planar (n=52) and (e) hinges (n=34) in the area of the Khasavarka-Iz Mountain and the Khasavarka stream.

ских и нижнепалеозойских породах. В парагнейсах, уже претерпевших два этапа метаморфизма, данный этап приводит к развитию будинажа и процессов бластомилонитизации, а также частичной грануляции. Преобладают открытые и пологие складки третьей генерации, деформирующие крылья складок первой генерации с шарнирами, погружающимися на север под небольшими углами. В минеральном плане отмечается развитие хлорита по гранату и биотиту. Рассчитанные температуры кристаллизации хлоритов по геотермометру Занга и Файфа [26] в парагнейсах няртинского комплекса и маньхобеинской свиты равны 285–232 °С (n=12), что соответствует фации зеленых сланцев (В<sub>4</sub>). Возраст данного этапа оценивается в 260–240 млн лет [27].

## Заключение

Полученные петрографические и минералогические данные в совокупности с результатами структурных исследований дают основание считать, что породы няртинского комплекса и маньхобеинской свиты испытали как минимум двукратную структурно-метаморфическую переработку. Согласно установленным структурным особенностям, а также материалам [2–7, 18], можно выделить еще один, более ранний (первый) тектоно-метаморфический этап, проявленный в наличии складок и сланцеватости первой генерации и реликтовых минералов. Следующий этап метаморфизма характеризуется прогрессивным РТ-трендом. Уточнены пиковые параметры метаморфизма, которые соответствуют уровню эпидот-амфиболовой фации повышенных давлений (T=606–527 °С, P=7.9–8.9 кбар). Процессы данного этапа метаморфизма коррелируются с развивающимися по складкам первой генерации асимметричными подобными складками второй генерации в парагенезисе с кливажем-сланцеватостью. Процессы низкотемпературного диафореза проходили в условиях фации зеленых сланцев (В<sub>4</sub>). Они проявились в парагнейсах няртинского комплекса и маньхобеинской свиты в замещении хлоритом граната и биотита, развитии вторичных структурных преобразований (образование прямых открытых и пологих складок третьей генерации в парагенезисе с поздней сланцеватостью, бластомилонитизация, будинаж, грануляция). Это подтверждает представление о том, что основание докембрийского разреза Приполярного Урала сложено полиметаморфическими образованиями [2, 3].

Новые данные об РТ-условиях второго и третьего этапов метаморфизма пород, а также связи процессов метаморфизма и деформации являются дополнительным аргументом, указывающим на ошибочность выделения маньхобеинской свиты в качестве самостоятельного стратиграфического подразделения, и подтверждением точки зрения о том, что в качестве названной свиты выделены низкотемпературные диафориты по метаморфическим образованиям няртинского комплекса.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Источники и литература

1. Пыстин, А. М. U-Pb (LA-SF-ICP-MS) возраст и вероятные источники сноса детритовых цирконов из терригенных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала / А. М. Пыстин, О. В. Гракова, Ю. И. Пыстина, Е. В. Кушманова, К. С. Попвасев [и др.] // Литосфера. – 2022. – № 6. – С. 741–760. – DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-76>.
2. Пыстин, А. М. Базальные отложения верхнего докембрия в Тимано-Североуральском регионе // А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина // Литосфера. – 2014. – № 3. – С. 41–50.
3. Пыстин, А. М. Докембрий Приполярного Урала: хроностратиграфический аспект / А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина // Труды Карельского научного центра РАН. – 2019. – № 2. – С. 34–52. – DOI: <http://dx.doi.org/10.17076/geo904>.
4. Потапов, И. Л. Структурная эволюция докембрийских пород северной части Приполярного Урала / И. Л. Потапов, К. С. Попвасев // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2017. – № 10. – С. 9–20.
5. Попвасев, К. С. Минералогия и РТ-условия образования амфиболитов няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты Приполярного Урала / К. С. Попвасев // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – Т. 21, № 3. – С. 216–228. – DOI: <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.3.216>.
6. Тимонина, Р. Г. Петрология метаморфических пород Приполярного Урала / Р. Г. Тимонина. – Ленинград: Наука, 1980. – 100 с.
7. Пыстин, А. М. Полиметаморфические комплексы западного склона Урала / А. М. Пыстин. – Санкт-Петербург: Наука, 1994. – 208 с.
8. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Серия Северо-Уральская. Лист Q-41-XXV. Объяснительная записка. – Москва: МФ ВСЕГЕИ, 2013. – 252 с.
9. Berman, R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique with petrologic applications / R. G. Berman, L. Ya. Aranovich // Canadian Mineralogist. – 1991. – Vol. 29. – P. 833–855.
10. Berman, R. G. Optimized standard state and solution properties of minerals. I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO–MgO–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> / R. G. Berman // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1996. – Vol. 126. – № 1–2. – P. 1–24. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100050232>.
11. Aranovich, L. Ya. Optimized standard state and solution properties of minerals. II. Comparisons, predictions, and applications / L. Ya. Aranovich, R. G. Berman // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1996. – Vol. 126. – № 1–2. – P. 25–37. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100050233>.
12. Юдович, Я. Э. Очерки литохимии Тимано-Уральского региона / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис, В. В. Терешко, Н. В. Рыбина. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2016. – 236 с.

13. Маркова, П. А. Няртинский метаморфический комплекс Приполярного Урала: первичная природа метаморфических пород и палеогеографические условия формирования протолитов / П. А. Маркова // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2016. – № 7. – С. 19–32.
14. Предовский, А. А. Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия / А. А. Предовский. – Ленинград : Наука, 1980. – 152 с.
15. Tischendorf, G. A new graphical presentation and subdivision of potassium micas. / G. Tischendorf, M. Rieder, H. Förster, B. Gottsmann, C. Guidotti // *Mineralogical Magazine*. – 2004. – Vol. 68(4). – P. 649–667. – DOI: <https://doi.org/10.1180/0026461046840210>.
16. Hey, M. H. A new review of the chlorites / M. H. Hey // *Mineralogical Magazine*. – 1954. – Vol. 30. – P. 277–292.
17. Пыстина, Ю. И. Цирконовая летопись Уральского докембрия / Ю. И. Пыстина, А. М. Пыстин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 168 с.
18. Пыстин, А. М. Метаморфизм и гранитообразование в протерозойско-раннепалеозойской истории формирования Приполярноуральского сегмента земной коры / А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина // *Литосфера*. – 2008. – № 6. – С. 25–38.
19. Kleemann, U. Garnet-biotite thermometry revisited; the effect of Al[VI] and Ti in biotite / U. Kleemann, J. Reinhardt // *European Journal of Mineralogy*. – 1994. – Vol. 6 (6). – P. 925–941.
20. Holdaway, M. J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet-biotite geothermometer / M. J. Holdaway. – 2000. – *American Mineralogist*. – Vol. 85. – P. 881–892.
21. Kaneko, Y. Recalibration of mutually consistent garnet-biotite and garnet-cordierite geothermometers / Y. Kaneko, T. Miyano // *Lithos*. – 2004. – Vol. 73(3–4). P. 255–269. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.009>, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.09.003>.
22. Hoisch, T. D. Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet / T. D. Hoisch // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – Vol. 104. – P. 225–234. – DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00306445>.
23. Wu, C. M. Revised empirical garnet-biotite-muscovite-plagioclase geobarometer in metapelites / C. M. Wu // *Journal of Metamorphic Geology*. – 2015. – Vol. 33(2). – P. 167–176. – DOI: <https://doi.org/10.1111/jmg.12115>.
24. Добрецов, Н. Л. Фации метаморфизма / Н. Л. Добрецов, В. В. Ревердатто, В. С. Соболев, Н. В. Соболев, В. В. Хлестов. – Москва : Наука, 1970. – Т. 1. – 432 с.
25. Андреичев, В. Л. Эволюция фундамента Печорской плиты по изотопно-геохронологическим данным: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук / В. Л. Андреичев. – Екатеринбург, 2010. – 47 с.
26. Zang, W. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit Carajás, Brazil / W. Zang, W. S. Fyfe // *Mineralium Deposita*. – 1995. – Vol. 30. – P. 30–38 (1995). – DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00208874>.
27. Андреичев, В. Л. Изотопная геохронология доуралид Приполярного Урала / В. Л. Андреичев. – Сыктывкар, 1999. – 48 с.

## References

1. Pystin, A. M. U-Pb (LA-SF-ICP-MS) возраст и вероятные источники сноса детритовых цирконов из терригенных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала [U-Pb (LA-SF-ICP-MS) age and probable sources of detrital zircons from terrigenous deposits of the Upper Precambrian of the Subpolar Urals] / A. M. Pystin, O. V. Grakova, Yu. I. Pystina, E. V. Kushmanova, K. S. Popvasev [et al.] // *Litosfera [Lithosphere]*. – 2022. – № 6. – P. 741–760. – DOI: <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-76>.
2. Pystin, A. M. Bazal'nyye otlozheniya verkhnego dokembriya v Timano-Severoural'skom regione [Basal deposits of the Upper Precambrian in the Timan-Northern Urals region] // A. M. Pystin, Yu. I. Pystina // *Litosfera [Lithosphere]*. – 2014. – № 3. – P. 41–50.
3. Pystin, A. M. Dokembriy Pripolyarnogo Urala: khronostratigraficheskiy aspekt [Precambrian of the Subpolar Urals : chronostratigraphic aspect] / A. M. Pystin, Yu. I. Pystina // *Proceedings of the Karelian Science Centre of the Russian Academy of Sciences*. – 2019. – № 2. P. 34–52. – DOI : <http://dx.doi.org/10.17076/geo904>.
4. Potapov, I. L. Strukturnaya evolyutsiya dokembriyskikh porod severnoy chasti Pripolyarnogo Urala [Structural evolution of Precambrian rocks of the northern part of the Subpolar Urals] / I. L. Potapov, K. S. Popvasev // *Bulletin of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. – 2017. – № 10. – P. 9–20.
5. Popvasev, K. S. Mineralogiya i PT usloviya obrazovaniya amfibolitov nyartinskogo metamorficheskogo kompleksa i man'khobeinskoy svity Pripolyarnogo Urala [Mineralogy and PT conditions for the formation of amphibolites of the Nyartinskiy metamorphic complex and the Mankhobeinskaya suite of the Subpolar Urals] / K. S. Popvasev // *Bulletin of the Perm University. Geology*. – 2022. – Vol. 21. – № 3. – P. 216–228. – DOI : <https://doi.org/10.17072/psu.geol.21.3.216>.
6. Timonina, R. G. Petrologiya metamorficheskikh porod Pripolyarnogo Urala [Petrology of metamorphic rocks of the Subpolar Urals] / R. G. Timonina – Ленинград : Nauka, 1980. – 100 p.
7. Pystin, A. M. Polimetamorficheskiye komplekсы zapadnogo sklona Urala [Polymetamorphic complexes of the western slope of the Urals] / A. M. Pystin. – Saint-Petersburg : Nauka, 1994. – 208 p.
8. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000. North-Ural series. Sheet Q-41-XXV. Explanatory letter. – Moscow : MF VSEGEI, – 2013. – 252 p.
9. Berman, R. G. Thermobarometry using multiequilibrium calculations : a new technique with petrologic applications / R. G. Berman, L. Ya. Aranovich // *Canadian Mineralogist*. – 1991. – Vol. 29. – P. 833–855.

10. Berman, R. G. Optimized standard state and solution properties of minerals. I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, and ilmenite in the system FeO–MgO–CaO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> / R. G. Berman // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1996. – Vol. 126. – № 1–2. – P. 1–24. DOI : <https://doi.org/10.1007/s004100050232>.
11. Aranovich, L. Ya. Optimized standard state and solution properties of minerals. II. Comparisons, predictions, and applications / L. Ya. Aranovich, R. G. Berman // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1996. – Vol. 126. – № 1–2. – P. 25–37. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s004100050233>.
12. Yudovich, Ya. E. Ocherki litokhimii Timano-Ural'skogo regiona [Essays on lithochemistry of the Timan-Ural region] / Ya. E. Yudovich, M. P. Ketris, V. V. Tereshko, N. V. Rybina. – Syktyvkar : Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch RAS, 2016. – 236 p.
13. Markova, P. A. Nyartinskiy metamorficheskiy kompleks pripolyarnogo Urala : pervichnaya priroda metamorficheskikh porod i paleogeograficheskiye usloviya formirovaniya protolitov [The Nyartinskiy metamorphic complex of the Subpolar Urals : the primary nature of metamorphic rocks and paleogeographic conditions for the formation of protoliths] / P. A. Markova // Bulletin of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2016. – № 7. – P. 19–32.
14. Predovskiy, A. A. Rekonstruktsiya usloviy sedimentogeneza i vulkanizma rannego dokembriya [Reconstruction of the conditions of sedimentogenesis and volcanism of the Early Precambrian] / A. A. Predovskiy. – Leningrad : Nauka, 1980. – 152 p.
15. Tischendorf, G. A new graphical presentation and subdivision of potassium micas / G. Tischendorf, M. Rieder, H. Förster, B. Gottesmann, C. Guidotti // Mineralogical Magazine. – 2004. – Vol. 68(4). – P. 649–667. – DOI: <https://doi.org/10.1180/0026461046840210>.
16. Hey, M. H. A new review of the chlorites / M. H. Hey // Mineralogical Magazine. – 1954. – Vol. 30. – P. 277–292.
17. Pystina, Yu. I. Tsrkonovaya letopis' Ural'skogo dokembriya [Zircon chronicle of the Ural Precambrian] / Yu. I. Pystina, A. M. Pystin. – Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. – 168 p.
18. Pystin, A. M. Metamorfizm i granitobrazovaniye v proterozoysko-rannepaleozoyskoy istorii formirovaniya Pripolyarnoural'skogo segmenta zemnoy kory [Metamorphism and granite formation in the Proterozoic–Early Paleozoic history of the formation of the Subpolar Ural segment of the Earth's crust] / A. M. Pystin, Yu. I. Pystina // Litosfera [Lithosphere]. – 2008. – № 6. – P. 25–38.
19. Kleemann, U. Garnet–biotite thermometry revisited : The effect of Al[VI] and Ti in biotite / U. Kleemann, J. Reinhardt // European Journal of Mineralogy. – 1994. – Vol. 6 (6). – P. 925–941.
20. Holdaway, M. J. Application of new experimental and garnet Margules data to the garnet–biotite geothermometer / M. J. Holdaway. – 2000. – American Mineralogist. – Vol. 85. – P. 881–892.
21. Kaneko, Y. Recalibration of mutually consistent garnet–biotite and garnet–cordierite geothermometers / Y. Kaneko, T. Miyano // Lithosphere. – 2004. – Vol. 73 (3–4). – P. 255–269. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.009>, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.09.003>.
22. Hoisch, T. D. Empirical calibration of six geobarometers for the mineral assemblage quartz + muscovite + biotite + plagioclase + garnet / T. D. Hoisch // Contributions to Mineralogy and Petrology. – Vol. 104. – P. 225–234. – DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00306445>.
23. Wu, C. M. Revised empirical garnet–biotite–muscovite–plagioclase geobarometer in metapelites / C. M. Wu // Journal of Metamorphic Geology. – 2015. – Vol. 33 (2). – P. 167–176. – DOI: <https://doi.org/10.1111/jmg.12115>.
24. Dobretsov, N. L. Fatsii metamorfizma [Facies of metamorphism] / N. L. Dobretsov, V. V. Reverdatto, V. S. Sobolev, N. V. Sobolev, V. V. Khlestov. – Moscow : Nauka, 1970. – Vol. 1. – 432 p.
25. Andreichev, V. L. Evolyutsiya fundamenta Pechorskoy plity po izotopno-geokhronologicheskim dannym [Evolution of the basement of the Pechora plate according to isotope–geochronological data]: extended abstract of Doctor's thesis (Geology and Mineralogy) / V. L. Andreichev. – Ekaterinburg, 2010. – 47 p.
26. Zang, W. Chloritization of the hydrothermally altered bedrock at the Igarapé Bahia gold deposit, Carajás, Brazil / W. Zang, W. S. Fyfe // Mineralium Deposita. – 1995. – Vol. 30. – P. 30–38 (1995). – DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00208874>.
27. Andreichev, V. L. Izotopnaya geokhronologiya douralid Pripolyarnogo Urala [Isotope geochronology of pre-uralids of the Subpolar Urals] / V. L. Andreichev. – Syktyvkar, 1999. – 48 p.

#### Информация об авторах:

**Попвасев Константин Степанович** – младший научный сотрудник Геологического музея им. А. А. Чернова Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [kspovvasev@geo.komisc.ru](mailto:kspovvasev@geo.komisc.ru)).

**Потапов Игорь Леонидович** – кандидат геолого–минералогических наук, научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [ilpotapov@geo.komisc.ru](mailto:ilpotapov@geo.komisc.ru)).

**About the authors:**

**Konstantin S. Popvasev** – Junior Researcher at the A. A. Chernov Geological Museum at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: kspovvasev@geo.komisc.ru).

**Igor L. Potapov** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: ilpotapov@geo.komisc.ru).

**Для цитирования:**

Попвасев, К. С. Парагнейсы няртинского метаморфического комплекса и маньхобеинской свиты (Приполярный Урал): метаморфизм, минеральные и структурные особенности / К. С. Попвасев, И. Л. Потапов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 27–40.

**For citation:**

Popvasev, K. S. Paragnejsy nyartinskogo metamorficheskogo kompleksa i manhobeinskoj svity (Pripolyarnyj Ural): metamorfizm, mineralnye i strukturnye osobennosti [Paragneisses of the Nyartinskiy metamorphic complex and the Mankhobeinskaya suite (Subpolar Urals): metamorphism, mineral and structural properties] / K. S. Popvasev, I. L. Potapov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 27–40.

Дата поступления статьи: 04.04.2024

Прошла рецензирование: 05.05.2024

Принято решение о публикации: 17.05.2024

Received: 04.04.2024

Reviewed: 05.05.2024

Accepted: 17.05.2024

## Диориты массива «Диоритовый» (Полярный Урал): геохронологические и изотопно-геохимические данные

О. В. Удоратина\*, И. Д. Соболев\*\*, А. С. Шуйский\*

\* Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар

\*\* Институт геологии рудных месторождений, петрографии,  
минералогии и геохимии РАН,  
г. Москва

udoratina@geo.komisc.ru  
id\_sobolev@igem.ru  
self88@yandex.ru

### Аннотация

Впервые приведена изотопно-геохимическая характеристика Lu-Hf изотопной системы цирконов из пород массива «Диоритовый», детально рассмотрены результаты U-Pb (SIMS) датирования и микроэлементный состав цирконов из этого массива. На основании петро-геохимических и изотопно-геохимических данных установлено, что диориты массива формировались в ранне-среднедевонское (эмско-эйфельское) время в островодужной геодинамической обстановке из ювенильного мантийного (почти одно-возрастного с ними) протолита, на что указывают положительные значения  $\epsilon\text{Hf}(t)$  и модельный возраст  $T_{\text{DM}(2)}$ .

### Ключевые слова:

циркон, U-Pb возраст, изотопный состав гафния, Полярный Урал

### Введение

На Полярном Урале в пределах Восточно-Уральской мегазоны (Малоуральская подзона), восточнее крупнейших Рай-Изского и Войкаро-Сыньинского офиолитовых массивов (рис. 1, а) на поверхность выведены многочисленные массивы среднепалеозойских гранитоидов. Интрузивные породы слагают Собский (Лагортинско-Кокпельский) батолит (рис. 1, б), который имеет субмеридиональное (ССВ-ЮЮЗ) простирание и прослеживается на 200 км при ширине 10–40 км. Батолит слагают породы трех плутонических комплексов: 1. (ранняя интрузивная фаза): габбро; (главная интрузивная фаза): кварцевые диориты, тоналиты, трондьемиты собского ( $q\delta D_{1,s}$ ); 2. кварцевые монцодиориты конгорского ( $q\delta D_{1-2,k}$ ); 3. гранодиориты и биотитовые граниты янаслорского ( $y\delta D_{3,ja}$ ).

По геологическим данным время формирования пород конгорского комплекса установлено как средне-поздне-девонское [1], определение абсолютного возраста проводилось различными геохронологическими методами.

## Diorites of the Dioritoviy massif (Polar Urals): geochronological and isotope-geochemical data

O V. Udoratina\*, I. D. Sobolev\*\*, A. S. Shuyskiy\*

\* Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar

\*\* Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy  
and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow

udoratina@geo.komisc.ru  
id\_sobolev@igem.ru  
self88@yandex.ru

### Abstract

For the first time, the Lu-Hf isotope system of zircons from rocks of the Dioritoviy massif has been characterized and the results of U-Pb (SIMS) dating and the micro-elemental composition of zircons from this massif have been examined in detail. By the petro-geochemical and isotope-geochemical data, diorites of the massif have been found to be formed in the Early and Middle Devonian (Emsian-Eifelian) time in the island-arc geodynamic conditions of a juvenile mantle (almost coeval with diorites) protolith, as indicated by  $\epsilon\text{Hf}(t)$  positive values and  $T_{\text{DM}(2)}$  model age.

### Keywords:

zircon, U-Pb age, hafnium isotope composition, Polar Urals

Установленный возраст составил: 404±8 млн лет (Rb-Sr<sub>wr</sub>) [2], 331±7, 331±5, 310±20, 342±3 млн лет (K-Ar<sub>wr,Min</sub>) [3], 380–363 млн лет (Zrn, U-Pb (SIMS)) [4], 388–392 млн лет (Zrn, U-Pb (LA-ICP-MS)) [5]. Возраст габбро-диоритов (ранней фазы собского комплекса) 418±2 млн лет [6].

На сегодняшний день установлено, что формирование пород комплексов происходило последовательно [7], однако многие характеристики, особенно изотопно-геохимические, до конца не установлены. В 2014 г. нами были опробованы породы конгорского комплекса в средней части Собского батолита. Ниже приводятся результаты комплексных исследований.

### Материалы и методы

На базе ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар) проведены: петрографические (Olympus BX51) и микронзондовые (сканирующий микроскоп Tescom Vega 3 LMN с энергодисперсным спектрометром X-Max) ис-

следования; данные по содержанию петрогенных элементов получены классическим химическим методом. Данные по содержанию редких, рассеянных и редкоземельных элементов определены ICP MS в ЦЛ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). В Стэнфордском университете (США) проведены исследования единичных кристаллов циркона (U-Pb SIMS, SHRIMP RG); получены данные по содержанию в цирконе Ti, Y, Hf, REE, а также катодолюминесцентные изображения кристаллов циркона. Монофракции циркона были интегрированы в эпоксидную шашку, в которую разместили также и стандарты, методика исследований описана в работе [8]. По содержанию в цирконе Ti рассчитаны температуры кристаллизации [9]. Изотопный состав Lu-Hf в продатированных кристаллах циркона определен в Институте геологии и минеральных ресурсов (г. Тяньцзинь, Китай) по методике, описанной в работе [10]. Для пересчета нормативного состава породы использована программа Magma, для расчета температуры кристаллизации породы (Px-Amf, Pl-Amf) – программа PetroExplorer.

## Результаты и их обсуждение

Породы массива «Диоритовый» выведены на поверхность в вершинной части горы Северная Манюкую (верхнее течение р. Манюкую) на восточном склоне Полярного Урала (рис. 1, в). Массив имеет форму силла, мощность которого не превышает 75 м. Подошва силла субгоризонтальна, а кровля эродирована. Предшественниками породы массива отнесены к позднедевонско-раннекаменноугольному конгорскому комплексу [11]. Они контактируют с кристаллокластическими туфами и игнимбритами адезидацитового и дацитового составов силурийско-девонской малоуральской свиты. В экзоконтактовой зоне наблюдаются ороговивание, окварцование, а также сульфидная минерализация.

Породы массива представлены биотитсодержащими двупироксеновыми диоритами. Породы серые, темно-серые с зеленоватым оттенком, массивные, равномерно-зернистые. Под микроскопом наблюдаются порфириовидная, гипидиоморфно-зернистая микроструктуры (рис. 2, а-г). Минеральный состав (об., %): плагиоклаз (40), ортопироксен+клинопироксен (5), амфибол (25), биотит (10), калиевый полевой шпат (5), кварц (5). Акцессорные минералы (1) представлены апатитом (F-2.6 вес. %),

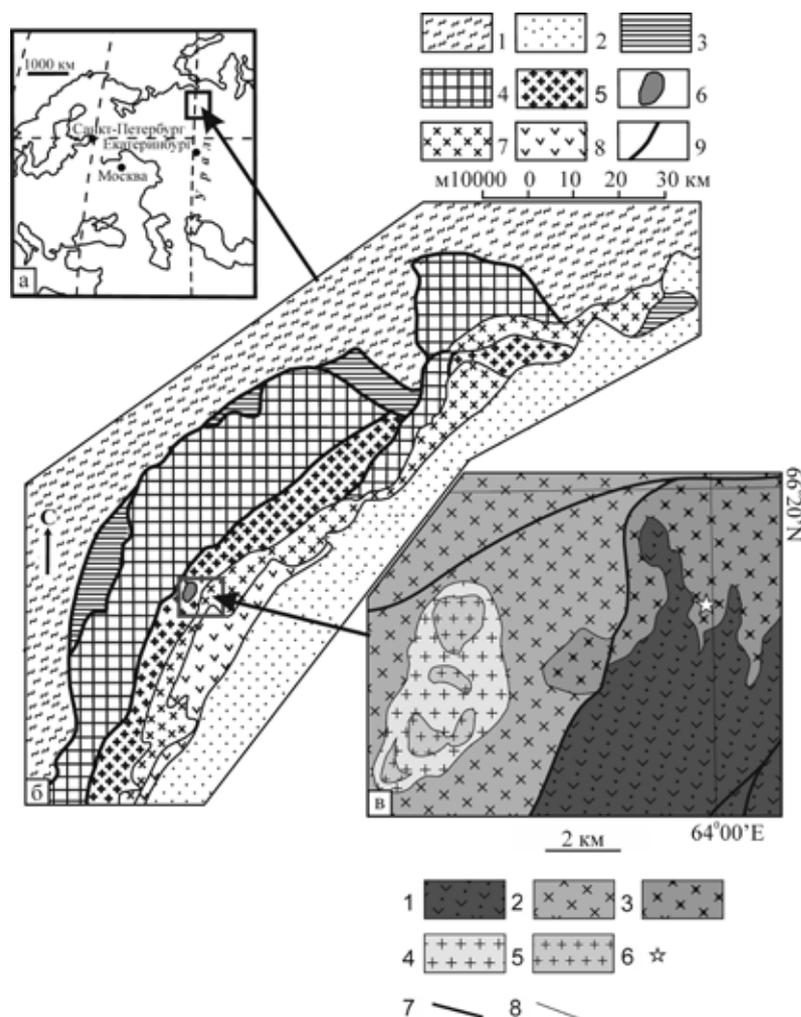


Рисунок 1. Географическое положение (а), тектоническая схема (б) и фрагмент геологической карты листа Q-41-XVI с авторскими дополнениями и изменениями (в). б: Тектоническая схема центральной и южной частей Полярного Урала: 1 – Западно-Уральская мегазона (допалеозойские и палеозойские образования, нерасчлененные); 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–8 – ранне-среднепалеозойские образования Войкарской зоны Восточно-Уральской мегазоны: 3 – метабазиты и гипербазиты Дзеляюско-Хордююской подзоны, 4 – гипербазиты и габброиды Райизско-Войкарской подзоны, 5–8 – образования Малоуральской подзоны: 5 – плагиогранитоиды собского, 6 – гранитоиды янаслорского, 7 – монзонитоиды и габброиды конгорского плутонических комплексов, 8 – палеозойские осадочно-вулканогенные образования; 9 – разрывные нарушения. в: Фрагмент геологической карты листа Q-41-XVI: 1 – позднесилурийско-среднедевонские вулканиты малоуральской свиты; 2 – ранне-среднедевонские плагиогранитоиды собского комплекса; 3 – диориты конгорского комплекса (массив «Диоритовый»); 4, 5 – гранитоиды янаслорского комплекса (Янаслорский массив), первая (4) и вторая (5) фазы внедрения; 6 – место отбора пробы (U60-14) для U-Pb датирования цирконов; 7 – разрывные нарушения; 8 – геологические границы. Figure 1. Geographical location (a), tectonic sketch-map (b) and fragment of the geological map, sheet Q41-XVI, with the author's additions and changes (v). б: Tectonic sketch-map of the central and southern parts of the Polar Urals. 1 – West-Ural megazone (pre-Paleozoic and Paleozoic formations, undivided); 2 – Mesozoic-Cenozoic sedimentary cover of the West-Siberian Plate; 3–8 – Early and Middle Paleozoic formations of the Voykar zone of the East-Ural megazone: 3 – metabasites and hyperbasites of the Dzelyayu-Khordyu subzone; 4 – hyperbasites and gabbroids of the Rayiz-Voykar subzone; 5–8 – formations of the Maloural subzone (5 – plagiogranitoids of the Sobskiy, 6 – granitoids of the Yanaslorskiy, 7 – monzonitoids and gabbroids of the Kongorskiy plutonic complexes; 8 – Paleozoic sedimentary-volcanogenic formations); 9 – discontinuous violations. в: Fragment of geological map, sheet Q-41-XVI. 1 – Late Silurian-Middle Devonian vulkanites of the Maloural formation; 2 – Early-Middle Devonian plagiogranitoids of the Sobskiy complex; 3 – presumably Middle Devonian-Early Carbonic diorites of the Kongorskiy complex (Dioritoviy massif); 4–5 – granitoids of the Yanaslorskiy complex (Yanaslorskiy massif), the first (4) and second (5) phases of intrusion; 6 – sampling location (U60-14) for U-Pb dating of zircons; 7 – discontinuities; 8 – geological boundaries.

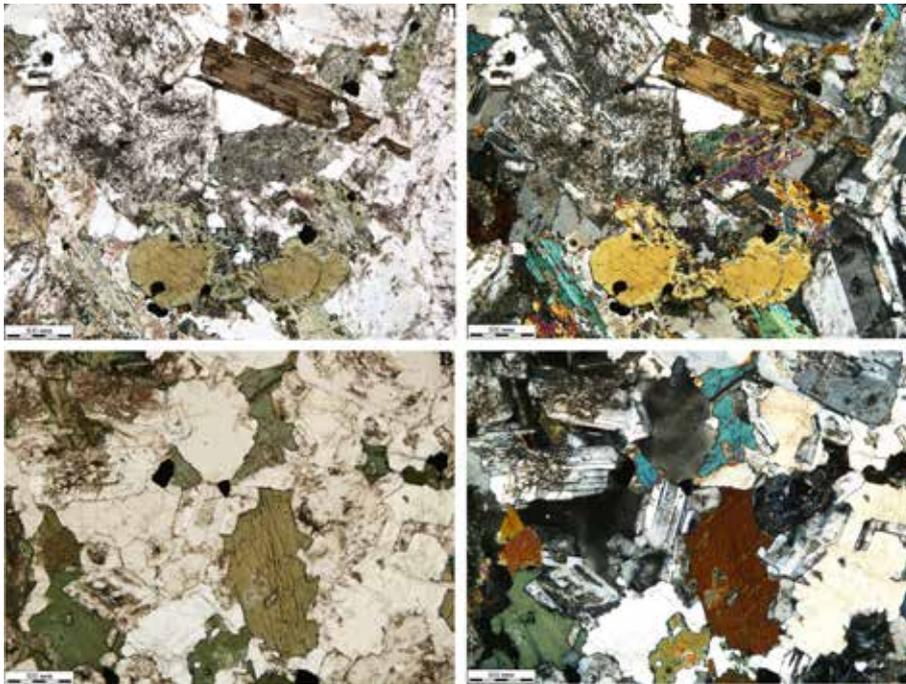


Рисунок 2. Микроструктура биотитсодержащих двупироксеновых диоритов.  
Figure 2. Microstructure of biotite-containing biopyroxene diorites.

сена, представленного авгитом ( $x_{Mg}=0.70$ ) (рис. 3, а-в, рис. 4, б). Пироксены обрастают амфиболом (роговой обманкой ( $x_{Mg}=0.47-0.52$ )), формирующим каймы (рис. 3, а-в, рис. 4, в). Кроме того, наблюдаются агрегаты, сложенные роговой обманкой совместно с калиевым полевым шпатом. В матрице также определяются плагиоклаз, амфиболизированные моноклинный и ромбический пироксены, отмечаются биотит ( $x_{Mg}=0.48-0.51$ ), небольшое количество кварца и калиевого полевого шпата в межзерновых интерстициях. Слюда представлена биотитом ( $x_{Mg}=0.48-0.52$ ) (рис. 3, а-в, рис. 4, г). Хлорит, развивающийся по биотиту, – пикнохлоритом ( $x_{Mg}=0.53-0.55$ ) (рис. 3, а-в). Наблюдаемые вторичные изменения в породе

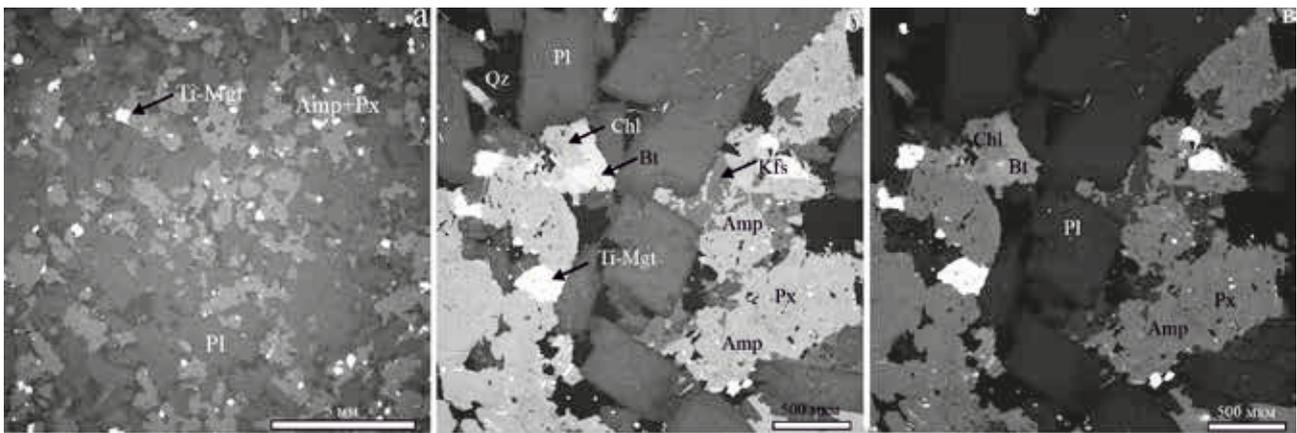


Рисунок 3. Изображения в обратно-отраженных электронах: а – микроструктура диорита; б, в – деталь: вкрапленники зонального плагиоклаза, замещение хлоритом биотита, обрастание амфиболом (роговая обманка) пироксена (авгит), совместное развитие амфибола и калиевого полевого шпата, рудный титаномагнетит. Обозначения минералов: Pl – плагиоклаз, Px – пироксен, Amp – амфибол (роговая обманка), Bt – биотит, Qz – кварц, Kfs – калиевый полевой шпат, Chl – хлорит, Ti-Mgt – титано-магнетит.

Figure 3. Back-scattered electron (BSE) images: а – microstructure of diorite, б, в – detail: phenocrysts of zoned plagioclase, replacement of biotite by chlorite, overgrowth of pyroxene (augite and enstatite) by amphibole (hornblende), joint development of amphibole and potassium feldspar, titanomagnetite. Mineral symbols: Pl – plagioclase, Px – pyroxene, Amp – amphibole (hornblende), Bt – biotite, Qz – quartz, Kfs – potassium feldspar, Chl – chlorite, Ti-Mgt – titanomagnetite.

титаном, цирконом. Рудные – Ti-магнетитом (5), вторичные минералы – хлоритом. Химические составы минералов и пересчет на формульные единицы и миалы приведены в табл. 1 (плагиоклаз и калиевый полевой шпат) и табл. 2 (пироксены, амфиболы, слюда, хлорит).

Порфириовидные выделения представлены субидiomорфными табличками зонального плагиоклаза (рис. 3, а-в, рис. 4, а): в центральных частях – как правило, лабрадором ( $An_{56-63}$ ), реже – битовнитом ( $An_{72}$ ), в краевых частях – андезином ( $An_{29-37}$ ). Пироксен слагает, наряду с другими минералами, основную массу и представлен удлиненно-призматическими кристаллами ортопироксена, представленного энстатитом ( $x_{Mg}=0.58$ ), и клинопирок-

представлены умеренной сосюритизацией и серицитизацией плагиоклаза, амфиболизацией пироксенов, пелитизацией щелочного полевого шпата, хлоритизацией биотита, а также в развитии эпидота.

Согласно рекомендациям Петрографического кодекса [12], на основании минералого-петрографических и петрохимических характеристик исследуемые породы отнесены к семейству диоритов, средним плутоническим породам  $<52\text{SiO}_2\text{,}63\text{>}$ , подотряду нормально- и низкощелочных  $<1.5\text{E}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})\text{E}7\text{>}$ . Согласно нормативному пересчету CIPW-An (25.19), Ab (20.36), Qz (13.44), Di (12.43), Hy (8.16), Qr (8.93), Mt (8.86), Il (1.23), Hm (0.98), Ap (0.40).

Таблица 1

## Химический состав (мас., %) плагиоклазов и калиевых полевых шпатов

Table 1

## Chemical composition (wt., %) of plagioclases and alkali feldspars

Компоненты Components	Pl-к	Pl-ц	Pl-к	Pl-ц	Pl-к	Pl-к	Pl-ц	Pl-к	Pl-ц	Pl-к	Pl-ц	Pl-к	Kfs	Kfs
SiO <sub>2</sub>	59.52	53.08	60.91	49.96	53.11	59.35	53.09	59.45	52.31	59.78	54.63	60.28	64.78	65.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	25.41	28.95	24.04	32.24	30.2	25.75	30.19	25.79	30.35	25.66	28.73	25.09	18.63	18.54
FeO	-	0.43	0.41	0.72	-	-	0.5	-	0.47	-	-	-	-	-
CaO	7.04	11.4	5.78	14.99	12.72	6.76	12.55	7.44	12.91	7.27	11.45	7.31	0.19	-
Na <sub>2</sub> O	6.85	4.55	7.63	2.96	4.33	6.97	4.22	6.67	3.93	6.97	4.61	6.93	0.45	0.87
K <sub>2</sub> O	0.48	0.28	0.37	0.22	0.36	0.56	0.25	0.41	0.26	0.34	0.31	0.65	16.53	15.52
Сумма Sum	99.3	98.69	99.14	101.09	100.72	99.39	100.8	99.76	100.23	100.02	99.73	100.26	100.58	100.58
Формульные коэффициенты / Formula coefficients														
Si	2.68	2.44	2.74	2.26	2.39	2.67	2.39	2.67	2.37	2.68	2.48	2.69	2.97	3.01
Al	1.35	1.57	1.28	1.72	1.60	1.37	1.60	1.37	1.62	1.35	1.54	1.32	1.01	1.00
Fe	-	0.02	0.02	0.03	-	-	0.02	-	0.03	-	-	-	-	-
Ca	0.34	0.56	0.28	0.73	0.61	0.33	0.61	0.36	0.63	0.35	0.56	0.35	0.01	-
Na	0.60	0.41	0.67	0.26	0.38	0.61	0.37	0.58	0.35	0.61	0.41	0.60	0.04	0.08
K	0.03	0.02	0.02	0.01	0.02	0.03	0.01	0.024	0.02	0.02	0.02	0.02	0.04	0.97
Миналы / Minals														
X(Ca)	0.35	0.57	0.29	0.73	0.61	0.34	0.61	0.37	0.64	0.36	0.57	0.354	0.01	-
X(Na)	0.62	0.41	0.69	0.26	0.37	0.63	0.37	0.60	0.35	0.62	0.41	0.608	0.04	0.08
X(K)	0.03	0.02	0.022	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.038	0.95	0.92

Примечание. Pl – плагиоклаз, Kfs – калиевый полевой шпат, к – кайма, ц – центр.

Note. Pl – plagioclase, Kfs – potassium feldspar, k – margin, ts – centre.

Таблица 2

## Химический состав (мас., %) темноцветных минералов

Table 2

## Chemical composition (wt., %) of mafic minerals

Минералы Mineral	Amp-к	Amp-ц	Amp-к	Amp	Amp-к	Px-ц	Px	Px-ц	Px-ц	Bt			Chl	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
SiO <sub>2</sub>	49.17	47.53	49.82	48.74	48.95	55.75	54.77	53.32	52.83	32.31	37.36	37	27.35	27.57
TiO <sub>2</sub>	0.73	0.92	0.48	0.62	0.61	-	-	-	-	3.14	4.95	3.56	-	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.5	6.25	4.95	5.4	5.66	1.29	1.08	0.42	0.52	14.45	13.22	14.01	19.27	19.62
FeO	15.61	16.99	14.87	15.21	15.95	13.07	12.84	11	24.96	23.63	19.91	20.98	24.52	23.6
MnO	0.49	-	-	0.39	0.48	0.6	0.48	0.55	0.96	-	-	-	0.51	0.48
MgO	13.54	12.67	14.2	13.8	13.42	16.91	16.63	13.21	20.09	12.24	11.94	12.43	16.23	16.82
CaO	11.58	10.86	10.4	11.19	11.31	11.59	11.16	22.12	1.11	-	-	-	-	-
Na <sub>2</sub> O	1.06	1.3	1.02	1.04	1.03	-	0.29	0.41	-	-	-	-	-	-
K <sub>2</sub> O	0.43	0.7	0.47	0.54	0.62	0.12	-	-	-	4.65	8.87	8.13	-	-
Сумма Sum	98.11	97.22	96.21	96.93	98.03	99.33	97.25	101.03	100.47	90.42	96.25	96.11	87.88	88.09
Формульные коэффициенты / Formula coefficients														
Si	7.16	7.03	7.31	7.17	7.14	2.09	20.96	1.98	1.99	2.62	2.82	2.80	5.74	5.75
Ti	0.08	0.10	0.05	0.07	0.07	-	-	-	-	0.19	0.28	0.20	-	-
Al <sup>(IV)</sup>	0.84	0.97	0.69	0.84	0.86	-	-	0.02	0.01	1.38	1.18	1.20	2.25	2.24
Al <sup>(VI)</sup>	0.11	0.12	0.16	0.1	0.12	0.06	0.05	-	0.01	-	-	0.05	2.52	2.57
Fe <sup>3+</sup>	0.40	0.45	0.48	0.45	0.45	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-
Fe <sup>2+</sup>	1.51	1.65	1.35	1.42	1.50	0.41	0.41	0.29	0.79	1.6	1.26	1.33	4.3	4.11
Mn	0.06	-	-	0.05	0.06	0.02	0.02	0.02	0.03	-	-	-	0.09	0.08
Mg	2.94	2.79	3.11	3.02	2.92	0.10	0.95	0.73	1.13	1.48	1.34	1.40	5.08	5.22
Ca	1.81	1.72	1.64	1.76	1.77	0.47	0.46	0.88	0.05	-	-	-	-	-
Na	0.30	0.37	0.29	0.30	0.29	-	0.022	0.03	-	-	-	-	-	-
K	0.08	0.13	0.09	0.10	0.12	0.006	-	-	-	0.48	0.86	0.76	-	-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Миналы / Minerals														
X(Mg)	0.47	0.45	0.51	0.48	0.47	0.69	0.69	0.70	0.58	0.48	0.52	0.51	0.53	0.55
X(Fe)	0.24	0.27	0.22	0.23	0.24	0.22	0.22	0.15	0.40	-	-	-	-	-
X(Mn)	0.01	-	-	0.018	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	-	-	-	-	-
X(Ca)	0.29	0.28	0.27	0.28	0.28	0.25	0.25	0.46	0.02	-	-	-	-	-
Минерал	Роговая обманка					Авгит			Энстатит	Mg биотит			Пикнохлорит	

Примечание. Amp – амфибол, Px – пироксен, к – кайма, ц – центр, Bt – биотит, Chl – хлорит.

Note. Amp – amphibole, Px – pyroxene, k – margin, ц – centre, Bt – biotite, Chl – chlorite.

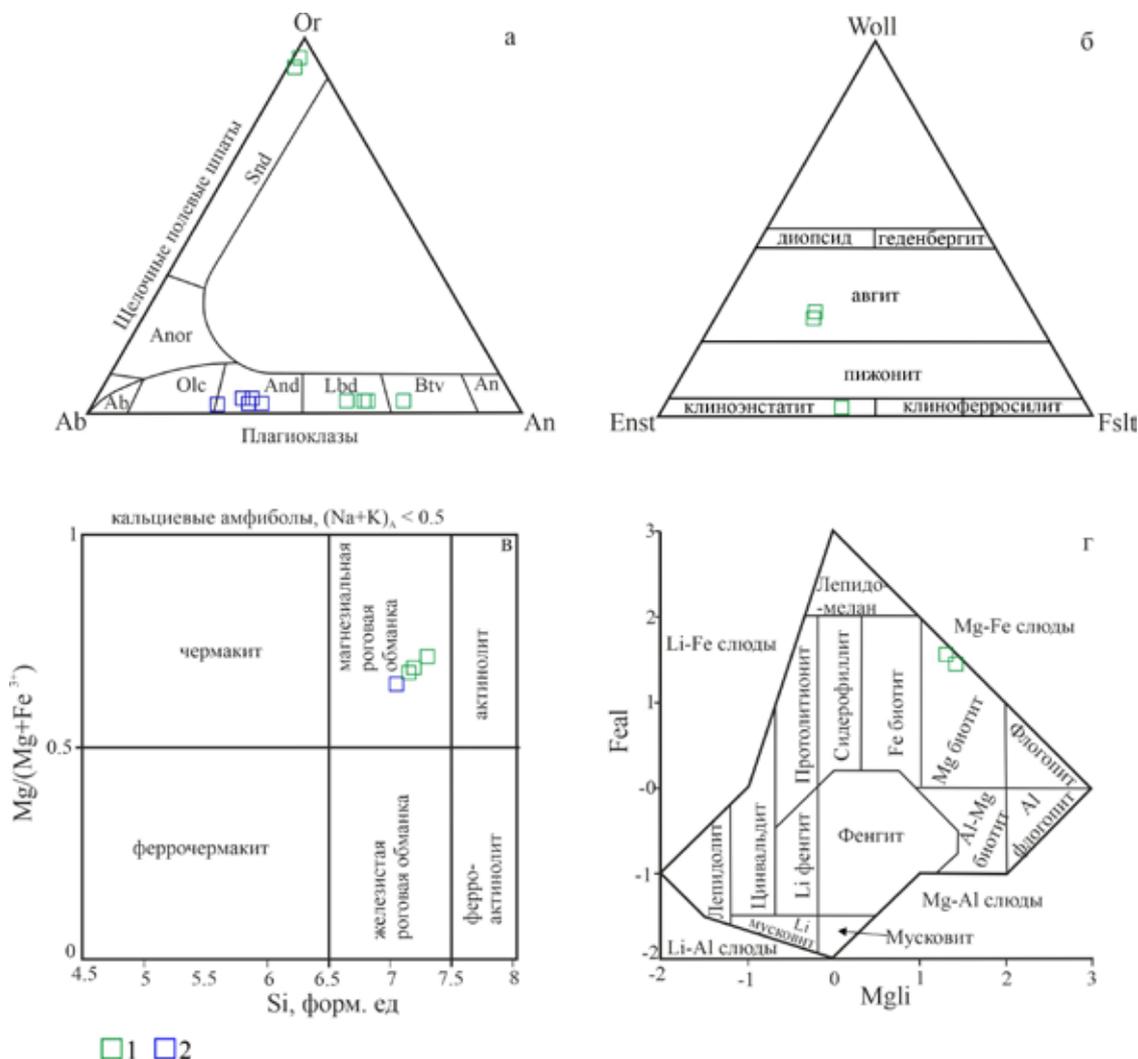


Рисунок 4. Классификационная диаграмма плагиоклазов и щелочных полевых шпатов (а), классификационная диаграмма Ca-Mg-Fe пироксенов (б), бинарная диаграмма MMA для классификации Ca амфиболов (в), классификационная диаграмма для слюд в координатах (Mg-Li) – (Fe+Mn+Ti-Al(VI)) (mgli-feal) (г).

Условные обозначения: 1 – центр, 2 – край.

Figure 4. Classification diagram for plagioclases and alkali feldspars (a), classification diagram for Ca-Mg-Fe pyroxenes (б), binary MMA diagram for classification of Ca amphibole (в), classification diagram for micas in coordinates (Mg-Li) – (Fe+Mn+Ti-Al(VI)) (mgli-feal) (г).

Symbols: 1 – centre, 2 – rim.

Содержание кремнезема (здесь и далее мас. %) составляет 54.3 (табл. 3, рис. 5, а), характерен калиево-натриевый тип щелочности ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0.63$ ) (рис. 5, б), умеренные и умеренно высокие содержания  $\text{TiO}_2$  (0.6),  $\text{MgO}$  (5.4),  $\text{CaO}$  (8.3),  $\text{K}_2\text{O}$  (1.5),  $\text{Fe}_2\text{O}_{\text{общ}}$  (10.3), невысокие  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14.4) и  $\text{Na}_2\text{O}$  (2.3).

Суммарное содержание редкоземельных элементов (далее – РЗЭ) в диоритах невысокое – 130 г/т (табл. 3).

Спектры распределения РЗЭ характеризуются обогащением легкими РЗЭ относительно тяжелых ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 5$ ) и слабо выраженным дефицитом Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.7$ ) (рис. 5, в). Для пород характерны незначительное обогащение крупноионными литофильными элементами относительно высокозарядных и хорошо проявленные Ta-Nb минимум и Pb максимум (рис. 5, г), что подчеркивает формирование пород в островодужных условиях.

Химический состав (мас. %, %) и содержание редких, рассеянных и редкоземельных элементов (г/т) в диоритах

Таблица 3

Chemical composition (wt. %, %) and content of rare, trace and rare earth elements (ppm) in diorites

Table 3

U60-14	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO
	54.28	0.63	14.41	6.88	3.08	0.15	5.44	8.29
	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	п.п.п.	H <sub>2</sub> O-	CO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O/ K <sub>2</sub> O
	2.34	1.47	0.18	1.55	0.33	<0.10	3.81	1.59
	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb
	272.00	68.20	27.40	18.30	147.00	62.70	14.30	26.40
	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Sn	Cs	Ba
	424.00	19.90	125.00	1.70	2.38	2.12	0.40	300.00
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
	15.80	34.00	4.73	19.40	4.43	0.99	4.33	0.60
	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta
	3.95	0.74	2.20	0.28	2.30	0.31	3.03	0.11
	W	Pb	Th	U	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	Eu/Eu*	-	-
	0.72	10.70	2.67	0.86	4.93	0.69	-	-

Примечание. Eu\*=EuN/[(SmN)(GdN)]<sup>1/2</sup>.

Note. Eu\*=EuN/[(SmN)(GdN)]<sup>1/2</sup>.

Для уточнения времени формирования пород массива «Диоритовый», относимого к конгорскому комплексу, было выполнено определение возраста 10 кристаллов циркона (табл. 4, рис. 6, а, б), в этих же кристаллах определены элементы-примеси (табл. 5, рис. 7, а). Получен диапазон возрастов от 360 до 400 млн лет. Для когерентной группы из семи определений (1.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 9.1, 10.1) был рассчитан конкордантный <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U возраст, который составил 387±4 млн лет (2s, СКВО=1.4, рис. 6, б).

Спектры распределения РЗЭ в цирконах очень близки (рис. 7, а), однако видны аномалии по содержанию La, указывающие на возможные изменения. Расположение точек (рис. 7, б) в полях цирконов магматического генезиса и рядом с полем гидротермальных по генезису цирконов подтверждает наличие изменений. Значение Th/U варьирует от 0.47 до 0.99, что указывает на магматический генезис циркона.

При более детальном рассмотрении полученных U-Pb датировок и РЗЭ-спектров выде-

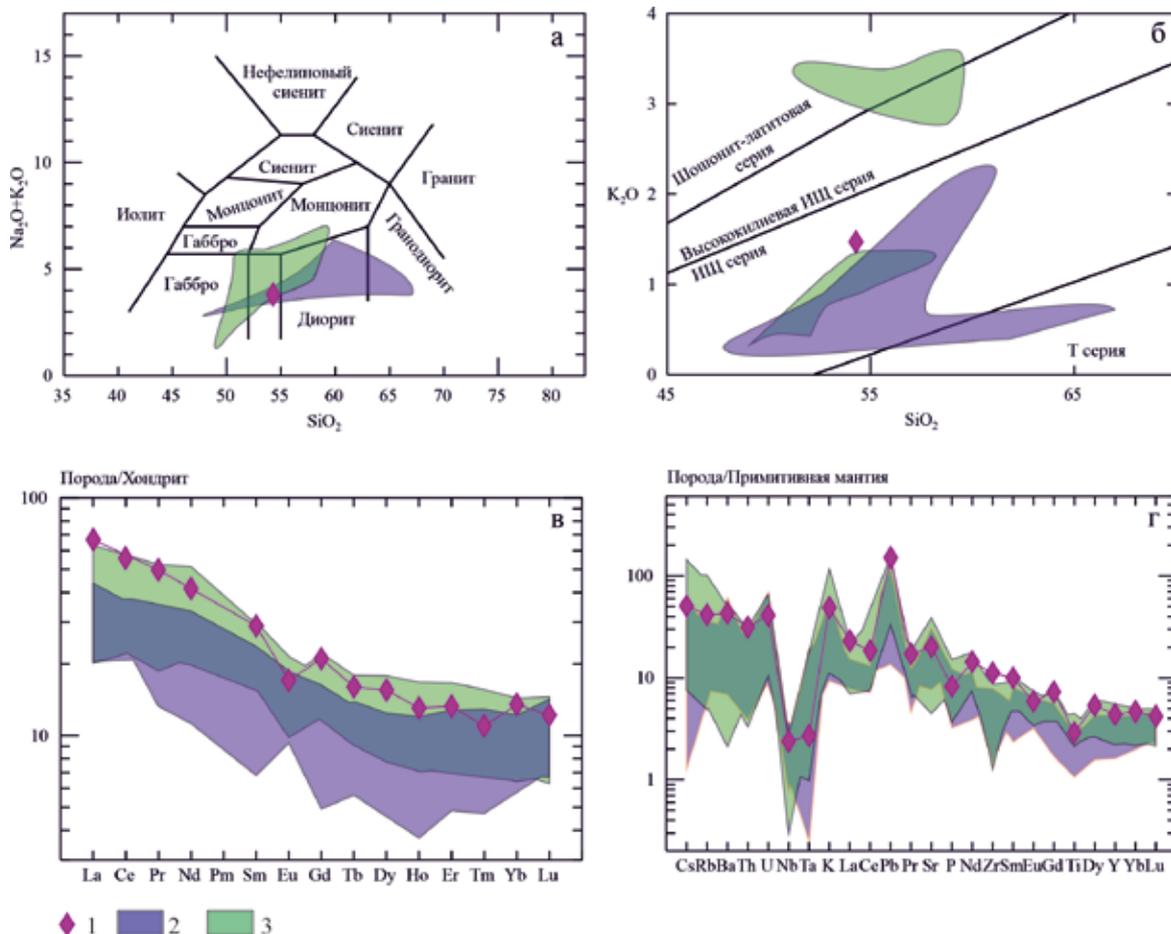


Рисунок 5. Диаграммы Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (а) и K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (б). Спектры распределения РЗЭ (в) и мультиэлементные спектры (г) (образец U60-14). Нормировано к примитивной мантии и хондриту CI по [13].

Условные обозначения: 1 - образец U60-14. Поля: 2 - точек составов пород собского комплекса, 3 - пород конгорского комплекса по [7].

Figure 5. Diagram of Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (a) and K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> (b). REE distribution spectra (v) and multielement spectra (r) (sample U60-14). Normalized to the primitive mantle and CI chondrite according to [13].

Symbols: 1 - sample U60-14. Fields: 2 - fields of composition points for rocks of the Sobskiy complex, 3 - rocks of the Kongorskiy complex according to [7].

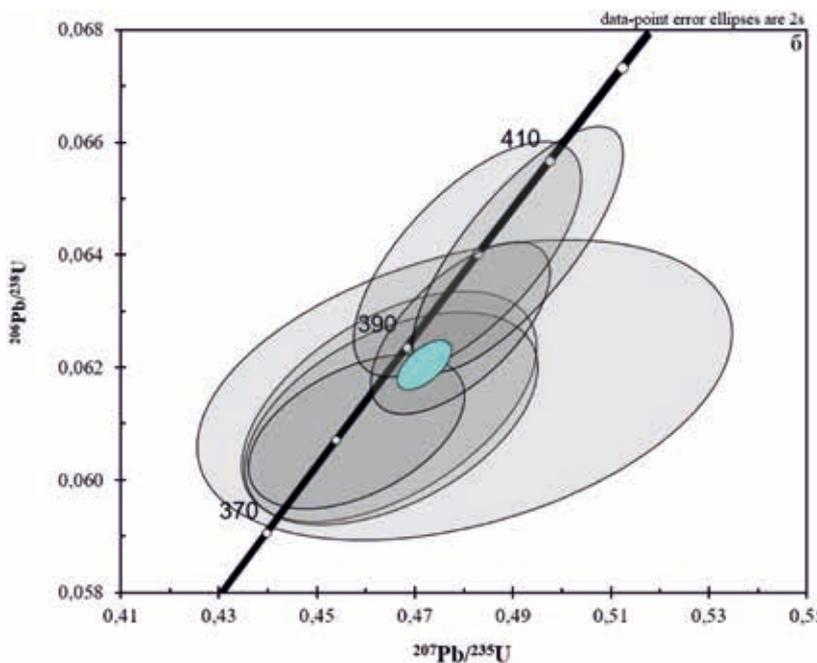
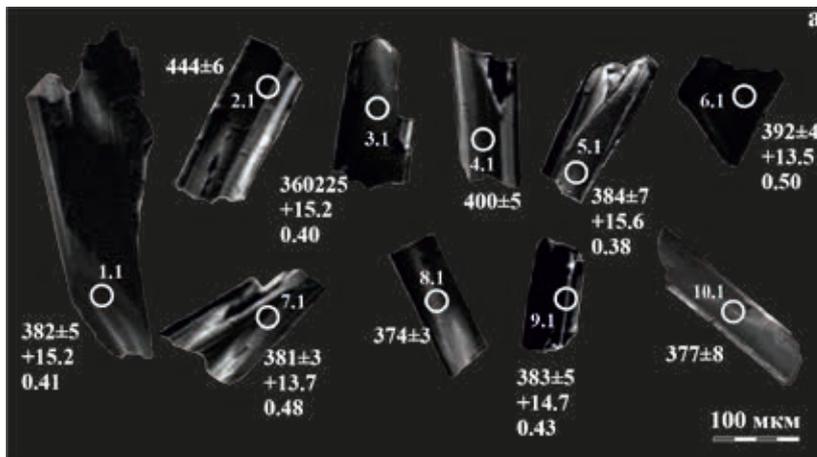
Результаты U-Pb локальных изотопных исследований цирконов из образца U60-14 и t°C, при 1.0/0.7

Table 4

U-Pb results of local isotope analyses of zircons from sample U60-14 and t°C at 1.0/0.7

Зерно	<sup>206</sup> Pb <sub>c</sub> , %	Содержания, мкг/г			<sup>232</sup> Th/ <sup>238</sup> U	Возраст, млн. лет		D, %	Изотопные отношения ± %			Rh <sub>0</sub>	t°
		<sup>206</sup> Pb*	U	Th		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		
3.1ц	0.66	24.2	491	405	0.85	#359.9±2.4	431.8±49.7	+17	0.0555±2.2	0.44±2.3	0.058±0.7	0.3	786
8.1ц	1.54	9.9	192	103	0.55	#374.0±3.0	590.0±91.2	+37	0.0597±4.2	0.49±4.3	0.060±0.8	0.2	747
10.1ц	0.71	20.5	397	181	0.47	376.6±7.8	464.2±51.2	+19	0.0563±2.3	0.47±3.1	0.060±2.1	0.7	771
7.1к	0.16	21.1	404	291	0.74	380.8±3.4	393.2±39.1	+3	0.0546±1.7	0.46±2.0	0.061±0.9	0.5	765
1.1к	0.24	26.9	513	340	0.69	381.9±4.8	419.2±51.5	+9	0.0552±2.3	0.47±2.6	0.061±1.3	0.5	772
9.1к	0.22	32.9	624	598	0.99	383.3±5.2	409.4±50.7	+6	0.0550±2.3	0.46±2.6	0.061±1.4	0.5	788
5.1ц	1.62	16.6	315	197	0.65	384.4±6.6	470.8±95.2	+19	0.0565±4.3	0.48±4.7	0.062±1.8	0.4	747
6.1ц	0.14	33.8	629	481	0.79	391.7±3.8	428.2±26.7	+9	0.0554±1.2	0.48±1.6	0.063±1.0	0.6	782
4.1ц	0.04	27.4	500	349	0.72	399.6±5.3	391.3±23.6	-2	0.0545±1.5	0.48±2.0	0.064±1.3	0.7	768
2.1к	0.10	33.0	600	444	0.76	#400.2±5.5	432.9±25.0	+8	0.0555±1.1	0.49±1.8	0.064±1.4	0.8	771

Примечание. Ошибка в калибровке стандарта соответствовала 0.00 %. Погрешности даны на уровне 1σ. <sup>206</sup>Pbc и <sup>206</sup>Pb\* показывают содержания обычного и радиогенного свинца соответственно. <sup>206</sup>Pbc исправлен на измеренный <sup>204</sup>Pb. Буквы «к» и «ц» означают место локализации анализируемого пятна - краевую и центральную части зерна. D - дискордантность: D = [(возраст (<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb)) / (возраст (<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U)) - 1] \* 100. Rh<sub>0</sub> - коэффициент корреляции между ошибками определения отношений <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U и <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U. # - анализ не учитывался при расчете средневзвешенного возраста. Note. The calibration error of the standard corresponded to 0.00 %. Errors are given at the 1σ level. <sup>206</sup>Pbc and <sup>206</sup>Pb\* indicate the contents of ordinary and radiogenic lead, respectively. <sup>206</sup>Pbc corrected to measured <sup>204</sup>Pb. The letters "k" and "c" indicate the location of the analyzed spot - the marginal and central parts of the grain. D - discordance: D = [(age (<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb)) / (age (<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U)) - 1] \* 100. Rh<sub>0</sub> is the correlation coefficient between errors in determining the <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U and <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ratios. # - the analysis was not taken into account when calculating the weighted average age.



ляются две группы цирконов: 1) кристаллы с более древними возрастaми (400±5 (4/1), 400±6 (2.1), 392±4 (6.1) млн лет), более низкими содержаниями La (0.08–2.59 г/т) и более высокими суммарными концентрациями средних и тяжелых PЗЭ (Σ<sub>Sm-Yb</sub> – 1896.11–2549.35 г/т); 2) кристаллы с более молодыми возрастaми (384±7, 383±5, 382±5, 381±3, 377±8, 374±3, 360±2 млн лет), более высокими содержаниями La (4.00–8.61 г/т) и преимущественно более низкими суммарными содержаниями средних и тяжелых PЗЭ (Σ<sub>Sm-Yb</sub> – 629.54–1797.78 г/т), за исключением одного зерна циркона (383±5 млн лет), в котором Σ<sub>Sm-Yb</sub> – 2861 г/т. Положение на диаграмме Sm<sub>N</sub>/La<sub>N</sub>-La подтверждает это.

Согласно данным [14], в структуре циркона магматического генезиса концентрация La весьма незначительна, и именно он является наименее стабильным из всех PЗЭ элементов. Аномально высокое содержание La в цирконах второй группы можно интерпретировать как результат нарушения U-Pb изотопной

Рисунок 6. Катодолюминесцентные изображения цирконов (образец U60-14) с номерами датированных зерен, аналитическими кратерами, возрастом и данными по изотопному составу гафния и eHf(t) и значениями T<sub>DM(2)</sub> млрд лет (а), U-Pb диаграмма с конкордией (б).

Figure 6. Cathodoluminescent images of zircons (sample U60-14) with numbers of dated grains, analytical craters, age and data on the isotopic composition of hafnium and eHf(t) and T<sub>DM(2)</sub> values (bln years) (a), U-Pb diagram with Concordia (b).

Содержания редкоземельных элементов, гафния, железа и титана (г/т) и температуры кристаллизации (°С) при 1.0/0.7 в исследованных цирконах

Contents of rare earth elements, hafnium, iron and titanium (ppm) and crystallization temperature (°C) at 1.0/0.7 in the studied zircons

г/т	Y	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Hf	<sup>48</sup> Ti	<sup>49</sup> Ti	t	Fe
3.1ц	2674	5.113	47.1	7.14	10.6	2.72	77	265	490	953	10844	7.4	7.4	786	41.7
8.1ц	959	4.410	21.3	3.52	3.5	1.01	22	81	168	353	10425	5.0	5.1	747	436.8
10.1ц	1233	8.609	37.9	5.20	4.5	1.42	31	110	223	453	9307	6.4	6.6	771	114.8
7.1к	2358	2.592	36.0	4.80	8.9	2.63	66	227	417	805	10125	6.0	6.3	765	7.1
1.1к	2445	2.330	39.9	4.19	7.3	1.94	56	217	432	842	8533	6.5	6.4	772	8.8
9.1к	4432	0.664	59.9	5.48	14.0	4.34	120	445	786	1492	10717	7.6	7.4	788	13.9
5.1ц	1496	4.002	28.0	4.55	5.9	1.68	35	133	262	543	10160	5.0	4.9	747	55.2
6.1ц	3931	0.188	51.1	5.62	14.6	4.18	116	397	701	1318	10496	7.1	7.2	782	4.4
4.1ц	2936	0.078	35.0	4.05	9.8	2.74	79	281	528	995	10755	6.2	6.6	768	0.2
2.1к	3612	0.111	49.1	4.70	11.9	3.14	100	352	633	1224	10381	6.3	6.2	771	0.1

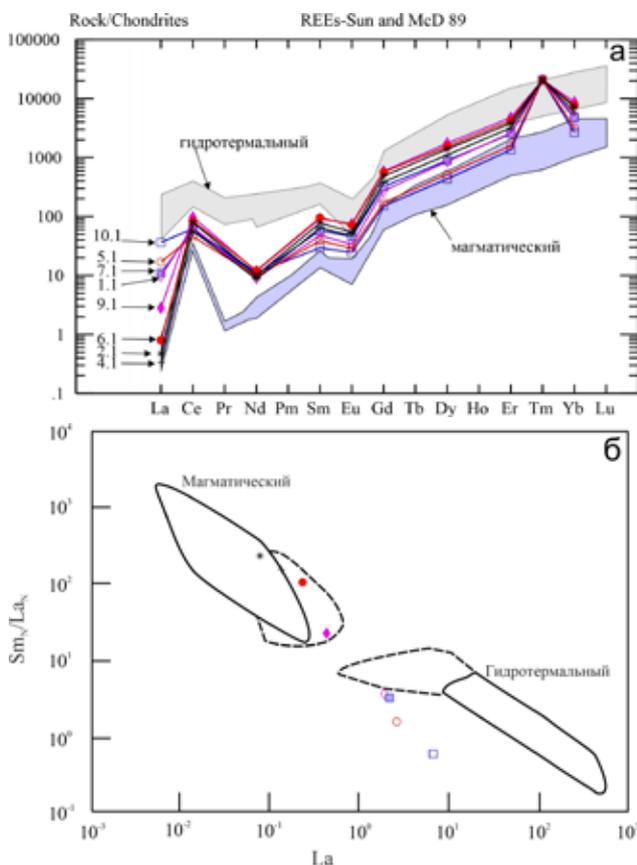


Рисунок 7. Спектры распределения РЗЭ в цирконах (образец U60-14), нормировано к хондриту CI по [13] (а); диаграмма  $Sm_N/La_N$ -La для разделения магматических и гидротермальных по генезису цирконов (б).

Figure 7. Spectra of REE distribution in zircons (sample U60-14), normalized to CI chondrite according to [13] (a),  $Sm_N/La_N$ -La diagram for separating igneous and hydrothermal zircons by genesis (b).

системы, что подтверждается устойчивым омоложением U-Pb возрастов (384–360 млн лет) этих зерен. Породы, из которых извлекались цирконы, не были подвержены существенным высокотемпературным вторичным преобразованиям (уровень их метаморфизма не выше зеленосланцевой фации), поэтому трудно объяснить нарушение U-Pb изотопной системы воздействием наложенных термальных событий. Мы предполагаем, что нарушение U-Pb

изотопной системы могло произойти при расшатывании кристаллической решетки циркона в результате радиоактивного распада – метамиктизации отдельных участков зерен циркона. Исходя из этого предположения, времени кристаллизации диоритов массива «Диоритовый» с большой степенью вероятности соответствует диапазон 400–392 млн лет (со средневзвешенным значением – 396±5 млн лет (2s, СКВО=1.16)). Указанный возраст коррелируется со временем формирования плагиогранитоидов собского комплекса [6, 15–17]. В этом случае возрасты второй группы цирконов (384–360 млн лет) могут быть интерпретированы как омоложение U-Pb изотопной системы в отдельных участках зерен циркона.

Модельная температура кристаллизации, оцененная по содержанию Ti в цирконе [9], варьирует в интервале 874–762 °С (при  $a_{SiO_2}=1$  и  $a_{TiO_2}=0.7$ ). Рассчитанный по насыщению циркония параметр  $M=2.7$  соответствует температуре 679.6 °С. Температуры, рассчитанные по  $Amp$ - $Pl$  геотермометру, составили  $Amp(ц)$ - $Pl(ц)=777$  °С и  $Amp(к)$ - $Pl(к)=668$  °С.

Для восьми из 10 датированных кристаллов циркона была изучена Lu-Hf изотопная система (табл. 6, рис. 8), с учетными данными по U-Pb возрастам количество составляет пять значений (1.1, 5.1, 6.1, 7.1, 9.1). Изотопный состав гафния ( $\epsilon Hf$ ) цирконов варьирует от +13.5 до +15.2, что указывает на мантийный (изотопно-незрелый) источник протолита.

Вышеуказанные данные хорошо согласуются с положительными значениями  $\epsilon Nd(t)$  и  $\epsilon Hf(t)$ , полученными ранее для гранитоидов собского (лагортинско-кокпельского) комплекса, имеющих схожий возраст [18]. Рассчитанный модельный возраст  $T_{DM(2)}$  составляет 0.50–0.38 млрд лет, т. е. протолитом для диоритов являлись палеозойские породы с мантийными изотопными характеристиками.

Таким образом, диориты массива «Диоритовый» формировались в ранне-среднедевонское (эмско-эйфельское) время в островодужной геодинамической обстановке из ювенильного мантийного (почти одновозрастного с ними) протолита, на что указывают положительные значения  $\epsilon Hf(t)$  и модельный возраст  $T_{DM(2)}$ .

Изотопный состав Lu-Hf, εHf и расчетные значения  $T_{DM2}$ 

Table 6

Isotopic composition of Lu-Hf, εHf and calculated  $T_{DM2}$ 

Зерно	Возраст	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$T_{DM}$	$f_{(Lu/Hf)}$	$\epsilon\text{Hf}_{(t)}$	$\epsilon\text{Hf}_{(t)}$	$T_{DM2}$
1.1	382	0.146646	0.0015167	0.0054912	0.000070694	0.283001304	0.0000251	0.403	-0.834601	8.109141	15.09762	0.406
2.1	400	0.0809249	0.0007148	0.0032844	0.000033688	0.282976899	0.0000207	0.415	-0.901071	7.246093	15.14669	0.418
3.1	360	0.0913738	0.0018342	0.0037639	0.000074193	0.283002485	0.0000229	0.381	-0.88663	8.150931	15.14751	0.385
4.1	400	0.0815396	0.0009088	0.003365	0.000037058	0.283037036	0.0000209	0.325	-0.898643	9.372765	17.25207	0.309
5.1	384	0.0543851	0.0004817	0.0022411	0.000024078	0.282989821	0.0000219	0.384	-0.932498	7.70307	15.55217	0.384
6.1	392	0.0855801	0.0003849	0.0035006	0.000008462	0.282935618	0.0000217	0.480	-0.894559	5.786216	13.47284	0.497
7.1	381	0.0569961	0.0006726	0.0023224	0.000026905	0.282939668	0.0000195	0.459	-0.930047	5.929437	13.69674	0.477
8.1	374	0.0872955	0.0035632	0.0035373	0.0001434	0.2829589	0.0000224	0.445	-0.893455	6.60957	13.93418	0.459
9.1	383	0.0868239	0.0026640	0.0035133	0.0001066	0.282974605	0.0000227	0.421	-0.894177	7.164958	14.6719	0.428

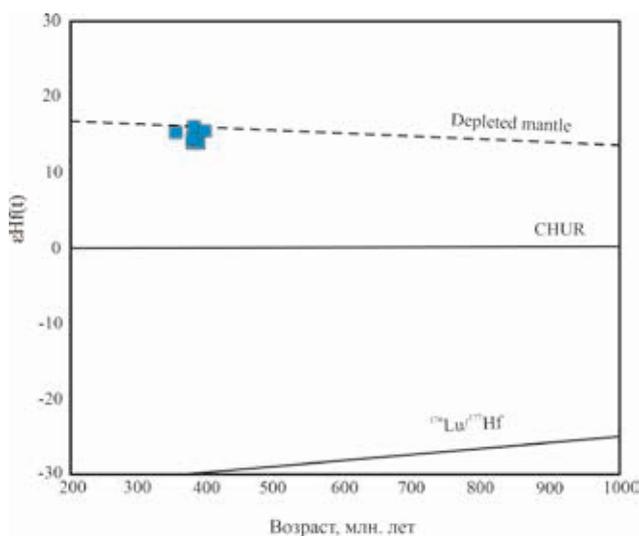


Рисунок 8. Диаграмма εHf – возраст для образца U60-14.

Figure 8. Diagram εHf – Age for sample U60-14.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Шишкин, М. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Уральская серия. Лист Q-41 (Воркута). Объяснительная записка / М. А. Шишкин, А. П. Астапов, Н. В. Кабатов [и др.]. – Санкт-Петербург : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2005. – 335 с.
2. Андреичев, В. Л. Новые данные о возрасте гранитоидов конгорского комплекса (Полярный Урал) / В. Л. Андреичев, О. В. Удоратина // Изотопное датирование геологических процессов: новые методы и результаты. Тезисы докладов I Росс. конф. по изотопной геохронологии. – Москва, 2000. – С. 28–30.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000 (изд-е второе). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XII. Объяснительная записка / Л. Л. Подсосовой, А. П. Казака. – Санкт-Петербург, 2001. – 279 с.
4. Шишкин, М. А. Актуализация легенды Полярно-Уральской серии листов Госгеолкарты-200 (изд-е второе) / М. А. Шишкин. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2009.
5. Соболев, И. Д. Новые данные об особенностях состава и возрасте пород Конгорского массива (Полярный Урал) / И. Д. Соболев // От минералогии до геохимии. Сборник научных трудов к 130-летию со дня рождения академика Александра Евгеньевича Ферсмана. С. Береговое, АР Крым. – 2013. – С. 186–191.
6. Шмелев, В. Р. Природа и возраст базитов офиолитового массива Рай-Из (Полярный Урал) / В. Р. Шмелев, Ф.-Ц. Мон // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 451, № 2. – С. 211–215.
7. Соболев, И. Д. Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала / И. Д. Соболев, А. А. Соболева, О. В. Удоратина, Д. А. Варламов, Дж. К. Хоуриган [и др.] // Геотектоника. – 2018. – № 5. – С. 39–74. – DOI: 10.1134/S0016853X18050065.
8. Андреичев, В. Л. Гранитоиды Большеземельской зоны фундамента Печорской синеклизы: состав и U-Pb возраст / В. Л. Андреичев, А. А. Соболева, Е. Г. Довжикова, Ю. Л. Ронкин, Э. Л. Миллер [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 180–191. – <https://doi.org/10.15372/GiG2022125>.
9. Watson, E. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile / E. B. Watson, D. A. Wark, and J. B. Thomas // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2006. – 151(4). – P. 413–433.
10. Geng, J. Z. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS / J. Z. Geng, H. K. Li, J. Zhang, H. Y. Zhou, H. M. Li // Geological Bulletin of China. – 2011. – 30 (10). – P. 1508–1513 (in Chinese with English abstract).
11. Язева, Р. Г. Войкарский вулcano-плутонический пояс / Р. Г. Язева, В. В. Бочкарев. – Свердловск : УНЦ АН СССР, 1984. – 156 с.
12. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
13. Sun, S. S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes / S. S. Sun, W. F. McDonough // Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication. – 1989. – V. 42. – P. 313–345.

14. Балашов, Ю. А. Контрастность геохимии магматических и вторичных цирконов / Ю. А. Балашов, С. Г. Скублов // Геохимия. – 2011. – № 6. – С. 622–633.
15. Андреичев, В. Л. Изотопная геохронология ультрамафит-мафитовых и гранитоидных ассоциаций восточного склона Полярного Урала / В. Л. Андреичев. – Сыктывкар, 2004. – 44 с.
16. Ремизов, Д. Н. Островодужная система Полярного Урала (петрология и эволюция глубинных зон) / Д. Н. Ремизов. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 221 с.
17. Estrada, S. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals / S. Estrada, F. Henjes-Kunst, K.-P. Burgath [et al.] // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. – 2012. – 163/1. – P. 9–41. DOI: 10.1127/1860-1804/2012/0163-0009.
18. Удоратина, О. В. Гранитоиды севера Урала: геохронология, эволюция, источники / О. В. Удоратина, К. В. Куликова, А. С. Шуйский, А. А. Соболева, В. Л. Андреичев [и др.]. – Сыктывкар : ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2022. – 125 с. – <https://doi.org/10.19110/98491-044>.

## References

1. Shishkin, M. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (treyte pokoleniye). Uralskaya seriya – List Q-41 (Vorkuta). Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Ural series – Sheet Q-41 (Vorkuta). Explanatory note] / M. A. Shishkin, A. P. Astapov, N. V. Kabatov [et al.]. – Saint-Petersburg : VSEGEI Cartographic Factory, 2005. – 335 p.
2. Andreichev, V. L. Novyye dannyye o vozraste granitoidov kongorskogo kompleksa (Polyarnyi Ural) [New data on the age of granitoids of the Kongor complex (Polar Urals)] / V. L. Andreichev, O. V. Udoratina // Izotopnoe datirovanie geologicheskikh protsessov : novye metody i rezultaty [Isotope dating of geological processes : new methods and results]. Abstracts of I Rus. Conf. on Isotope Geochronology. Moscow. – 2000. – P. 28–30.
3. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000 (izdaniye vtoroye). Seriya Polyarno-Ural'skaya. List Q-41-XII. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000 (second edition). Polar-Ural series. Sheet Q-41-XII. Explanatory note] / L. L. Podsova, A. P. Kazak. – Saint-Petersburg, 2001. – 279 p.
4. Shishkin, M. A. Aktualizatsiya legendy Polyarno-Uralskoy serii listov Gosgeol'karty-200 (izdaniye vtoroye) [Updating the legend of the Polar-Ural series of sheets of Gosgeol'karta-200 (second edition)] / M. A. Shishkin. – Saint-Petersburg : VSEGEI, 2009.
5. Sobolev, I. D. Novyye dannyye ob osobennostyakh sostava i vozraste porod Kongorskogo massiva (Polyarnyi Ural) [New data on the composition and age of rocks of the Kongor massif (Polar Urals)] / I. D. Sobolev // Ot mineralogii do khimii [From Mineralogy to Geochemistry]. Collection of scientific works dedicated to the 130th anniversary of the birth of academician Alexander Evgenievich Fersman. – Beregovoe village, Crimea. – 2013. – P. 186–191.
6. Shmelev, V. R. Priroda i vozrast bazitov ofiolitovogo massiva Raj-Iz (Polyarnyj Ural) [Nature and age of basites of the ophiolitic massif Rai-Iz (Polar Urals)] / V. R. Shmelev // Reports of the Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 451. – № 2. – P. 211–215.
7. Sobolev, I. D. Devonskiy ostrovoduzhnyy magmatizm Voykarskoy zony Polyarnogo Urala [Devonian island-arc magmatism of the Voykar zone of the Polar Urals] / I. D. Sobolev, A. A. Soboleva, O. V. Udoratina, D. A. Varlamov, J. K. Hourigan [et al.] // Geotektonika [Geotectonics]. – 2018. – № 5. – P. 39–74. – DOI: 10.1134/S0016853X18050065.
8. Andreichev, V. L. Granitoidy Bolshezemelskoy zony fundamenta Pechorskoy sineklizy: sostav i U-Pb vozrast [Granitoids of the Bolshezemelskaya zone of the basement of the Pechora syncline: composition and U-Pb age] / V. L. Andreichev, A. A. Soboleva, E. G. Dovzhikova, Yu. L. Ronkin, E. L. Miller [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2023. – Vol. 64. – № 2. – P. 180–191. – <https://doi.org/10.15372/GiG2022125>.
9. Watson, E. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile / E. B. Watson, D. A. Wark, and J. B. Thomas // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2006. – 151(4). – P. 413–433.
10. Geng, J. Z. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS / J. Z. Geng, H. K. Li, J. Zhang, H. Y. Zhou, H. M. Li // Geological Bulletin of China. – 2011. – 30 (10). – P.1508–1513 (in Chinese with English abstract).
11. Yazeva, R. G. Voykarskiy vulkanoplutonicheskiy poyas [Voykar volcanic-plutonic belt] / R. G. Yazeva, V. V. Bochkarev. – Sverdlovsk : UNTS AN USSR, 1984. – 156 p.
12. Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya [Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations]. – 2nd ed., revised and added. – Saint-Petersburg : VSEGEI Publishing House, 2008. – 200 p.
13. Sun, S. S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : implication for mantle composition and processes / S. S. Sun, W. F. McDonough // Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication. – 1989. – Vol. 42. – P. 313–345.
14. Balashov, Yu. A. Kontrastnost geokhimii magmaticheskikh i vtorichnykh tsirkonov [Contrast of geochemistry of magmatic and secondary zircons] / Yu. A. Balashov, S. G. Skublov // Geokhimiya [Geochemistry]. – 2011. – № 6. – P. 622–633.
15. Andreichev, V. L. Izotopnaya geokhronologiya ultramaфит-мафитовых i гранитоидных ассоциаций восточного склона Полярного Урала [Isotope geochronology of ultramafic-mafic and granitoid associations of the eastern slope of the Polar Urals] / V. L. Andreichev. – Syktyvkar, 2004. – 44 p.
16. Remizov, D. N. Ostrovoduzhnaya sistema Polyarnogo Urala (petrologiya i evolyutsiya glubinnykh zon) [Island-arc system of the Polar Urals (petrology and evolution of

- deep zones)] / D. N. Remizov. – Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2004. – 221 p.
17. Estrada, S. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals / S. Estrada, F. Henjes-Kunst, K.-P. Burgath [et al.] // Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. – 2012. – 163/1. – P. 9–41. DOI: 10.1127/1860-1804/2012/0163-0009.
18. Udoratina, O. V. Granitoidy severa Urala: geokhronologiya, evolyutsiya, istochniki [Granitoids of the Northern Urals: geochronology, evolution, sources] / O. V. Udoratina, K. V. Kulikova, A. S. Shuyskiy, A. A. Soboleva, V. L. Andreichev [et al.]. – Syktyvkar : Institute of Geology, Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2022. – 125 p. – <https://doi.org/10.19110/98491-044>.

#### Информация об авторах:

**Удоратина Оксана Владимировна** – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 6507890574, <https://orcid.org/0000-0001-9956-6271> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [udoratina@geo.komisc.ru](mailto:udoratina@geo.komisc.ru)).

**Соболев Иван Дмитриевич** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН; Scopus Author ID: 55220568600, <https://orcid.org/0000-0003-1619-640X> (119017, Российская Федерация, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 35, стр. 7; e-mail: [id\\_sobolev@igem.ru](mailto:id_sobolev@igem.ru)).

**Шуйский Александр Сергеевич** – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 5721240694, <https://orcid.org/0000-0002-6928-9354> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [self88@yandex.ru](mailto:self88@yandex.ru)).

#### About the authors:

**Oksana V. Udoratina** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Scopus Author ID: 6507890574, <https://orcid.org/0000-0001-9956-6271>, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [udoratina@geo.komisc.ru](mailto:udoratina@geo.komisc.ru)).

**Ivan D. Sobolev** – Candidate of Sciences (Geological and Mineralogy), Researcher, Scopus Author ID: 55220568600, <https://orcid.org/0000-0003-1619-640X>, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (Building 7, 35 Staromonetny Lane, Moscow, Russian Federation, 119017; e-mail: [id\\_sobolev@igem.ru](mailto:id_sobolev@igem.ru)).

**Aleksander S. Shuyskiy** – Junior Researcher, Scopus Author ID: 5721240694, <https://orcid.org/0000-0002-6928-9354>, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [self88@yandex.ru](mailto:self88@yandex.ru)).

#### Для цитирования:

Удоратина, О. В. Диориты массива «Диоритовый» (Полярный Урал): геохронологические и изотопно-геохимические данные / О. В. Удоратина, И. Д. Соболев, А. С. Шуйский // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 41–51.

#### For citation:

Udoratina, O. V. Diority massiva «Dioritovyj» (Polyarnyj Ural): geokhronologicheskie i izotopno-geokhimicheskie dannye [Diorites of the Dioritovyj massif (Polar Urals): geochronological and isotope-geochemical data] / O. V. Udoratina, I. D. Sobolev, A. S. Shuyskiy // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2024. – № 3 (69). – P. 41–51.

Дата поступления статьи: 21.03.2024

Прошла рецензирование: 30.03.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 21.03.2024

Reviewed: 30.03.2024

Accepted: 27.03.2024

## Внутреннее строение и закономерности распределения минеральных типов редкометалльных пегматитов в долине Дарай Печ (провинция Кунар, Афганистан)

А. Н. Евдокимов\*, А. Юсуфзай\*\*\*, А. М. Мусазай\*\*

\* Санкт-Петербургский горный университет,

г. Санкт-Петербург

\*\* Кабульский политехнический университет,

г. Кабул (Афганистан)

evdokimov\_an@spmi.ru

ata.yosufzai@gmail.com

### Аннотация

Гранитные пегматиты Афганистана известны месторождениями редких металлов: Li, Be, Cs, Ta, Nb, Rb, Sn и др. Руды в долине Дарай Печ провинции Кунар содержат кристаллы берилла, сподумена, поллуцита, танталита и представляют интерес для промышленности. В статье рассматриваются петрографические особенности пегматитовых тел, их внутреннего строения, морфологических параметров рудных тел. Особое внимание уделено изменениям минералогического состава в пегматитовых телах в зависимости от вертикальной удаленности от материнской интрузивной породы.

Изучено свыше 20 пегматитовых тел. По мере удаления от гранитного интрузива выделяется четыре типа пегматитовых жил: 1) существенно плагиоклаз-микроклиновые, биотит-мусковитовые пегматиты с редким бериллом, шерлом и гранатом; 2) альбитизированные микроклиновые и микроклин-альбитовые пегматиты с крупнокристаллическим бериллом, танталит-колумбитом, шерлом, кунцитом, полихромным турмалином; 3) существенно альбитовые пегматиты с редким сподуменом, мелкокрапленным бериллом и колумбит-танталитом; 4) альбит-сподуменовые пегматиты с колумбит-танталитом, касситеритом, клевеландитом, лепидолитом, кунцитом и полихромным турмалином. В этом же направлении убывает содержание биотита, но возрастает количество мусковита и клевеландита, что положительно коррелируется с содержаниями редкометалльной минерализации, пьезооптического сырья и драгоценных камней.

Отдельные пегматитовые жилы имеют асимметричную зональность: в лежачем боку относительно мелко- и среднезернистые породы, а в висячем – крупнозернистые.

### Ключевые слова:

петрография, редкометалльные пегматиты, вертикальная зональность, внутреннее строение, гранит, Дарай Печ, Афганистан

## Internal structure and patterns of distribution of mineral types of rare metal pegmatites in the Darai Pech valley (Kunar province, Afghanistan)

A. N. Evdokimov\*, A. Yosufzai\*\*\*, A. M. Mosazai\*\*

\* Saint-Petersburg Mining University,

Saint-Petersburg

\*\* Kabul Polytechnic University,

Kabul, Afghanistan

evdokimov\_an@spmi.ru,

ata.yosufzai@gmail.com

### Abstract

The granite pegmatites of Afghanistan are known for deposits of rare metals: Li, Be, Cs, Ta, Nb, Rb, Sn, etc. Ores in the Darai Pech valley of the Kunar province contain crystals of beryl, spodumene, pollucite, and tantalite and are of interest to industry. The article discusses the petrographic features of pegmatite bodies, their internal structure, and the morphological parameters of ore bodies. Particular attention is paid to changes in the mineralogical composition of pegmatite bodies depending on the vertical distance from the parent intrusive rock.

Over 20 pegmatite bodies have been studied. Four types of pegmatite veins are identified with distance from the granite intrusion: 1) essentially plagioclase-microcline, biotite-muscovite pegmatites with rare beryl, schorl, and garnet; 2) albitized microcline and microcline-albite pegmatites with coarse-crystalline beryl, tantalite-columbite, schorl, kunzite, and polychrome tourmaline; 3) albite pegmatites with rare spodumene, finely disseminated beryl, and columbite-tantalite; 4) albite-spodumene pegmatites with columbite-tantalite, cassiterite, cleveandite, lepidolite, kunzite, and polychrome tourmaline. Simultaneously, content of biotite decreases and those of muscovite and cleveandite increase, which positively correlates with contents of rare metal mineralization, piezo-optical raw materials, and precious stones.

Individual pegmatite veins have asymmetrical zoning: the footwall has relatively fine- and medium-grained rocks and the hanging wall – coarse-grained rocks.

### Keywords:

petrography, rare metal pegmatites, vertical zoning, internal structure, granite, Darai Pech, Afghanistan

## Введение

Пегматиты – это полнокристаллические крупно- и гигантозернистые магматические породы, которые образуются в процессе дифференциации остаточного магматического расплава [1]. Они представляют собой класс пород, характеризующийся многообразием минерального и химического составов [2]. Проблема образования пегматитов остается нерешенной, в настоящее время в геологической среде существуют несколько мнений и генетических моделей [3].

Одними из первых описаний внутреннего строения, минералогии и геохимии альбит-сподуменовых пегматитов являются исследования К. А. Власова (1961), Н. А. Солодова (1959, 1961, 1962), А. И. Гинзбурга и др. (1979). Эволюция отдельных пегматитов сегодня объясняется [4–6] моделью кристаллизации из водонасыщенных однородных расплавов.

Существует несколько гипотез формирования внутренней зональности гранитных пегматитов. Широко известность получила модель [7], по которой пегматиты обязаны текстурными характеристиками отделению водяного пара от силикатного расплава, что приводило к образованию богатых калием пегматитовых тел на верхнем гипсометрическом уровне, а также богатых натрием аплитовых участков в нижних зонах отдельных пегматитов.

В провинции Кунар редкометалльные пегматиты расположены в долине Дарай Печ, вдоль правых притоков – Дигал и Чапа Дара. Они имеют промышленно-значимые концентрации лития, тантала, цезия, бериллия, олова, драгоценных камней и пьезооптического сырья. Редкометалльная минерализация здесь представлена сподуменом, бериллом и тонкопластинчатым танталит-колумбитом.

Координаты пегматитового поля:  $34^{\circ}54'30''$ – $34^{\circ}58'30''$  и  $70^{\circ}41'30''$ – $70^{\circ}45'20''$ , площадь составляет около 35–40 км<sup>2</sup> (рис. 1). Из г. Асад Абад провинции Кунар до Дарай Печ, находящегося на западной окраине поля, по долине р. Дарай Печ ведет грунтовая автодорога протяженностью 41 км. Абсолютные высоты на площади поля Дарай Печ колеблются в пределах 1100–4000 м, а на участке месторождений Гульсалак и Дигал – от 1700 до 2400 м над уровнем моря в центральной части долины Дарай Печ, вдоль восточного контакта Алингарского гранитного массива, в тектонической зоне Нуристан [11]. Впервые бериллоносные пегматиты в долине Дарай Печ (у сел Гульсалак и Чамбалак) обнаружил Гулам Али Хан (1950). В 1958 г. район Дарай Печ посетили Сайд Хашим Мирзад, Ахмадулла Хан и Н. Галахов (С. Мирзад, 1958). Месторождение Гульсалак изучали советские специалисты – В. М. Народный и С. Л. Шварков, которые оконтурили площадь поля и открыли крупные тела сподуменовых пегматитов (Народный и др., 1965). В 1971 г. жилы западного фланга поля исследовал на предмет их оловоносности О. Н. Кабаков. В 1972 г. район посетили Л. Н. Россовский и Б. К. Любимов. Последним здесь были открыты скопления поллуцита, установлено широкое развитие лепидолита и танталовой минерализации [12].

Генезис и эволюцию пегматитов в Афганистане предположили Н. А. Солодов (1962) и Л. Н. Россовский и др. [8, 13]. А. М. Мусазай в 1988 г. установил вертикальную зональность в размещении пегматитовых тел. С началом гражданской войны в Афганистане систематические исследования в этой области были прекращены. В настоящее время большая часть работ выполнена на минералах из пегматитов Афганистана, имеющих ювелирное качество музейных камней [14, 15]. В данной статье представлены результаты проведенных впервые за несколько лет работ по изучению внутреннего строения и зональности редкометалльных пегматитов на новых участках.

## Материалы и методы

Изучение опубликованных материалов позволило создать информационную базу данных по элементам залегания и морфологии пегматитовых жил. Геолого-структурная позиция редкометалльных пегматитов олигоценых гранитов комплекса Лагман определяется эпохами тектонической и магматической активизаций в регионе. Опубликованные данные и наши полевые наблюдения свидетельствуют о многоактном процессе внедрения гранитоидных интрузивных комплексов и связанных с ними пегматитовых образований [8, 16, 17].

Изучение особенностей залегания пегматитов и сбор каменного материала были проведены А. Юсуфзай в ходе полевых работ в провинции Кунар в Афганистане летом 2023 г. В результате задокументировано залегание свыше 20 пегматитовых тел, расположенных в области восточного эндоконтакта крупного массива биотит-амфиболовых диоритов. Эти жилы образуют пегматитовое поле, где жильные тела падают примерно в одном запад-юго-западном направлении под углами от 10 до 30° (рис. 2), их протяженность – от нескольких сотен метров до 2.5 км, а мощность варьирует от 1 до 25 м.

Образцы включают породы и кристаллы из гранитов, пегматитов и вмещающих пород поля Дарай Печ провинции Кунар. Определение породообразующих минералов было выполнено с использованием поляризационного и рудного микроскопов «Leica DM 2500 M». Диагностика акцессорных минералов – методом рамановской спектроскопии с применением Renishaw InVia Raman spectrometer в Санкт-Петербургском горном университете [18] (рис. 3).

## Геологическое строение

В районе широко развиты метаморфические породы различного состава, интродуцированные габброидами и гранитоидами. Метаморфические породы существенно различаются по вещественному составу, степени метаморфизма и особенностям складчатых структур.

Выделяются две серии пород: серия Нуристан нижнепротерозойского возраста и серия Кашмунд триасового возраста. Метаморфиты серии Нуристан распространены в северо-восточной части района пегматитового поля [19]. Они представляют тектонический клин среди триасовых отложений серии Кашмунд и порваны интрузиями относительно молодых габброидов и гранитов [20]. Породы серии Нуристан смяты в синклиналиную складку субширотного

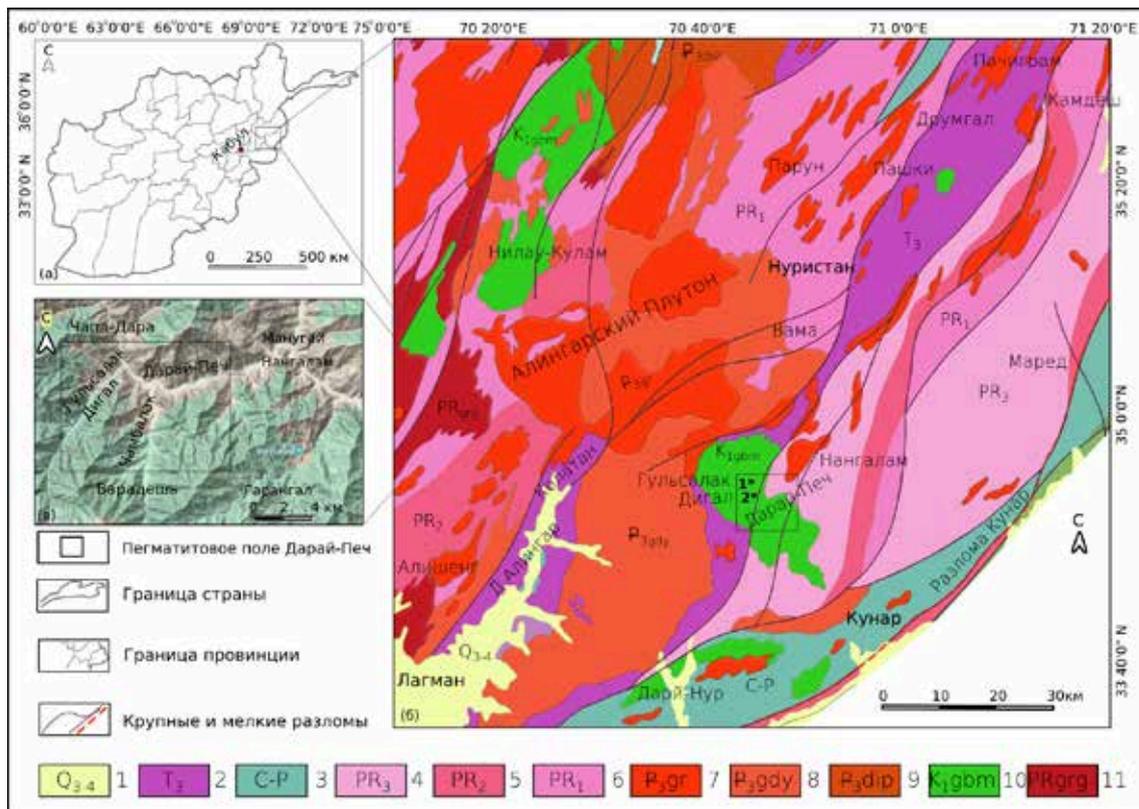


Рисунок 1. Геологическая карта пегматитового пояса восточного Афганистана: а – общее положение района исследования; б – геологическая карта района исследования (составлено авторами по: [8–10]); в – спутниковый снимок пегматитового поля Дарай Печ и положение месторождений Дигал и Гульсалак.

Условные обозначения: 1 – аллювий, гравий, пески и глины; 2 – филлитовидные сланцы, песчаники и алевролиты; 3 – песчаники, андезиты, базальты; 4 – гнейсы, сланцы, амфиболиты, кварциты; 5 – мраморы, гнейсы, амфиболиты, кварциты; 6 – гнейсы, амфиболиты, кварциты; интрузивные комплексы (7–11): олигоценый комплекс Лагман (7–9): 7 – граниты III-фазы; 8 – порфирировидные граниты II-фазы; 9 – диориты и плагиограниты I-фазы; 10 – комплекс Нилау: габбро-монзониты, диориты и гранодиориты; 11 – комплекс Панджшир: гранито-гнейсы.

Figure 1. Geological map of the pegmatite belt of Eastern Afghanistan: а – general position of the study area in Afghanistan; б – geological map of the study area, compiled by the authors according to: [8–10]; в – satellite image of the Darai Pech pegmatite field and the position of the Dugal and Gulsalak deposits. Symbols: 1 – alluvium, gravel, sands, and clays; 2 – phyllite shales, sandstones, and siltstones; 3 – sandstones, andesites, basalts; 4 – gneisses, schists, amphibolites, quartzites; 5 – marbles, gneisses, amphibolites, quartzites; 6 – gneisses, amphibolites, quartzites; intrusive complexes (7 – 11): Laghman oligocene complex (7–9): 7 – phase III granites; 8 – phase II porphyritic granites; 9 – phase I diorites and plagiogranites; 10 – Nilau complex: gabbro-monzonites, diorites and granodiorites; 11 – Panjshir complex: granite-gneisses.

простираются с падением шарнира складки в восточном направлении. Основание серии Нуристан характеризуется чрезвычайно монотонным строением: биотитовые гнейсы, плагиогнейсы и амфиболиты, прослои кварцитов и кварцитовидных песчаников – свита Неджраб, выше и согласно лежат, с постепенным переходом, кварциты с прослоями пачек диатомовых и инъекционных гнейсов. В средней части разреза залегают мраморы свиты Чобак. Еще выше, так же согласно залегают породы свиты Камдеш: это монотонная толща биотитовых гнейсов и плагиогнейсов, венчающаяся пачкой сланцев и согласно перекрывающаяся образованиями свиты Вайгал, представленной мраморами, сланцами и кварцитами. Завершает разрез серии Нуристан свита Камал, состоящая из толщи биотитовых, двуслюдяных, гранат-ставролит-биотитовых сланцев с прослоями карбонатных сланцев, известковистых и слюдяных кварцитов, мраморов. Мощность серии Нуристан – от 8500 до 10 500 м, мощность отложений данной серии в районе Дарай Печ составляет 5500–6000 м [12].

Узкие тектонические клинья среди докембрийских метаморфических толщ выполнены отложениями серии

Кашмунд верхнетриасового возраста. Серия Кашмунд сложена в основном кварцево-сланцевыми филлитовидными сланцами с графитом. Мощность прослоев от 300 до 3000 м, редко – до первых десятков метров [14]. Отложения серии Кашмунд имеют сравнительно выдержанное северо-восточное простирание и северо-западное падение под углами 15–30°, реже – 5–10°. В зоне экзоконтактов массивов интрузивных пород сланцы имеют изменчивые элементы залегания, смяты в сложные складки, часто гофрированы. Видимая мощность этой серии составляет 1000–1500 м [11].

Интрузивные породы занимают большую часть площади района (рис. 1), среди них выделяются три комплекса: 1) габбро-диориты Нилау; 2) порфирировидные биотитовые граниты II-фазы гранитоидного комплекса Лагман; 3) двуслюдяные граниты III-фазы комплекса Лагман [13].

Разрывные структуры на площади района имеют преобладающее северо-восточное простирание. Главными разрывными структурами здесь являются разломы, разграничивающие породы двух структурных ярусов. Они представляют собой зоны брекчированных, катаклазированных, милонитизированных, часто разгнейсованных



Рисунок 2. Общий вид размещения пегматитовых жил месторождений Гульсальк (а) и Дигал (б, в) во вмещающих габбро-диоритах комплекса Нилау. Внутренние структуры пегматитовых жил: зона блокового микроклина (г), кварцевое ядро и зона сподумен-лепидолит-клевеландита (е). Обозначения минералов: Ab – альбит, Clv – клеветандит, Elb – эльбаит, Pl – плагиоклаз, Ms – мусковит, Qz – кварц, Spd – сподумен, Tur – турмалин, Lpd – лепидолит. Figure 2. General view of pegmatite veins from the Gulsalk (a), Digal (б, в) deposits in the gabbrodiorite host rocks of the Nilau complex. Internal structures of pegmatite veins: very coarse-grained microcline zone (г), quartz core and spodumene-lepidolite-clevelandite zone (е). Abbreviations of minerals: Ab – albite, Clv – clevelandite, Elb – elbaite; Pl – plagioclase, Ms – muscovite, Qz – quartz, Spd – spodumene, Tur – tourmaline, Lpd – lepidolite.

и тонкоффрированных пород. Все разрывы имеют крутое или вертикальное падение плоскостей сбрасывателя.

**Габбро-диоритовый комплекс Нилау** раннемелового возраста слагает лополитообразные, линзовидные и штокообразные тела пестрого состава [21]. Породы данного комплекса представлены диоритами, габбро, габбро-норитами, габбро-диоритами, кварцевыми диоритами и плагиогранитами. Интрузивные породы прорывают сланцы и мраморы с приконтактовыми зонами дробления, брекчирования, милонитизацией, разгнейсованностью, обохренностью и широким развитием мелких кварцевых прожилков. Минеральный состав пород: плагиоклаз (лаб-

радор) – 50–60 %, роговая обманка – 20–30, моноклиновый пироксен – 10–20, ромбический пироксен – 4–6, биотит – 8–10 %. Акцессорные минералы представлены сфеном, цирконом, апатитом и титаномагнетитом.

**Порфириовидные граниты II-фазы комплекса Лагман** слагают западную часть района, где выходит на поверхность восточная часть гранитоидного комплекса Лагман. Данный комплекс представлен грубозернистыми порфириовидными биотитовыми гранитами. Структура пород порфириовидная, а в основной массе – гранитная. Текстура – массивная, со слабо выраженной гнейсоватостью. Порфириовидные выделения представлены решетчатым

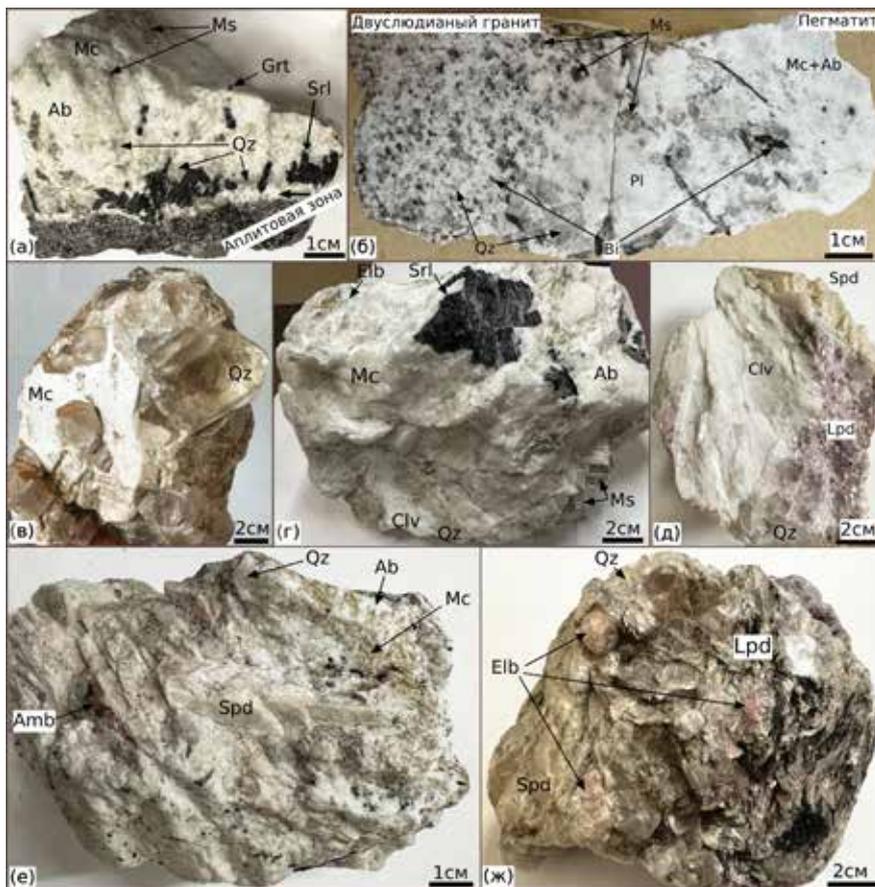


Рисунок 3. Крупнокристаллические структурно-текстуальные особенности пегматитов поля Дарай Печ (фото А. Юсуфзай): резкий контакт между лежащим флангом плагиоклаз-микроклин-шерл-биотит-мусковитовой жилы и биотит-амфиболовым диоритом комплекса Нилау (а); зона роста пегматитов из материнских пород – резкий контакт олигоклаз-микроклин-альбит-мусковитовой жилы и двуслюдяных гранитов III-фазы комплекса Лагман (б); горный хрусталь с блоковым микроклином из апографической кварц-альбит-микроклиновой зоны (в); плагиоклаз-микроклин-биотит-мусковитовый пегматит с шерлом и редким бериллом (г); пластинчатый клеветандит с сахаровидным лепидолитом из сподумен-клеветандит-лепидолитовой зоны (д); сахаровидный альбит в кварц-сподумен-альбитовой зоне с амблигонитом (е); крупнозерный лепидолит с ювелирным турмалином из сподумен-клеветандит-лепидолитовой зоны (ж). Обозначения минералов: Ab – альбит, Amb – амблигонит, Clv – клеветандит, Elb – эльбаит, Grt – гранат, Pl – плагиоклаз, Ms – мусковит, Qz – кварц, Spd – сподумен, Srl – шерл, Tur – турмалин, Lpd – лепидолит.

Figure 3. Coarse-crystalline structural-textural features of pegmatites from the Darai Pech field (photo by A. Yosufzai): sharp contact between the recumbent flank of the plagioclase-microcline-schorl-biotite-muscovite vein and the biotite-amphibole-diorite of the Nilau complex (a); growth zone of pegmatites from source rocks – sharp contact of oligoclase-microcline-albite-muscovite vein and phase III two-mica granites of the Laghman complex (b); rock crystal with blocky microcline from apographic quartz-albite-microcline zone (v); plagioclase-microcline-biotite-muscovite pegmatite with sherr and rare beryl (r); lamellar clevelandite with sugary grained lepidolite from the spodumene clevelandite-lepidolite zone (d); sugary grained albite in the quartz-spodumene-albite zone with amblygonite (e); coarse-grained lepidolite with gem tourmaline from the spodumene clevelandite-lepidolite zone (ж). Abbreviations of minerals: Ab – albite, Amb – amblygonite; Clv – clevelandite, Elb – elbaite; Grt – garnet; Pl – plagioclase, Ms – muscovite, Qz – quartz, Spd – spodumene, Srl – schorl; Tur – tourmaline, Lpd – lepidolite.

микроклином, размер порфиробласт колеблется от 0.5 до 10 см в длину и до 2–3 см в поперечнике. Основная масса породы сложена плагиоклазом на 25–30 %, калиевым полевым шпатом на 30–35, кварцем на 25–30, биотитом, иногда мусковитизированным, на 5–8 и роговой обманкой на 5 %. Акцессорные минералы представлены ортитом, сфеном, цирконом, апатитом, диопсидом, касситеритом, титаномагнетитом.

**Среднезернистые и пегматоидные граниты III-фазы комплекса Лагман** состоят из мелко- и среднезернистых двуслюдяных гранитов и грубозернистых, пегматоидных

разностей. Между этими гранитами наблюдаются резкие интрузивные контакты и постепенные переходы. Мелко- и среднезернистые раскристаллизовались раньше, они сложены кварцем на 38–40 %, калиевым полевым шпатом на 30–33, плагиоклазом-олигоклазом и альбитом на 25–27, биотитом и мусковитом на 7–11 %. Акцессорные минералы: апатит, циркон, сфен и рудный. Мусковит здесь часто развивается по биотиту.

Минеральный состав грубозернистых, пегматоидных гранитов: плагиоклаз (олигоклаз) – 44–48 %, калиевый полевой шпат – 22–26, кварц – 26–30, шерл – до 5, биотит и мусковит – 3–5 %, встречаются также гранат, рунный минерал, иногда берилл.

Редкометалльные пегматиты имеют генетическое родство с гранитами III-фазы комплекса Лагман [22].

## Результаты и их обсуждение

Пегматитовое поле Дарай Печ приурочено к области несогласного сочленения двух структурных ярусов: нижнего, представленного сильно метаморфизованными протерозойскими породами серии Нуристан, и верхнего, сложенного слабо метаморфизованными триасовыми сланцами серии Кашмунд [12]. Протерозойские комплексы нижнего структурного яруса распространены в северо-восточной части района, смяты в синклимальную складку субширотного простирания с падением шарнира складки в восточном направлении. Простирание пород верхнего структурного яруса северо-восточное, они обнажены в южной и центральной частях района, но имеют ортогональное простирание в северо-западном направлении в северо-западной части площади [11].

Все пегматитовые жилы поля Дарай Печ можно разделить на четыре группы:

1. Плагиоклаз-микроклиновые, биотит-мусковитовые пегматиты с редкими кристаллами берилла.
2. Микроклин-альбитовые пегматиты с рудоразборным бериллом [23].
3. Существенно альбитовые пегматиты с редким сподуменом, колумбит-танталитом и касситеритом [17].

4. Альбит-сподуменовые пегматиты с комплексной колумбит-берилло-касситеритовой минерализацией [24].

**Плаггиоклаз-микроклин-биотит-мусковитовые пегматиты** распространены в восточной части поля, образуя группу жил субмеридионального простирания. Пегматиты локализуются в метаморфических породах и в зоне эндоконтакта с массивом габброидов. Жилы пегматитов данного типа занимают наиболее низкое гипсометрическое положение по сравнению с пегматитами других типов. Они имеют преимущественно плитообразную форму с редкими апофизами. Отдельные тела залегают в метаморфических породах и имеют форму мелких штоков, встречаются тела неправильной, линзовидной, редко четковидной форм и формы ветвистых жил. Мощность жил варьирует от первых сантиметров до 12–15 м, длина – от первых метров до 800–1000 м. Преобладают жилы мощностью 2–3 м. Простирание жил варьирует от северо-западного до субмеридионального. Падение жил, обнаженных в левом борту долины р. Кала, преимущественно восточное крутое – 75–85°; жилы на водоразделе рек Кала и Чамбалак имеют юго-западное падение под углами 15–20°, редко – до 35°.

Пегматиты данного типа обычно не содержат редкометалльных минералов. Лишь в отдельных случаях в них встречается берилл синего или зеленовато-синего цвета призматической или пластинчатой формы. Размеры кристаллов – от 0.5х2 см до 5х10 см. В той же жиле обнаружены единичные мелкие кристаллы колумбита-танталита и кристаллы ортита размером до 3х8 см.

**Микроклин-альбитовые пегматиты** имеют наибольшее распространение по сравнению с пегматитами других типов в пределах поля. Они встречены на площади всего поля, за исключением района с наиболее высокими абсолютными отметками на водоразделе рек Дигал и Чамбалак. Жилы пегматитов данного типа имеют плитообразную форму с мелкими апофизами и небольшими раздувами в отдельных участках. Размеры жил варьируют в широких пределах: мощность – от 1–2 до 14–16 м, длина – от 150 до 1400 м, преобладают жилы мощностью 1.5–2 м и длиной 400–600 м. Альбитизированные микроклиновые пегматиты обнажаются в левом борту р. Дигал и в приустьевой ее части, имеют субмеридиональное простирание и западное (редко юго-западное) падение под углами 15–25°, редко – до 30°. Пегматиты в междуречье Дигал – Чамбалак имеют северо-западное простирание и юго-западное падение под углами 20–30°. В южной части поля жилы этого типа имеют северо-восточное простирание и крутое (50–80°) юго-восточное падение.

Минеральный состав микроклин-альбитовых жил сравнительно прост. Они в основном сложены кварцем – 30 %, альбитом – 35 и микроклином – 30 %. Постоянной примесью является турмалин – около 5 %. Встречаются гранат, апатит, мусковит, фосфаты, развивающиеся по трифилину – минералу железа, лития и марганца, и по литиофилиту. Редкометалльные минералы в основном представлены бериллом, изредка – танталит-колумбитом и касситеритом.

Внутреннее строение микроклин-альбитовых пегматитов зональное или частично-зональное. Наибольшее распространение в пегматитах имеют: 1) кварц-альбитовый разнотельный материал; 2) кварц-микроклиновая зона; 3) участки блокового микроклина; 4) зона блокового кварца; 5) зона контакта гранита и пегматита. В пятой зоне, в приальбантовых частях жил, встречаются участки микроклин-плаггиоклазового состава и биотит-мусковитовый гранит [10].

**Альбитовые пегматиты** находятся в правом борту долины р. Дигал. Они гипсометрически расположены выше плаггиоклаз-микроклиновых и микроклин-альбитовых пегматитов. Форма тел плитообразная с апофизами, некоторые жилы на флангах разветвляются на мелкие прожилки. Мощность жил – от 1 до 14 м, длина – от 180 до 1400 м, преобладают мощности в 2–3 м и протяженностью 480–580 м. Простирание жил северо-западное, падение юго-западное под углами 15–20°, отдельные жилы имеют углы падения до 20–30°.

**Альбит-сподуменовые пегматиты** образуют самые крупные и продуктивные в отношении редких металлов жилы. Длина рудных тел – от 450 до 3000 м, мощность – от нескольких метров до 15–25 м. Одна из изученных нами жил вскрыта эрозией на 500 м. Она сложена альбитом – 37 %, кварцем – 34, сподуменом – 12 и микроклином – 15 %, в ней присутствуют мусковит и турмалин – по 1 %; встречаются гранат, апатит, трифилин-литофилит и продукты его изменения, берилл, танталит-колумбит, касситерит и другие минералы.

Жилы данного типа пегматитов в пределах поля занимают наиболее высокое гипсометрическое положение по сравнению с пегматитами других типов. Все они распространены между долинами Дигал и Чамбалак, на водоразделе рек Сулейманша и Саме Тангай и на правом борту р. Чапа Дара напротив кишлака Земьяки. Простирание жил в пределах месторождения Дарай Печ субмеридиональное, сменяющееся у северной его окраины север-северо-западным и юго-западным; падение жил западное и юго-западное под углами 20–33°. Простирание некоторых жил на южной окраине поля северо-восточное, падение юго-восточное под углами 10–18°.

Редкометалльная минерализация представлена сподуменом, мелкокрапленными разностями берилла и тонкопластинчатого колумбит-танталита. Здесь встречаются уникальные по размерам, хорошо сформированные кристаллы касситерита с алмазным блеском граней [25]. Также обнаружен мариалит  $\text{Na}_4[\text{AlSi}_3\text{O}_8]_3\text{Cl}$  – крайний член изоморфного ряда скаполита, который встречается вместе с турмалином, кунцитом и воробьевитом [26].

В связи с тем, что жилы редкометалльных пегматитов распространены в основном на высоком гипсометрическом уровне, то большое влияние на пространственное положение пегматитовых полей оказывает уровень эрозионного среза гранитных массивов. В частности, Алингарский гранитный плутон вскрыт современным эрозионным врезом на различном уровне. Здесь, в центральной его части, где обнажается сплошное поле гранитов II и III фаз внедрения, жилы редкометалльных пегматитов либо полностью от-

сутствуют, либо встречаются только среди останцев или глубоких прогибов вмещающих пород. Основное количество рудоносных жил располагается в области экзоконтакта интрузива, где обнажены лишь небольшие, размером от 0.5x2.0 до 3x10 км, массивы гранитов-III интрузивной фазы, которые можно рассматривать как сателлиты или крупные апофизы основного плутона. Наиболее крупные поля редкометалльных пегматитов пространственно и генетически связаны именно с такими мелкими массивами гранитов с очень низким эрозионным срезом [27].

Внутреннее строение пегматитовых тел плагиоклаз-микроклинового типа простое (рис. 4). Чаще всего жилы незональные и сложены микроклин-плагиоклазовым и биотит-мусковитовым сростаниями. В зональных фрагментах жил небольшие интервалы сложены кварц-микроклиновым письменным гранитом, кварц-мусковитовым агрегатом, блоковым кварцем и сахаровидным альбитом.

Внутреннее строение микроклин-альбитовых жил характеризуется отчетливой зональностью. Она образована следующими минералогическими зонами (рис. 4):

1. Зона гранит-пегматита в приальбантовых частях жил, где встречаются микроклин-плагиоклазовый и биотит-мусковитовый агрегаты.
2. Средне- или крупнозернистая кварц-альбитовая зона.
3. Зона блокового микроклина.
4. Апографическая кварц-альбит-микроклиновая зона.
5. Разнозернистый альбитовый комплекс.
6. Зона блокового кварца в ядре жилы.

Первые две зоны всегда располагаются в альбандах пологозалегающих жил. Причем зона гранит-пегматита находится только в нижней половине жилы, а кварц-альбитовая зона – только в верхней ее части. Между этими

двумя краевыми зонами и кварцевым ядром располагаются остальные три зоны. Если кварцевое ядро отсутствует, то промежуточные зоны слагают центр жилы. При этом в их взаимном расположении не наблюдается строгой закономерности; зачастую одна или две из них вообще отсутствуют.

Берилл встречается во всех зонах, однако наибольшее развитие он имеет в краевой кварц-альбитовой зоне, в которой присутствует так называемый «фаршированный» берилл. Он легко поддается ручной рудоразборке благодаря сравнительно крупным размерам. Длина кристаллов – 7–12 см, хорошая огранка, яркий зеленовато-голубой цвет. Гнезда белого сподумена, лепидолита, амблигонита, полихромного турмалина распространены в жилах в долине ручья Аврагал и в правом борту долины Дигал [24, 28].

Интересно отметить парагенезис берилла и колумбит-танталита, почти всегда встречающихся вместе. Кварц поздней генерации наиболее обычен в крупных жилах. В зоне блокового микроклина встречаются редкие кристаллы колумбит-танталита, касситерита и редкие крупные кристаллы берилла, до 30 см в поперечнике, распространенные в долине р. Чамбарак и вместе с альбит-сподуменовыми пегматитами образующие месторождение Дарай Печ [29].

Внутреннее строение пегматитовых жил альбит-сподуменового типа массивное, полосчатое, участками – зональное. Они сложены разнозернистым кварц-альбит-сподуменовым и кварц-альбитовым сахаровидными тонкозернистыми агрегатами; в подчиненном количестве – блоковым микроклином и кварц-альбитовой среднезернистой породой.

На схеме (рис. 4) показано, что минеральный состав пегматитовых жил и их внутреннее строение незначи-

тельно изменяются от высоты 1700 до 2400 м.

Внутреннее строение пегматитовых тел альбитового типа участками зональное. Жилы сложены на 70–80 % разнозернистым кварц-микроклин-альбитовым агрегатом (рис. 4). Остальная часть жил выполнена блоковым микроклином и кварц-альбит-сподуменовым сростанием. Гнезда с лепидолитом, амблигонитом, танталитом и полихромным турмалином встречаются спорадически.

Во внутреннем строении жил сподумен-альбитового типа выделяются четыре основных структурно-парагенетических комплекса (рис. 4):

1. Тонкозернистый, местами сахаровидный, кварц-альбитовый агрегат.

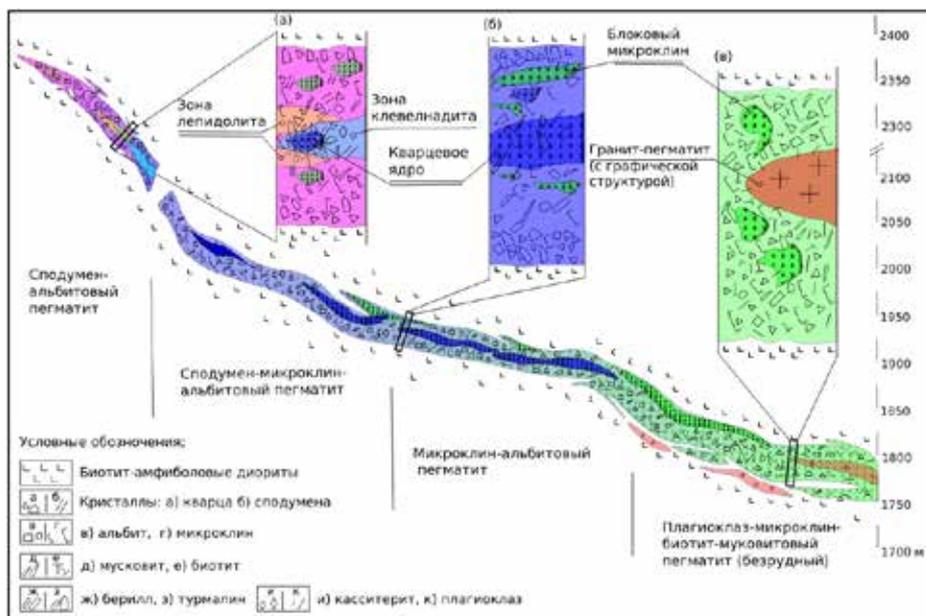


Рисунок 4. Схема изменения минерального состава в пегматитовой жиле по мере удаления от корневого контакта с гранитоидом, нижний правый угол, до головной части жилы на месторождении Дигал: а) сподумен-альбитовый; б) микроклин-альбитовый; в) плагиоклаз-микроклин-биотит-мусковитовый составы. Составлено авторами.

Figure 4. Scheme of changes in the mineral composition of pegmatite vein with distance from the root contact with the granitoid, lower right corner, to the head of the vein at the Dигал deposit: а) spodumene-albite; б) microcline-albite; в) plagioclase-microcline-biotite-muscovite compositions. Prepared by the authors.

2. Кварц-альбит-сподуменовый комплекс.
3. Блоковый микроклин.
4. Зона клевеландита и лепидолита.

В количественном отношении первые два комплекса резко преобладают над третьим. Текстура жил, несмотря на наличие отдельных явно зональных участков, частично зональная. Иногда все три комплекса переплетаются самым причудливым образом. Например, если на каком-то участке жилы преобладает кварц-альбит-сподуменовый комплекс, то в нем всегда рассеяны отдельные блоки микроклина или их скопления, а также гнезда или полосы сахаровидного альбита. Наоборот, если в жиле преобладает полевой шпат, то кварц-альбит-сподуменовый комплекс образует здесь гнездообразные участки или жилообразные обособления. Из редкометалльных минералов в жилах присутствуют: сподумен, мелковкрапленный берилл, тонкопластинчатый колумбит-танталит и касситерит.

В пространственном расположении пегматитов поля Дарай Печ устанавливается совершенно отчетливая закономерность: в самых низах гипсометрической последовательности, начиная от материнского гранитного тела, залегают преимущественно плагиоклаз-микроклиновые жилы, выше – микроклин-альбитовые, еще выше – крупные жилы альбитовых пегматитов с редкими кристаллами сподумена, в самом верху располагаются крупные жилы альбит-сподуменовой типа. Наиболее дифференцированные зональные жилы залегают в средней части установленной последовательности. От них к низу и вверх зональность в жилах уменьшается, и вместо отчетливо зональной текстуры в пегматитах появляются частично зональная и даже массивная.

По мере перехода от нижних жил к верхним количество микроклина последовательно уменьшается от 42 до 13 %, а количество альбита возрастает от 25 до 35 %. Одновременно увеличивается количество сподумена – от 0.1 до 15 %. Содержание берилла возрастает от нижних к средним жилам, достигая максимума в микроклин-альбитовых пегматитах. Далее вверх его содержание, видимо, не уменьшается, но рудоразборный берилл заменяется мелковкрапленным.

Практическое значение из четырех названных выше типов пегматитов имеют только микроклин-альбитовые и альбит-сподуменовые. Общая длина выхода самой крупной жилы на поверхность равна 1260 м, но поскольку пегматитовое тело вскрыто эрозионным срезом по диагонали, то длина его вскрытой части по простиранию не превышает 825 м, а по падению протяженность жилы достигает 765 м. Мощность жилы колеблется от 40 см до 4–6 м, в среднем составляет 2 м.

## Заключение

По характеру залегания пегматитовые тела в поле Дарай Печ можно разделить на две группы. Первая – крутопадающие жилы с углом падения от 45 до 85°, залегающие в основном среди филлитовых сланцев верхнетриасового возраста и гнейсов нижнего протерозоя. Они имеют симметричную зональную структуру, причем одни и те же зоны по минералогическому составу существуют по обе

стороны ядра жилы. Эти жилы очень редко встречаются среди интрузивных пород габбро-диоритов комплекса Нилау.

Вторая группа – пологопадающие жилы с углами падения 7–30°. Они имеют асимметричную зональную структуру – в нижней части, в лежачем боку, проявлены относительно мелко- и среднезернистые зоны, а в висячем фланге среднезернистый пегматит постепенно сменяется крупнозернистым. Такие жилы не имеют центрального ядра. Их основная масса располагается среди габбро-диоритов комплекса Нилау, редко встречается в гнейсах и очень редко – в сланцах.

Установлена взаимосвязь между размещением пегматитов и фаз внедрения гранитных массивов. Особенности важной является зависимость между пегматитами редкометалльной специализации с III-фазой гранитоидного комплекса Лагман. Данная закономерность указывает на их генетическое родство и возможность формирования из специализированного по редким металлам, по литию и др., гранитного расплава. То есть граниты III-фазы внедрения комплекса Лагман могут быть использованы в качестве поискового признака для новых редкометалльных пегматитов в регионе.

Установлена закономерность размещения пегматитов вокруг гранитных массивов. Высокотемпературные жилы с преобладанием микроклиновых пегматитов обычно встречаются вблизи интрузии, тогда как жилы, несущие сподумен, наблюдаются в более низких температурных условиях, на значительном расстоянии от материнского гранитного массива.

В этом же ряду изменяется минералогический состав пегматитов. По мере удаления от гранитов пегматиты существенно микроклинового состава последовательно сменяются альбитовыми, сподумен-альбитовыми и лепидолит-сподумен-клевеландитовыми. Полное отсутствие биотита, повышенное содержание мусковита и проявления клевеландита в пегматитах могут служить индикаторами поисков драгоценных камней.

В ходе полевых работ в пегматитовом поле Дарай Печ в общей сложности закартировано 22 пегматитовых тела. По результатам исследования можно сделать вывод, что изученная площадь чрезвычайно богата редкими металлами и драгоценными камнями. Используя установленные закономерности в их размещении, предлагается расширить поисковые и разведочные работы на рассматриваемой территории с целью обнаружения новых крупных месторождений редкометалльного сырья.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Бескин, С. М. Особенности гранитовых систем с редкометалльными пегматитами / С. М. Бескин, Ю. Б. Марин // Записки Российского минералогического общества. – 2019. – Т. 148, № 4. – С. 1–16.
2. London, D. Granitic pegmatites / D. London // Transactions of the Royal Society of Edinburgh : Earth Sciences. – 1996. – Vol. 87. – № 1–2. – P. 305–319.

3. Alekseev, V. I. On the genesis of "white granite" from the Kester harpolith, Arga-Ynnakh-Khaya pluton, East Yakutia / V. I. Alekseev, Y. B. Marin // Russian Mineralogical Society. – 2021. – Vol. 62. – № 1. – P. 719–730.
4. London, D. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites / D. London // Lithos. – 2014. – Vol. 184–187. – P. 74–104.
5. Černý, P. Rare-element granitic pegmatites. Part I : Anatomy and Internal Evolution of Pegmatite Deposits / P. Černý // Geoscience Canada. – 1991. – Vol. 18. – № 2. – P. 49–67.
6. Cerný, P. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research / P. Cerný // Applied Geochemistry. – 1992. – № 4. – P. 393–416.
7. Jahns, R. H. Experimental studies of pegmatite genesis : A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites / R. H. Jahns, C. W. Burnham // Economic Geology. – 1969. – Vol. 64. – № 8. – P. 842–864.
8. Rossovskiy, L. N. Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) / L. N. Rossovskiy, V. M. Chmyrev // International Geology Review. – 1977. – Vol. 19. – № 5. – P. 511–520.
9. Скублов, С. Г. Редкоэлементный состав берилла из месторождений сподуменовых пегматитов провинции Кунар, Афганистан / С. Г. Скублов, А. Юсуфзай, А. Н. Евдокимов, А. К. Гаврильчик // Минералогия. – 2024. – Т. 10, № 2. – С. 58–77.
10. Mosazai, A. M. The geological characteristics and economical importance of pegmatite belt of Afghanistan / A. M. Mosazai, A. Yousufi, H. Ahmadi // Geology and Bowels of the Earth (Russian). – 2017. – Vol. 65. – № 4. – P. 26–33.
11. Cocker, M. D. Summaries of important areas for mineral investment and production opportunities of nonfuel minerals in Afghanistan / M. D. Cocker // Open-file report, US Geological Survey. – 2011. – P. 2011–1204.
12. Rossovskiy, L. N. Features of the formation of the rare-metal pegmatites under conditions of compression and tension (as exemplified by the Hindu Kush region) / L. N. Rossovskiy, S. I. Konovalenko // International Geology Review. – 1979. – Vol. 21. – № 7. – P. 755–764.
13. Rossovskiy, L. N. New fields and belts of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Eastern Afghanistan) / L. N. Rossovskiy, V. M. Chmyrev, A. S. Salakh // International Geology Review. – 1976. – Vol. 18. – № 11. – P. 1339–1342.
14. Mashkoo, R. Detecting Li-bearing pegmatites using geospatial technology : the case of SW Konar Province, Eastern Afghanistan / R. Mashkoo, H. Ahmadi, A. B. Rahmani, E. Pekkan, // Geocarto International. – 2022. – Vol. 37. – № 26. – P. 1–22.
15. Lai, B. U–Pb dating, gemology, and chemical composition of apatite from Dara-e-Pech, Afghanistan / B. Lai, B. Xu, Y. Zhao // Crystals. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 34.
16. Beskin, S. Granite systems with rare-metal pegmatites / S. Beskin, Y. B. Marin // Geology of Ore Deposits. – 2020. – Vol. 62. – № 4. – P. 554–563.
17. Popov, M. P. Peculiarities of rare-metal mineralization and genetic relationship of mineral associations in the eastern rim of Murzinsko-Aduysky anticlinorium (the Ural Emerald Belt) / M. P. Popov // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 255. – № 3. – P. 337–348.
18. Machevariani, M. M. Complex characteristic of zircon from granitoids of the Verkhneurmiskiy Massif (Amur region) / M. M. Machevariani, A. V. Alekseenko, J. Bech // Minerals. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 1–29.
19. Rossovskiy, L. N. Rare-metal pegmatites with precious stones and conditions of their formation (Hindu Kush) / L. N. Rossovskiy // International Geology Review. – 1981. – Vol. 23. – № 11. – P. 1312–1320.
20. Faryad, S. W. Magmatism and metamorphism linked to the accretion of continental blocks south of the Hindu Kush, Afghanistan / S. W. Faryad, S. Collett, M. Petterson, S. A. Sergeev // Lithos. – 2013. – Vol. 175–176. – P. 302–314.
21. Alekseev, V. I. Type intrusive series of the Far East belt of lithium-fluoric granites and its ore content / V. I. Alekseev // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 255. – № 3. – P. 377–392.
22. London, D. Formation of tourmaline-rich gem pockets in miarolitic pegmatites / D. London // American Mineralogist. – 1986. – Vol. 71. – P. 396–405.
23. Skublov, S. G. Geochemistry of beryl varieties: comparative analysis and visualization of analytical data by principal component analysis (PCA) and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) / S. G. Skublov, A. K. Gavrilchik, A. V. Berezin // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 255. – № 3. – P. 455–469.
24. Morozova, L. N. Li-Cs-Na-rich beryl from beryl-bearing pegmatite dike No. 7 of the Shongui deposit, Kola Province, Russia / L. N. Morozova, S. G. Skublov, D. R. Zozulya, P. A. Serov, E. S. Borisenko [et al.] // Geosciences (Switzerland). – 2023. – Vol. 13. – № 10.
25. Петровичев, Д. А. Коллекционные и ювелирные касситериты; перспективы добычи / Д. А. Петровичев // Отечественная геология. – 2018. – Т. 3. – С. 68–77.
26. Литвиненко, А. К. Геология Черногорского месторождения ювелирного скаполита на Центральном Памире (Таджикистан) / А. К. Литвиненко, С. Б. Моисеева, Ш. А. Одинаев, В. А. Утенков // Геология рудных месторождений. – 2019. – Т. 61, № 5. – С. 96–108.
27. Rossovskiy, L. N. The Kulam kunzite deposit in Afghanistan / L. N. Rossovskiy, V. M. Chmyrev, A. S. Salakh // International Geology Review. – 1977. – Vol. 19. – № 12. – P. 1429–1432.
28. Gavrilchik, A. K. Trace element composition of beryl from the Sherlovaya Gora deposit, Southeastern Transbaikalian Region, Russia / A. K. Gavrilchik, S. G. Skublov, E. L. Kotova // Geology of Ore Deposits. – 2022. – Vol. 64. – № 7. – P. 442–451.
29. Alekseev, V. I. Evolution of mineral forms of rare element accumulation in ore-bearing granites and metasomatites of Verkhneurmiskiy ore cluster (Priamur region) / V. I. Alekseev, K. G. Sukhanova, I. M. Gembitskaya // Journal of Mining Institute. – 2017. – Vol. 224. – P. 149–155.

## References

1. Beskin, S. M. Osobennosti granitovykh sistem s redko-metal'nymi pegmatitami [Features of granite systems

- with rare metal pegmatites] / S. M. Beskin, Yu. B. Marin // *Zapiski Rossiiskogo Mineralogicheskogo Obshchestva [Letters of the Russian Mineralogical Society]*. – 2019. – Vol. 148. – № 4. – P. 1–16.
2. London, D. Granitic pegmatites / D. London // *Transactions of the Royal Society of Edinburgh : Earth Sciences*. – 1996. – Vol. 87. – № 1–2. – P. 305–319.
  3. Alekseev, V. I. On the genesis of “white granite” from the Kester harpolith, Arga–Ynnakh–Khaya pluton, East Yakutia / V. I. Alekseev, Y. B. Marin // *Russian Mineralogical Society*. – 2021. – Vol. 62. – № 1. – P. 719–730.
  4. London, D. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites / D. London // *Lithos*. – 2014. – Vol. 184–187. – P. 74–104.
  5. Černý, P. Rare-element granitic pegmatites. Part I : Anatomy and Internal Evolution of Pegmatite Deposits / P. Černý // *Geoscience Canada*. – 1991. – Vol. 18. – № 2. – P. 49–67.
  6. Černý, P. Geochemical and petrogenetic features of mineralization in rare-element granitic pegmatites in the light of current research / P. Černý // *Applied Geochemistry*. – 1992. – № 4. – P. 393–416.
  7. Jahns, R. H. Experimental studies of pegmatite genesis : A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites / R. H. Jahns, C. W. Burnham // *Economic Geology*. – 1969. – Vol. 64. – № 8. – P. 842–864.
  8. Rossovskiy, L. N. Distribution patterns of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Afghanistan) / L. N. Rossovskiy, V. M. Chmyrev // *International Geology Review*. – 1977. – Vol. 19. – № 5. – P. 511–520.
  9. Skublov S.G. Redkozemelnyi sostav berila iz mestorozhdeniy spodumenovykh pegmatitov provintsii Kunar, Afghanistan [Trace element composition of beryl from spodumene pegmatite deposits of the Kunar Province, Afghanistan] / S. G. Skublov, A. Yosufzai, A. N. Evdokimov, A. K. Gavrilchik // *Mineralogy*. – 2024. – Vol. 10. – № 2. – P. 58–77.
  10. Mosazai, A. M. The geological characteristics and economical importance of pegmatite belt of Afghanistan / A. M. Mosazai, A. Yousufi, H. Ahmadi // *Geology and Bowels of the Earth (Russian)*. – 2017. – Vol. 65. – № 4. – P. 26–33.
  11. Cocker, M. D. Summaries of important areas for mineral investment and production opportunities of nonfuel minerals in Afghanistan / M. D. Cocker // *Open-file report, US Geological Survey*. – 2011. – P. 2011–1204.
  12. Rossovskiy, L. N. Features of the formation of the rare-metal pegmatites under conditions of compression and tension (as exemplified by the Hindu Kush region) / L. N. Rossovskiy, S. I. Konovalenko // *International Geology Review*. – 1979. – Vol. 21. – № 7. – P. 755–764.
  13. Rossovskiy, L. N. New fields and belts of rare-metal pegmatites in the Hindu Kush (Eastern Afghanistan) / L. N. Rossovskiy, V. M. Chmyrev, A. S. Salakh // *International Geology Review*. – 1976. – Vol. 18. – № 11. – P. 1339–1342.
  14. Mashkoo, R. Detecting Li-bearing pegmatites using geospatial technology : the case of SW Konar Province, Eastern Afghanistan / R. Mashkoo, H. Ahmadi, A. B. Rahmani, E. Pekkan // *Geocarto International*. – 2022. – Vol. 37. – № 26. – P. 1–22.
  15. Lai, B. U–Pb dating, gemology, and chemical composition of apatite from Dara-e-Pech, Afghanistan / B. Lai, B. Xu, Y. Zhao // *Crystals*. – 2023. – Vol. 14. – № 1. – P. 34.
  16. Beskin, S. Granite systems with rare-metal pegmatites / S. Beskin, Y. B. Marin // *Geology of Ore Deposits*. – 2020. – Vol. 62. – № 4. – P. 554–563.
  17. Popov, M. P. Peculiarities of rare-metal mineralization and genetic relationship of mineral associations in the eastern rim of Murzinsko–Aduysky anticlinorium (the Ural Emerald Belt) / M. P. Popov // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Vol. 255. – № 3. – P. 337–348.
  18. Machevariani, M. M. Complex characteristic of zircon from granitoids of the Verkhnemurmiyskiy Massif (Amur region) / M. M. Machevariani, A. V. Alekseenko, J. Bech // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11. – № 1. – P. 1–29.
  19. Rossovskiy, L. N. Rare-metal pegmatites with precious stones and conditions of their formation (Hindu Kush) / L. N. Rossovskiy // *International Geology Review*. – 1981. – Vol. 23. – № 11. – P. 1312–1320.
  20. Faryad, S. W. Magmatism and metamorphism linked to the accretion of continental blocks south of the Hindu Kush, Afghanistan / S. W. Faryad, S. Collett, M. Petterson, S. A. Sergeev // *Lithos*. – 2013. – Vol. 175–176. – P. 302–314.
  21. Alekseev, V. I. Type intrusive series of the Far East belt of lithium–fluoric granites and its ore content / V. I. Alekseev // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Vol. 255. – № 3. – P. 377–392.
  22. London, D. Formation of tourmaline-rich gem pockets in miarolitic pegmatites / D. London // *American Mineralogist*. – 1986. – Vol. 71. – P. 396–405.
  23. Skublov, S. G. Geochemistry of beryl varieties: comparative analysis and visualization of analytical data by principal component analysis (PCA) and t-distributed stochastic neighbor embedding (t-SNE) / S. G. Skublov, A. K. Gavrilchik, A. V. Berezin // *Journal of Mining Institute*. – 2022. – Vol. 255. – № 3. – P. 455–469.
  24. Morozova, L. N. Li–Cs–Na-rich beryl from beryl-bearing pegmatite dike No. 7 of the Shongui deposit, Kola Province, Russia / L. N. Morozova, S. G. Skublov, D. R. Rozulya, P. A. Serov, E. S. Borisenko [et al.] // *Geosciences (Switzerland)*. – 2023. – Vol. 13. – № 10.
  25. Petrochenkov, D. A. Kolleksiionnyye i yuvelirnyye kassiterity; perspektivy dobychi [Collectible and jewelry cassiterites; production prospects] / D. A. Petrochenkov // *Otechestvennaya Geologiya [National Geology]*. – 2018. – Vol. 3. – P. 68–77.
  26. Litvinenko, A. K. Geologiya Chernogorskogo mestorozhdeniya yuvelirnogo skapolita na Tsentral'nom Pamire (Tadzhikistan) [Geology of the Chernogorsk jewelry scapolite deposit in the Central Pamirs (Tajikistan)] / A. K. Litvinenko, S. B. Moiseeva, Sh. A. Odinaev, V. A. Utenkov // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*. – 2019. – Vol. 61. – № 5. – P. 96–108.
  27. Rossovskiy, L. N. The Kulam kunzite deposit in Afghanistan / L. N. Rossovskiy, V. M. Chmyrev, A. S. Salakh // *International Geology Review*. – 1977. – Vol. 19. – № 12. – P. 1429–1432.

28. Gavrilchik, A. K. Trace element composition of beryl from the Sherlovaya Gora deposit, Southeastern Transbaikal Region, Russia / A. K. Gavrilchik, S. G. Skublov, E. L. Koto-va // *Geology of Ore Deposits*. – 2022. – Vol. 64. – № 7. – P. 442–451.
29. Alekseev, V.I. Evolution of mineral forms of rare element accumulation in ore-bearing granites and metasomatites of Verkhneurmisk ore cluster (Priamur region) / V. I. Alekseev, K. G. Sukhanova, I. M. Gembitskaya // *Journal of Mining Institute*. – 2017. – Vol. 224. – P. 149–155.

#### Информация об авторах:

**Евдокимов Александр Николаевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II; Scopus Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-8121-0426> (119192, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2; e-mail: [evdokivov\\_an@spmi.ru](mailto:evdokivov_an@spmi.ru)).

**Юсуфзай Атаулла** – аспирант-исследователь кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II; Scopus Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6549-4409> (119192, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2; e-mail: [s215138@stud.spmi.ru](mailto:s215138@stud.spmi.ru)).

**Мусазаи Амир Морхаммад** – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и разведки месторождений полезных ископаемых Кабульского политехнического университета (1001, Афганистан, г. Кабул, Район-5, Карта-е-Мамурин; e-mail: [mosazai@gmail.com](mailto:mosazai@gmail.com)).

#### About the authors:

**Alexander N. Evdokimov** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor at the Department of Geology and Exploration of Minerals Deposits, Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II. Scopus Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-8121-0426> (Building 2, 21st Line, Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation; e-mail: [evdokivov\\_an@spmi.ru](mailto:evdokivov_an@spmi.ru)).

**Ataullah Yosufzai** – PhD Student, Department of Geology and Exploration of Minerals Deposits, Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II. Scopus Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6549-4409> (Building 2, 21st Line, Vasilyevsky Island, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation; e-mail: [s215138@stud.spmi.ru](mailto:s215138@stud.spmi.ru)).

**Amir Mohammad Mosazai** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor at the Department of Geology and Exploration of Minerals Deposits, Kabul Polytechnic University (Karta-e-Mamurin, 5-District, Kabul 1001, Afghanistan; e-mail: [mosazai@gmail.com](mailto:mosazai@gmail.com)).

#### Для цитирования:

Евдокимов, А. Н. Внутреннее строение и закономерности распределения минеральных типов редкометалльных пегматитов в долине Дарай Печ (провинция Кунар, Афганистан) / А. Н. Евдокимов, А. Юсуфзай, А. М. Мусазаи // *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле»*. – 2024. – № 3 (69). – С. 52–62.

#### For citation:

Evdokimov, A. N. Vnutrennee stroenie i zakonornosti raspredeleniya mineralnyh tipov redkometalnyh pegmatitov v doline Daraj Pech (provinciya Kunar, Afganistan) [Internal structure and distribution patterns of mineral types of rare metal pegmatites in the Darai Pech valley (Kunar province, Afghanistan)] / A. N. Evdokimov, A. Yosufzai, A. M. Mosazai // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences"*. – 2024. – № 3 (69). – P. 52–62.

Дата поступления статьи: 21.03.2024

Прошла рецензирование: 21.03.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 21.03.2024

Reviewed: 21.03.2024

Accepted: 27.03.2024

## Особенности состава и формирования россыпей алмазов в краевых частях древних кратонов (на примере северо-востока Сибирской платформы)

Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов

Западно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия),  
г. Мирный  
nnzinchuk@rambler.ru

### Аннотация

На основании обобщения значительного объема фактического материала по комплексному изучению алмаза дана его характеристика в современных толщах краевых частей основных алмазоносных районов Сибирской платформы. Установленный комплекс особенностей по морфологии, окраске, твердым включениям, внутреннему строению, фотолюминесценции, а также примесному составу свидетельствует о множественности первоисточников алмазов из россыпей и наличии в пределах района новых, еще не открытых кимберлитовых тел, в том числе с высоким содержанием полезного компонента. Изученные алмазы из современных россыпей алмазоносных районов Лено-Анабарской субпровинции сравнительно однообразны и в целом близки к кристаллам из окаймляющих россыпные проявления более древних вторичных коллекторов. В основном для описываемых россыпей и алмазных проявлений характерно низкое содержание алмазов кимберлитового типа первоисточника. Присутствие относительно свежих алмазов нижнеленского типа (без механического износа и слабо ожелезненных камней) также является отличительным признаком современных россыпей региона. Полученные в результате исследований типоморфные признаки алмазов можно успешно использовать при районировании данной территории в процессе проводимых геолого-поисковых работ.

### Ключевые слова:

Сибирская платформа, алмазы и алмазоносные россыпи

### Введение

Результаты изучения минералогии и некоторых физических особенностей алмазов из отдельных кимберлитовых тел или рудных столбов трубок сложного геологического строения, а также кустов и кимберлитовых полей в целом позволили выделить типоморфные особенности исследуемого минерала, связанные с вещественным составом и алмазоносностью кимберлитов. До настоящего времени не в полной мере изучены и систематизированы

## Features of the composition and formation of diamond placers in the marginal parts of ancient cratons (on the example of the North-East of the Siberian platform)

N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov

West-Yakutian Science Centre of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia),  
Mirny  
nnzinchuk@rambler.ru

### Abstract

Summarizing a significant amount of factual material on the complex study of diamond, we have prepared its characterization in the modern strata of the marginal parts of the main diamondiferous regions of the Siberian Platform. The established characteristics on the morphology, coloring, solid inclusions, internal structure, photoluminescence, as well as the impurity composition of diamond, testifies to a multiple number of the primary sources of diamonds from placers and the presence of new, yet undiscovered kimberlite bodies, including those with high content of the useful component, within the region. The studied diamonds from modern placers in the diamondiferous areas of the Leo-Anabar subprovince are relatively homogenous and, in general, are close to the crystals from the older secondary reservoirs surrounding the placers. On the whole, the described placers and diamond occurrences are characterized by a low diamond content of kimberlite type. The presence of relatively "fresh" diamonds of the Lower Lena type in modern placers of this region (without mechanical wear and weakly ferruginized stones) is also a distinctive feature of the modern placers of the region. The typomorphic features of diamonds obtained during the research can be successfully used for zoning of the area concerned in the course of geological prospecting works.

### Keywords:

Siberian platform, diamond and diamond-bearing placers

ранина, М. А. Гневушева, Э. С. Ефимовой, В. Р. Захаровой, Ф. В. Каминского, В. Н. Квасницы, Т. В. Кедровой, В. И. Коптиля, Г. П. Кудрявцевой, А. Н. Липашовой, А. И. Махина, В. П. Миронова, Б. С. Помазанского, Н. П. Похиленко, Э. В. Специуса, А. Д. Харькива, Г. К. Хачатрян и др. Часть фактического и аналитического материала по изучению алмазов описываемой территории помещена в книге Н. Н. Зинчука и В. И. Коптиля [1], являющейся своего рода базой данных комплексного изучения более 200 тыс. кристаллов алмаза, полученных в процессе многолетних прогнозно-поисковых работ на Сибирской платформе (далее – СП). Указанная база данных существенно дополнена Л. Д. Бардухиновым, который провел при этом комплексное изучение доступной коллекции с помощью современных физико-химических методов. Другая часть материала по россыпной продуктивности этой территории была использована при характеристике современных россыпей Лено-Анабарского междуречья СП [2], что частично может совпадать с особенностями алмазов из более древних коллекторов описываемого региона, являющихся поставщиками кристаллов в более молодые отложения.

## Материалы и методы

Сибирская платформа характеризуется [3–7] широким развитием кимберлитовых тел и разновозрастных вторичных коллекторов алмазов раннекарбонатового, позднекарбонатового, раннепермского, позднепермского, раннетриасового, поздне триасового, раннемелового, позднеюрского (ранневолжского), раннеюрского, неоген-четвертичного и современного возрастов. При изучении алмазов из коренных и россыпных месторождений нами использовалась минералогическая классификация Ю. Л. Орлова [8], в основу которой положены как их внешние минералогические характеристики, так и признаки, непосредственно отражающие условия генезиса этого минерала. Такими признаками являются формы роста природных алмазов, прослеживаемые по их внутренней морфологии. Различия в формах роста кристаллов послужили основанием для выделения 11 разновидностей моно- и поликристаллических алмазов [8], каждая из которых определяется специфичностью условий образования [9–21]. Позднее было показано [22–25], что все разновидности алмазов характеризуются своим набором структурных дефектов и особенностями их распределения по объему кристалла, что является физическим обоснованием данной классификации. К 1-й разновидности отнесены бесцветные и в различной степени окрашенные в дымчато-коричневые цвета (из-за пластической деформации) алмазы. Кристаллы этой разновидности подразделены на шесть больших групп: октаэдры, ромбододекаэдры, переходные формы ряда октаэдр-ромбододекаэдр, псевдогемиморфные кристаллы, кубоиды и бесформенные осколки без признаков кристаллографической огранки. В свою очередь, кристаллы ромбододекаэдрического габитуса делятся на две подгруппы: ламинарные ромбододекаэдры ряда октаэдр-ромбододекаэдр (полуокруглые алмазы, которые разделены на две подгруппы: скрытослоистые додекаэдры

«уральского» или «бразильского» типа) и додекаэдриды с шагренью и полосами деформации «жильного» типа. 2-я разновидность – это кристаллы кубического и тетрагексаэдрического габитусов, равномерно окрашенные в янтарно-желтые и табачно-зеленые цвета, а также черные и эмалевидные непрозрачные кубоиды (форма роста – куб) с повышенной концентрацией парамагнитного азота, с желто-оранжевой фотолюминесценцией. 3-я разновидность характеризуется кристаллами кубического габитуса (серые, бесцветные) со своеобразным внутренним строением (текстурой), обычно зеленой фотолюминесценцией. К 4-й разновидности относятся алмазы с бесцветным ядром и окрашенной в желтые, зеленовато-желтые и серые цвета оболочкой октаэдров, комбинационных многогранников (октаэдр+ромбододекаэдр+куб), реже кубов. 5-я разновидность – это темные, переполненные включениями графита во внешней зоне алмазы ряда октаэдр-ромбододекаэдр, в основном октаэдриды (полуокруглые) с мозаично-блоковым внутренним строением, обычно представленные незакономерными сростками трех-четырёх разновеликих индивидов, без признаков видимого свечения в ультрафиолетовых лучах. 6-я разновидность характеризуется поликристаллическими сростками типа баллас, представляющими собой сферокристаллы с радиально-лучистым внутренним строением и волокнистой структурой, с характерными многоугольными (пятерники) на обычно додекаэдрической поверхности, в основном с ярко-голубой фотолюминесценцией. К 7-й разновидности отнесены сложное деформированные двойники и сростки додекаэдридов, близкие по своим свойствам к 5-й разновидности, но почти без включений графита. Для 8-й разновидности характерны очень редкие в россыпях и кимберлитовых телах северо-востока СП поликристаллические агрегаты, обычно состоящие из мелких индивидов октаэдрического габитуса с несколько пониженной интенсивностью фото- и рентгенолюминесценции, присущие известным месторождениям Якутии с промышленной алмазоносностью. К 9-й разновидности относится мелкозернистый борт. 10-я разновидность – это карбонадо, характерные для россыпей Бразилии. 11-я разновидность – поликристаллы алмаза с примесью гексагональной модификации углерода (лонсдейлита) импактного генезиса, характерные для россыпей северо-востока СП. Следует отметить, что большинство разновидностей алмазов выделены Ю. Л. Орловым [8] для минерала описываемой в настоящей статье территории.

Изучение типоморфных особенностей алмазов из россыпей и россыпных проявлений СП позволило выделить [1, 17, 22, 26–30] четыре типа источников алмазов: 1 тип первоисточника – кимберлитовый, характерный для богатых кимберлитовых тел фанерозойского возраста, характеризуется резким преобладанием алмазов 1-й разновидности, представленных ламинарными кристаллами октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов и образующих непрерывный ряд, а также присутствием алмазов с оболочкой 4-й разновидности, серых кубов 3-й разновидности, поликристаллических агрегатов 8–9-й разновидностей, а в отдельных месторожде-

ниях (трубка Юбилейная и др.) равномерно окрашенных в желтый цвет кубоидов 2-й разновидности. *II тип первоисточника* – алмазы кимберлитового генезиса, характерные для тел с убогой алмазностью и кимберлитовых жил; он выделяется по преобладанию додекаэдридов с шагренью и полосами пластической деформации «жильного» типа, типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствию бесцветных кубоидов 1-й разновидности. *III тип первоисточника* – алмазы невыясненного генезиса, характерные в основном для россыпей северо-востока СП, коренные источники которых до настоящего времени не обнаружены. Кристаллы этих источников представлены графитизированными ромбододекаэдрами 5-й разновидности, сложенными двойниками и сростками додекаэдридов 7-й разновидности с легким ( $\delta^{13}\text{C} = -23\%$ ) изотопным составом углерода и равномерно окрашенными кубоидами 2-й разновидности с изотопным составом углерода промежуточного ( $\delta^{13}\text{C} = -13,60\%$ ) вида, образующими ассоциацию эбеляхского (нижнеоленского) типа. *IV тип первоисточника* – алмазы взрывных кольцевых структур импактного генезиса, представленные поликристаллами алмаза типа карбонадо с примесью гексагональной модификации углерода – лонсдейлита (якутит).

Полученные данные позволили разделить (рис. 1) Сибирскую алмазоносную провинцию (далее – САП) на четыре субпровинции [28–33]: Центрально-Сибирскую – ЦСАСП (центральная часть платформ) с преобладанием алмазов I типа первоисточника; Лено-Анабарскую – ЛААСП (северо-восток платформы) с превалированием кристаллов III типа первоисточника невыясненного генезиса; Тунгусскую – ТАСП (юго-запад платформы) с преобладанием типичных округлых алмазов «уральского» типа; Алданскую – ААСП (юго-восток платформы) с находками единичных округлых алмазов. Россыпи алмазов и алмазопоявления характерны для первых трех субпровинций, но самое широкое развитие они имеют в ЛААСП. Для этой части СП отмечено существенное влияние на минераге-

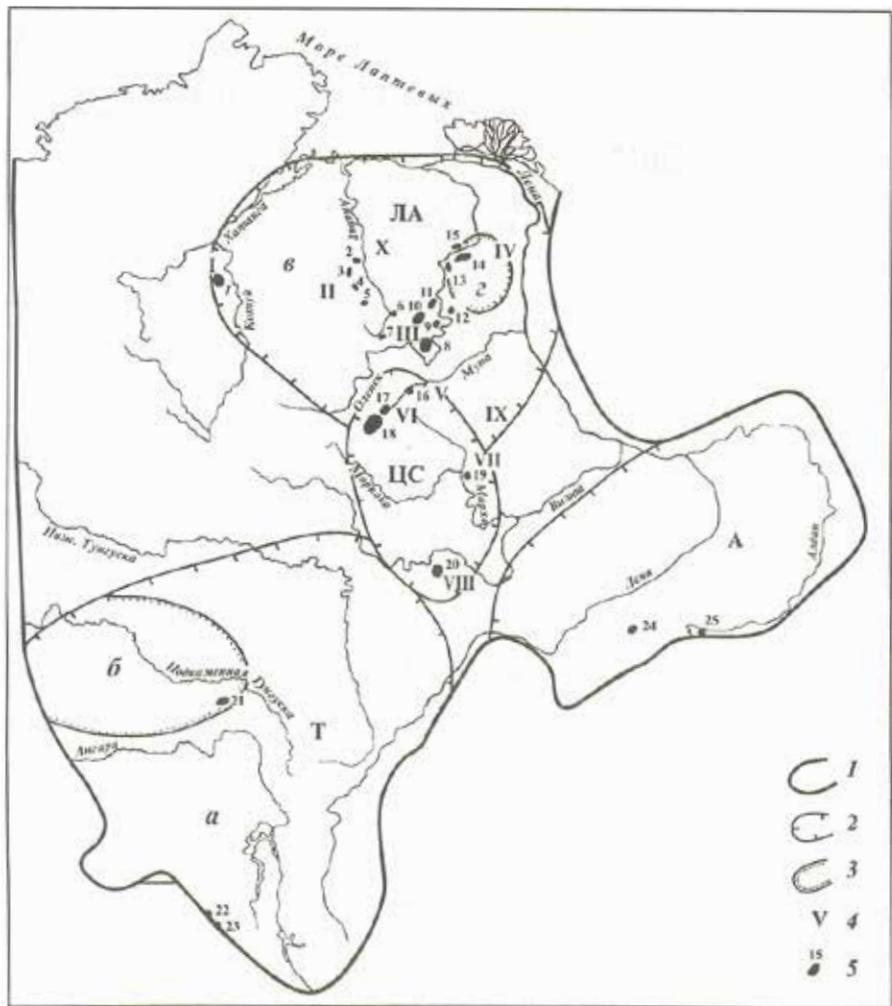


Рисунок 1. Схема районирования по алмазам Сибирской алмазоносной провинции [1].

Условные обозначения: 1-3 – границы: 1 – Сибирской алмазоносной провинции, 2 – субпровинций (ЦС – Центрально-Сибирской, ЛА – Лено-Анабарской, Т – Тунгусской, А – Алданской), 3 – областей (а – Саяно-Тунгусской, б – Байкитской, в – Анабаро-Оленекской, г – Кютюнгдинской); 4 – алмазоносные районы: I – Котуй-Меймечинский, II – Куонапский, III – Среднеоленекский, IV – Нижнеоленекский, V – Верхнемунский, VI – Далдыно-Алакитский, VII – Среднемархинский, VIII – Малоботубинский, IX – Моркокинский, X – Анабарский; 5 – кимберлитовые поля: 1 – Котуй-Меймечинское, 2 – Орто-Яргинское, 3 – Старореченское, 4 – Ары-Мастакское, 5 – Дьюкенское, 6 – Лучаканское, 7 – Куранахское, 8 – Чомурдакское, 9 – Огонер-Юряхское, 10 – Западно-Укуитское, 11 – Восточно-Укуитское, 12 – Верхнемоторчунское, 13 – Мерчимденское, 14 – Верхнемолодинское, 15 – Куойкское, 16 – Верхнемунское, 17 – Далдынское, 18 – Алакит-Мархинское, 19 – Накынское, 20 – Мирнинское, 21 – Чадобецкое, 22, 23 – Ингашиноское, 24 – Верхнеалданское, 25 – Ингилийское.

Figure 1. The zoning scheme on diamonds of the Siberian diamondiferous province [1].

Symbols: 1-3 – boundaries: 1 – the Siberian diamondiferous province, 2 – subprovinces (CS – Central Siberian, LA – Leno-Anabar, T – Tunguska, A – Aldan), 3 – regions (a – Sayan-Tunguska, б – Baikit, в – Anabar-Olenek, г – Kutyungdinskaya); 4 – diamondiferous areas: I – Kotuy-Meimechinsky, II – Kuonapsky, III – Sredneoleneksky, IV – Nizhneoleneksky, V – Verkhnemunsky, VI – Daldyno-Alakitsky, VII – Srednemarkhinsky, VIII – Malobotuobinsky, IX – Morkokinsky, X – Anabar; 5 – kimberlite fields: 1 – Kotuy-Meimechinskoe, 2 – Orto-Yarginskoe, 3 – Starorechenskoe, 4 – Ary-Mastakhskoe, 5 – Dyukenskoe, 6 – Luchakanskoe, 7 – Kurakhskoe, 8 – Chomurdakhskoe, 9 – Ogoner-Yuryakhskoe, 10 – Zapadno-Ukukitskoe, 11 – Vostochno-Ukukitskoe, 12 – Verkhnemotorchunskoe, 13 – Merchimdenskoe, 14 – Verkhnemolodinskoe, 15 – Kuoijskoe, 16 – Verkhnemunskoe, 17 – Daldynskoe, 18 – Alakit-Markhinskoe, 19 – Nakynskoe, 20 – Mirninskoe, 21 – Chadobetskoe, 22, 23 – Ingashinskoe, 24 – Verkhnealdanskoe, 25 – Ingiliiskoe.

нию алмаза *Анабарского кристаллического массива* (далее – АКМ), на отдельной территории которого открыты многочисленные кимберлитовые трубки и разновозрастные алмазоносные россыпи [34–36]. ЛААСП совпадает с полем развития докембрийских и нижнепалеозойских пород Анабарской антеклизы и Оленекского поднятия, обрамленных выходами пермских, триасовых, юрских и меловых отложений. Здесь открыты и разрабатываются богатые

древние и четвертичные россыпи алмазов. В отложениях исследуемой территории преобладают (рис. 2) алмазы [33, 37-39] III типа первоисточника в основном невыясненного генезиса (ассоциация эбеляхского типа). Превалируют здесь кристаллы кубического и тетрагексаэдрического габитусов 2-й разновидности, по Ю. Л. Орлову [8], полукруглые ромбододекаэдры 5-й разновидности, сложно-деформированные двойники и сростки додекаэдров 7-й разновидности, а также округлые алмазы во всех возрастных и генетических типах отложений, начиная с меловых [40-43]. Масштабы проявления россыпной алмазности здесь значительны по сравнению с таковыми других регионов провинции. Россыпи с алмазами I типа первоисточника практически отсутствуют. В Анабаро-Оленекской области, состоящей из трех алмазоносных районов (Анабарский, Средне- и Нижнеоленинский), известно несколько тысяч пунктов с находками алмазов (рис. 3), группирующихся [1, 2, 34-36, 44, 45] в девять россыпных полей. Общим для них является низкое (10-15 %) суммарное содержание кристаллов октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов 1-й, при варьировании количества округлых алмазов, серых ромбододекаэдров 5-й и близких к ним сложных двойников додекаэдров 7-й, а также желто-оранжевых кубоидов 2-й и поликристаллов типа карбонадо (якутит) 11-й разновидностей [15-17, 28]. Их соотношение позволяет выделить ряд минералогических ассоциаций: эбеляхская, маят-верхнебилляхская, куонапская, укукитская и др.

ЛААСП охватывает [5, 10-12, 46-48] северо-восточную часть СП и совпадает с полем развития докембрийских и нижнепалеозойских пород Анабарской антеклизы и Оленекского поднятия, обрамленных выходами пермских, три-

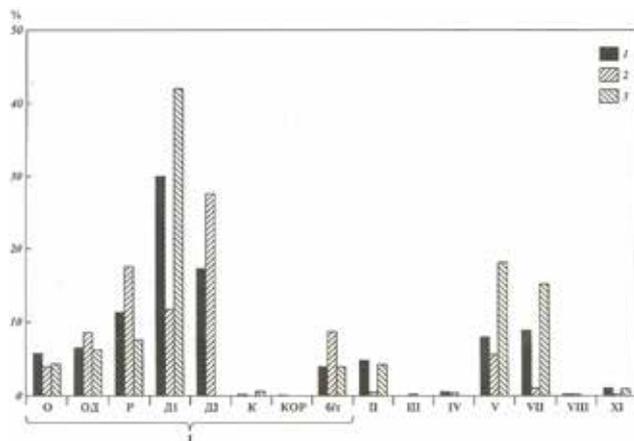


Рисунок 2. Типоморфные особенности алмазов из россыпей Анабарского алмазоносного района [1]. I-IV, VII, VIII, XI - разновидности алмазов по Ю. Л. Орлову (O - октаэдры, OD - переходные формы, P - ламинарные ромбододекаэдры, D1 - додекаэдры скрытослоистые, D2 - додекаэдры с шагренью, K - кубы, KOP - куборомбододекаэдры, б/т - осколки).

Условные обозначения (здесь и рис. 3-5): 1-3 - поля: 1 - Верхнеуджинское, 2 - Масапы-Делиндинское, 3 - Анабаро-Попигаевское.

Figure 2. Typomorphic features of diamonds from placers of the Anabar diamondiferous region [1]. I-IV, VII, VIII, XI - diamond varieties according to Yu. L. Orlov (O - octahedrons, OD - transitional forms, P - laminar rhombododecahedrons, D1 - dodecahedrons with hidden layers, D2 - dodecahedrons with shagreen, K - cubes, KOP - cuborhombododecahedrons, б/т - shards).

Symbols (here and in Figs. 3-5): 1-3 - fields: 1 - Verkhneudzhinskoe, 2 - Maspaky-Delingdinskoe, 3 - Anabar-Popigayskoe.

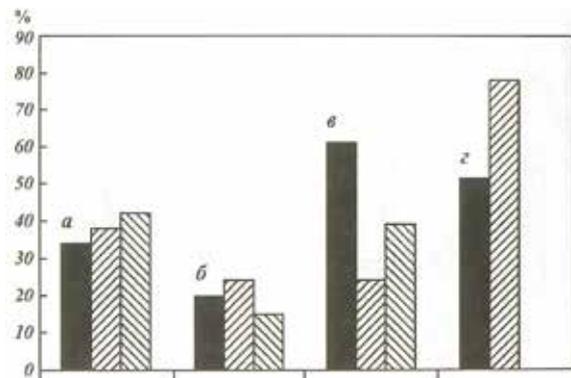


Рисунок 3. Некоторые типоморфные особенности алмазов из россыпей Анабарского алмазоносного района [1]: а - двойники и сростки, б - двойники, в - окрашенные алмазы, г - алмазы с твердыми включениями.

Figure 3. Some typomorphic features of diamonds from placers of the Anabar diamondiferous region [1]: a - twins and intergrowths, б - twin-diamonds, в - coloured diamonds, г - diamonds with solid inclusions.

асовых, юрских и меловых отложений. Здесь находятся современные богатые россыпи алмазов Анабарского района, которые разрабатываются. Алмазы этой субпровинции характеризуются (рис. 2-7) преобладанием индивидов III типа первоисточника в основном невыясненного генезиса (ассоциация эбеляхского типа) с превалированием кристаллов кубического и тетрагексаэдрического габитусов, полукруглых октаэдров, а также округлых алмазов во всех возрастных и генетических типах отложений, начиная с мелового возраста. Масштабы проявления россыпной алмазности значительны по сравнению с таковыми в других районах провинции. Россыпи с алмазами I типа первоисточника здесь практически отсутствуют. Детальное изучение типоморфных особенностей алмазов из каменноугольных, нижнепермских и пространственно связанных с ними современных отложений субпровинции позволило среди огромного по площади россыпного поля северо-востока СП, характеризующегося в основном полигенной ассоциацией алмазов, выделить площадь эллипсовидной формы размером 40x85 км (с севера контуры

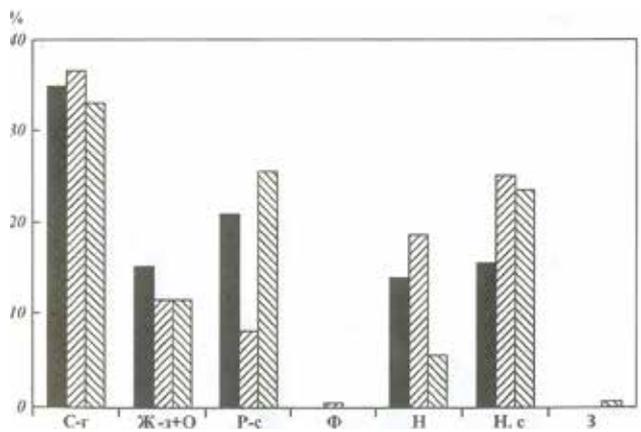


Рисунок 4. Фотолюминесцентные особенности алмазов из россыпей Анабарского алмазоносного района [1]. Цвета люминесценции: C-г - синеголубой, Ж-з + O - желтый, зеленый, оранжевый, P-с - розово-сиреневый, Ф - фиолетовый, Н - неопределенный, Н.с - несветящиеся алмазы, 3 - с зональным свечением.

Figure 4. Photoluminescent features of diamonds from placers of the Anabar diamondiferous region [1]. Luminescence colours: C-г - medium-blue, Ж-з + O - yellow, green, orange, P-с - pink-lilac, Ф - violet, Н - not determined, Н.с - non-luminescent, 3 - zonally luminescent diamonds.

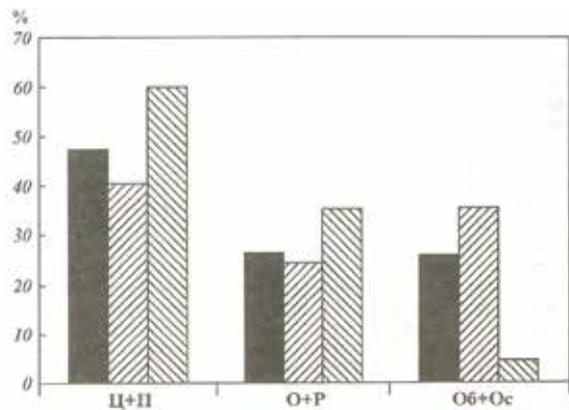


Рисунок 5. Сохранность (целостность) алмазов из россыпей Анабарского алмазоносного района [1]: Ц+П – целые и поврежденные кристаллы, O+P – обломанные и расколотые, Об+Ос – обломки и осколки.

Figure 5. Preservation (integrity) of diamonds from the placers of the Anabar diamondiferous region [1]: Ц+П - whole and damaged, O+P - broken and chipped crystals, Об+Ос - fragments and chips.



Рисунок 6. Алмазы из русловых отложений нижнего течения р. Эбелях (Нижнеэбеляхское поле).

Figure 6. Diamonds from channel deposits of the lower reaches of the Ebelyakh River (Lower Ebelyakh field).

ее ограничиваются восточным бортом Кютюндинского грабена с простираем на юго-запад до междуречья Молодо-Далдын), в россыпях которой преобладают алмазы I типа. Все это дало возможность разделить ЛААСП на две алмазоносные области – Кютюндинскую и Анабаро-Оленекскую [5–7, 18–20, 22–25, 49], заметно различающиеся как по истории геологического развития, так и по типоморфным особенностям алмазов. Своеобразие типоморфных особенностей алмазов из нижнекаменноугольных отложений *Кютюндинской области* заключается в преобладании (до 90 %) кристаллов кимберлитового генезиса (I тип) и присутствии (около 10 %) округлых алмазов при полном отсутствии характерных для россыпей северо-востока СП кристаллов III типа. Исходя из такой корреляции между морфологией алмазов и их содержанием в кимберлитах, можно предположить наличие в данном районе богатых кимберлитовых тел среднепалеозой-

ского возраста [33, 50–52]. По результатам комплексных исследований здесь была выделена ассоциация алмазов кютюндинского типа. Доминирующими для нее являются кристаллы октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов (более 50 %) при заметном содержании полуокруглых ромбододекаэдров с блоковой скульптурой, а также алмазов с оболочкой. Округлые алмазы «уральского» типа встречаются в незначительном количестве, а кристаллы III типа и карбонадо с примесью лонсдейлита импактного типа (якутиты) не встречены в этой области вовсе [22–27, 34–36, 41–43, 53]. Анабаро-Оленекская область состоит из трех алмазоносных районов: Анабарский, Средне- и Нижнеоленекский. Здесь установлены тысячи пунктов с находками алмазов, группирующихся в россыпные поля: Нижнеэбеляхское, Майат-Уджинское, Верхнеуджинское, Анабаро-Полигайское, Куонапское (Анабарское), Беенчимэ-Куойское и др. Общим для них является низкое (10–15 %) суммарное со-

держание кристаллов октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов при переменных значениях округлых алмазов, серых ромбододекаэдров и близких к ним сложных двойников додекаэдридов, а также желто-оранжевых кубоидов и поликристаллов типа карбонадо (якутит). Их различное соотношение образует несколько минералогических ассоциаций: эбеляхская, майат-верхнебилляхская, куонапская, укукитская и др. Алмазы из россыпей Анабаро-Оленекской области сравнительно однообразны [3, 5, 14, 15, 22–25, 31–33, 37–39] и близки к кристаллам из окаймляющих с востока и севера Анабарскую антеклизу вторичных коллекторов среднетриасового и ранневожского возраста (кряжи Чекановского и Прончищева,

хребет Хараулах и др.). Для них характерно низкое (10–15 %) содержание алмазов I типа первоисточника при несколько различном в отдаленных районах соотношении округлых индивидов «уральского» типа октаэдридов, сложное деформированных двойников и сростков додекаэдридов с облегченным изотопным составом углерода, желто-оранжевых кубоидов с промежуточным изотопным составом углерода, отсутствующих в известных коренных месторождениях провинции. В ряде регионов этой области присутствуют поликристаллы типа карбонадо [6, 7, 9, 17, 28–30]. Общим для алмазов данной области является повышенный механический износ, увеличивающийся от краевых частей Анабарской антеклизы в сторону АКМ, что совпадает с направлением трансгрессии при формировании алмазоносных отложений. Алмазы из разновозрастных вторичных коллекторов раннемелового и неоген-четвертичного возрастов карстовых впадин в пределах



Рисунок 7. Алмазы из русловых отложений истоков р. Эбелях (Верхнеэбеляхское поле).  
Figure 7. Diamonds from channel deposits of the Ebelyakh River headwaters (Upper Ebelyakh field).

Анабарского района практически не отличаются от таковых из современных отложений данного региона (при сопоставлении кристаллов одной и той же крупности). Крупность алмазов современных россыпей северо-востока СП заметно убывает в направлении от областей поднятий к краевым частям Анабарской антеклизы, что также следует рассматривать как результат неоднократного перемыва и переотложения во вторичных коллекторах различного возраста на пути от коренных источников к местам их современного захоронения [1, 2, 18–21, 33, 44, 45, 54]. Алмазы из известных трубок северо-востока СП (Верхнемоторчунское, Куойское, Чомурдахское, Лучаканское, Куранахское и другие кимберлитовые поля) по типоморфным особенностям отличаются от кристаллов из россыпей данного региона, а их присутствие в значительном количестве в аллювии обнаруживается только в редких случаях на расстоянии первых километров от размываемой трубки. Очень специфическими являются алмазы из многочисленных россыпей Приленского алмазоносного района (рис. 8–12), в котором выделены и исследованы [5–7, 9, 11–13, 40] Нижнеприленское (Усункинское), Среднеприленское (Лено-Сюнгюдинское), Верхнеприленское (Хахчанское), Кютюнгинское и Молодо-Далдынское поля. В свою очередь, в трубке Дьянга (Куойское поле) преобладают додекаэдровиды с шагренью, полосами пластической деформации. Однако, в отличие от других бедных по содержанию алмазов трубок, в ней отмечаются кристаллы со сплошными кавернами и с резко преобладающей эклогитовой ассоциацией (гранат оранжевый+омфацит) твердых включений. В трубке Малокуонапская (Куранахское поле) выделены два рудных столба с заметно различающейся алмазоносностью. В порфи-

ровых кимберлитах северного рудного столба с повышенной алмазоносностью доминируют кристаллы октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов во всех классах крупности. Их содержание повышается с увеличением крупности камней, а кристаллы размером  $-4+2$  и  $-8+4$  мм представлены октаэдрами при полном отсутствии типичных округлых алмазов «уральского» типа. Для кимберлитовой брекчии южного рудного столба с пониженной алмазоносностью характерно повышенное содержание округлых алмазов, которое заметно увеличивается с уменьшением крупности кристаллов.

Муно-Тюнгский алмазоносный район располагается в юго-восточной части Анабарской антеклизы. В его пределах выделяется [2, 5, 22–24, 27, 44, 45, 54] три россыпных поля (Среднемуновское, Верхнетюнгское и Верхнемуновское), заметно различающиеся по типоморфным особенностям алмазов (рис. 5 и 6). Всего по району изучены кристаллы 15 участков. Среднемуновское россыпное поле характеризуется резким преобладанием алмазов 1-й разновидности (92,8 %), представленных преимущественно типичными округлыми кристаллами «уральского» («бразильского») типа (37,9 %) и додекаэдроидами с шагренью и полосами пластической деформации. Соотношение двух групп округлых алмазов обратное, по сравнению с кимберлитовыми

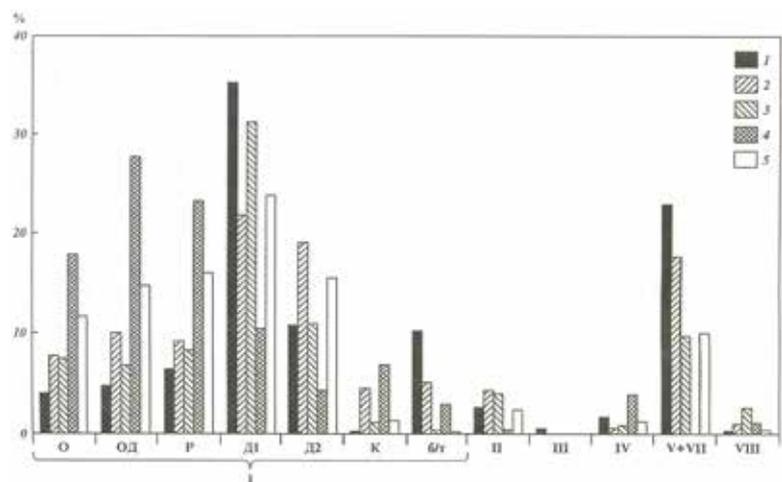


Рисунок 8. Типоморфные особенности алмазов из россыпей Приленского алмазоносного района [1]. I–IV, V+VII, VIII – разновидности алмазов по Ю. Л. Орлову (O – октаэдры, OD – переходные формы, P – ламинарные ромбододекаэдры, D1 – додекаэдры скрытослоистые, D2 – додекаэдры с шагренью, K – кубы, б/т – осколки).  
Условные обозначения (здесь и рис. 9–11): 1–5 – поля: 1 – Нижнеприленское, 2 – Среднеприленское, 3 – Верхнеприленское, 4 – Кютюнгинское, 5 – Молодо-Далдынское.  
Figure 8. Typomorphic features of diamonds from placers of the Prilensky diamondiferous area [1]. I–IV, V+VII, VIII – diamond varieties according to Yu. L. Orlov (O – octahedrons, OD – transitional forms, P – laminar rhombododecahedrons, D1 – dodecahedrons with hidden layers, D2 – dodecahedrons with shagreen, K – cubes, б/т – chips).  
Symbols (here and in Figs. 9–11): 1–3 – fields: 1 – Nizhneprilenskoye, 2 – Sredneprilenskoye, 3 – Verkhneprilenskoye, 4 – Kutyungdinskoye, 5 – Molodo-Daldyngskoye.

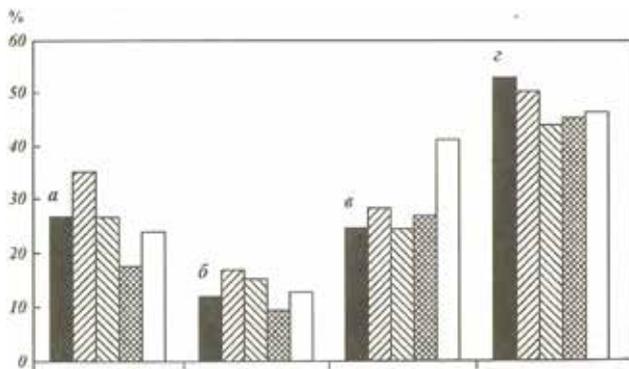


Рисунок 9. Некоторые типоморфные особенности алмазов из россыпей Приленского алмазоносного района [1]: а - двойники и сростки, б - двойники, в - окрашенные алмазы, г - алмазы с твердыми включениями.  
Figure 9. Some typomorphic features of diamonds from placers of the Prilensky diamondiferous area [1]: а - twins and aggregates, б - twins, в - coloured diamonds, г - diamonds with solid inclusions.

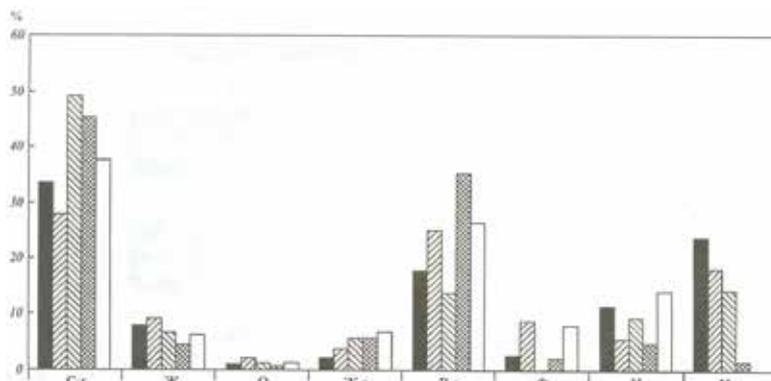


Рисунок 10. Фотолюминесцентные особенности алмазов из россыпей Приленского алмазоносного района [1]. Цвета люминесценции: С-г - сине-голубой, Ж - желтый, О - оранжевый, Ж-з - желто-зеленый, зеленый, P-с - розово-сиреневый, Ф - фиолетовый, Н - неопределенный, Н.с - не светящиеся алмазы.  
Figure 10. Photoluminescent features of diamonds from the placers of the Prilensky diamondiferous area [1]. Luminescence colours: С-г - medium-blue, Ж - yellow, О - orange, Ж-з - yellow-green, green, P-с - pink-lilac, Ф - violet, Н - not determined, Н.с - non-luminescent diamonds.

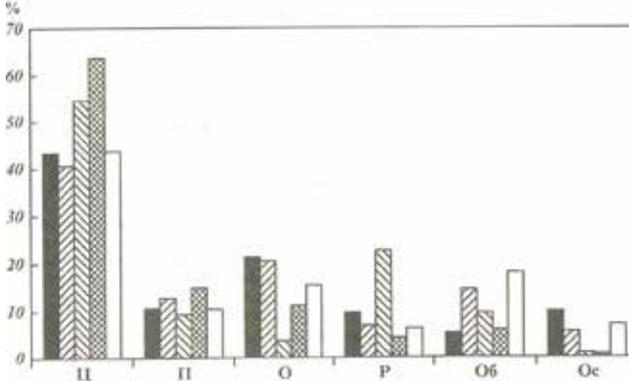


Рисунок 11. Сохранность (целостность) алмазов из россыпей Приленского алмазоносного района [1]. Ц - целые кристаллы, П - поврежденные, О - обломанные, P - расколотые, Об - обломки, Ос - осколки.  
Figure 11. Preservation (integrity) of diamonds from the placers of the Prilensky diamondiferous area [1]. Ц - whole crystals, П - damaged, О - broken, P - chipped, Об - fragments, Ос - chips.

телами Верхнемунского поля и россыпью Уулаах-Муна. Общее содержание ламинарных кристаллов октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов сравнительно невысокое (27,9 %). Низким

является и содержание типоморфных для россыпей северо-востока СП алмазов 5 и 7-й (3,7 %), а также 2-й (3,2 %) разновидностей. Кристаллы характеризуются значительным содержанием двойников и сростков (33,8 %), а также минералов с признаками природного травления (59,6 %). Алмазы в основном прозрачные, при низком содержании окрашенных (34,8 %), а также железненных (40,8 %) камней. По фотолюминесцентным особенностям преобладают алмазы с сине-голубым свечением (39,1 %). Большинство индивидов содержат твердые включения (71,3 %). Алмазы характеризуются высокой степенью сохранности и значительной трещиноватостью. Общее содержание алмазов с механическим износом истирания является сравнительно невысокое (8,9 %). Кристаллы преимущественно средне- и высокоазотные. В целом по типоморфным особенностям алмазы Среднемунского поля близки к кристаллам из современных россыпей Верхне- и Среднеприленского алмазоносных полей, а также к индивидам из древних вторичных коллекторов верхнеюрского (нижневолжского) возраста, опробованных на междуречье рек Молодо-Сюнгюдэ-Лена, и отличаются от кимберлитовых тел Верхнемунского поля и россыпи р. Уулаах-Муна, сформированной в основном за счет размыва этих трубок.

## Заключение

Таким образом, алмазы ЛААСП характеризуются преобладанием минералов из III типа первоисточника, в основном невыясненного генезиса (ассоциация эбеляхского типа) с превалированием кристаллов кубического и тетрагексаэдрического габитусов, полукруглых октаэдров, а также типичных округлых алмазов во всех генетических типах отложений как современного, так и более древнего возрастов. Масштабы проявления россыпной продуктивности являются намного большими, чем в других районах Якутской алмазоносной провинции. Особенно благоприятный для россыпеобразования район – Анабарский (Эбеляхский), где выделяются две площади (Нижнеэбеляхская и Майат-Уджинская), отличающиеся по соотношению алмазов из III типа первоисточника. Россыпи алмазов I типа первоисточника установлены в основном в Кютюнгинском и Молодо-Далдынском алмазоносных полях. В пределах Приленской алмазоносной области по типоморфным особенностям алмазов различаются две подобласти: 1) Кютюнгинское и Молодо-Далдынское поля; 2) Средне-, Верхне- и Нижнеприленские поля. Для прогнозно-поисковых целей очень важным является установление в нижнекаменноугольных отложениях в доминирующем виде (иногда до 90 %) кристаллов алмаза I типа (кимберлитового генезиса) нередко при отсутствии алмазов III типа первоисточника. Кимберлитовый тип первоисточника алмазов этой территории характеризуется преобладанием кристаллов октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов при за-



Рисунок 12. Алмазы из отложений россыпи Усунку-Юрэх (Приленский алмазоносный район).  
Figure 12. Diamonds from the Usunku-Yurekh placer (Prilensky diamond-bearing region).

метном содержании ромбододекаэдров с блоковой скульптурой 1-й разновидности, а также алмазов с оболочкой 4-й разновидности. Существование зависимости между морфологией алмазов и их содержанием в кимберлитовых диатремах СП позволяет предположить наличие в данном районе богатых кимберлитовых тел среднепалеозойского (докаменноугольного) возраста со своеобразным типоморфизмом алмазов. Однако на значительной территории Кютюнгинской области отмечены россыпи, возникшие за счет многократного перемыва и переотложения вторичных коллекторов в отдельные периоды мезозойской истории россыпеобразования. В таких россыпях преобладают алмазы нижнеленской минералогической ассоциации невыясненного генезиса, в которых в свою очередь преобладают кристаллы III типа первоисточника, а также округлые алмазы, что сближает их с алмазами из некоторых россыпей Анабарского (Эбеляхского) района.

В пределах большей части ЛААСП в процессе геолого-поисковых работ открыты тысячи пунктов с находками алмазов, группирующихся в десятки россыпных полей в пределах четырех алмазоносных районов (Анабарского, Среднеоленинского, Нижнеоленинского и Муно-Тюнгского). Общим для них является низкое (10-15 %) суммарное содержание кристаллов октаэдрического и переходного от него к ромбододекаэдрическому габитусов при переменных значениях типичных округлых алмазов 1-й разновидности, серых ромбододекаэдров и близких к ним сложных додекаэдроидов 5 и 7-й разновидностей, а также желто-оранжевых кубоидов 2-й разновидности и поликристаллов типа карбонадо с лондейлитом (якутит) 11-й разновидности. Их различное соотношение образует несколько минералогических ассоциаций (эбеляхскую, куонапскую, укукитскую и др.), что следует учитывать при проведении здесь и на смежных территориях прогнозно-поисковых работ на алмазы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Зинчук, Н. Н. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы / Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль. – Москва : Недра, 2003. – 603 с.
2. Зинчук, Н. Н. Основные аспекты разномасштабного районирования территорий по типоморфным особенностям алмазов (на примере Сибирской платформы) / Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль, Е. И. Борис // Геология рудных месторождений. – 1999. – Т. 41, вып. 16. – № 6. – С. 516–526.
3. Афанасьев, В. П. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) / В. П. Афанасьев, А. П. Елисеев, В. А. Надолгинный, Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2000. – № 5. – С. 79–97.
4. Афанасьев, В. П. Минерогения древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук // Геология и геофизика. – 1987. – № 1. – С. 90–96.
5. Афанасьев, В. П. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль // Доклады Академии наук. – 1998. – Т. 361, № 3. – С. 366–369.
6. Афанасьев, В. П. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук, А. М. Логинова // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
7. Бардухинов, Л. Д. Алмазы из древних осадочных толщ и их поставщики (на примере Якутской кимберлитовой провинции) / Л. Д. Бардухинов, Н. Н. Зинчук // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 65–86.
8. Орлов, Ю. Л. Минералогия алмаза. Издание 2-е / Ю. Л. Орлов. – Москва : Наука, 1984. – 264 с.
9. Василенко, В. Б. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, Л. Г. Кузнецова // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2000. – № 3 (9). – С. 37–55.
10. Горшков, А. И. Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки / А. И. Горшков, Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, В. Г. Шлыков, А. П. Жухлистов [и др.] // Доклады РАН. – 2002. – Т. 382, № 3. – С. 374–378.
11. Егоров, К. Н. Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы / К. Н. Егоров, Н. Н. Зинчук, С. Г. Мишенин, В. П. Серов, А. П. Секерин [и др.] // Сб.: Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной

- компания «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». – Мирный : МГТ, 2003. – С. 50–84.
12. Зинчук, Н. Н. Особенности литолого-минералогических исследований при алмазопоисковых работах на Сибирской платформе / Н. Н. Зинчук // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 2018. – Т. 93, вып. 1. – С. 91–102.
  13. Зинчук, Н. Н. Коры выветривания как основные поставщики местного материала в мезозойские алмазоносные россыпи / Н. Н. Зинчук // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2018. – № 2. – С. 24–31.
  14. Зинчук, Н. Н. Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Руды и металлы. – 2022. – № 1. – С. 77–93.
  15. Зинчук, Н. Н. О специфике докембрийских источников алмазов в россыпях / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Вестник Пермского ун-та. Геология. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 149–166.
  16. Зинчук, Н. Н. Алмазы из полупромышленных кимберлитов / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2022. – № 2. – С. 32–45.
  17. Зинчук, Н. Н. Структурно-формационное и минералогическое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их переотложения в алмазоносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) / Н. Н. Зинчук, Е. И. Борис, Ю. Б. Стегницкий // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 7. – С. 950–964.
  18. Котельников, Д. Д. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдяных минералов / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1996. – № 1. – С. 53–61.
  19. Котельников, Д. Д. Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1997. – № 2. – С. 53–63.
  20. Котельников, Д. Д. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2001. – № 12. – С. 45–51.
  21. Котельников, Д. Д. Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратиферу / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2003. – № 2. – С. 57–68.
  22. Зинчук, Н. Н. Кремнистые минералы в кимберлитах / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2022. – № 4. – С. 38–52.
  23. Зинчук, Н. Н. Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2022. – № 4. – С. 34–49.
  24. Зинчук, Н. Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2023. – № 1. – С. 42–55.
  25. Зинчук, Н. Н. Литолого-стратиграфические исследования при алмазопоисковых работах / Н. Н. Зинчук // Вестник СВФУ. Науки о Земле. – 2023. – № 1 (29). – С. 5–28.
  26. Зинчук, Н. Н. Роль петролого-минералогических исследований при оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 59–70.
  27. Зинчук, Н. Н. Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ / Н. Н. Зинчук // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 100–120.
  28. Зинчук, Н. Н. Особенности минерогенеза алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы) / Н. Н. Зинчук, Е. И. Борис, Ю. Т. Яныгин. – Москва : Мирнинская городская типография, 2004. – 172 с.
  29. Зинчук, Н. Н. Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов / Н. Н. Зинчук, М. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, В. Г. Шлыков, А. П. Жухликов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2002. – № 1. – С. 47–60.
  30. Зинчук, Н. Н. Стратегия ведения и результаты алмазопоисковых работ / Н. Н. Зинчук, В. М. Зуев, В. И. Коптиль, С. Д. Чёрный // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
  31. Зинчук, Н. Н. Особенности кальцита из кимберлитовых пород / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2023. – № 2. – С. 28–43.
  32. Зинчук, Н. Н. О геолого-поисковых типах кимберлитовых трубок / Н. Н. Зинчук // Известия Коми НЦ УрО РАН. Науки о Земле. – 2023. – № 2 (60). – С. 43–56.
  33. Зинчук, Н. Н. О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Руды и металлы. – 2021. – № 3. – С. 59–75.
  34. Grachanov, S. A. The age of predictable primary diamond sources in the north-eastern Siberian platform / S. A. Grachanov, N. N. Zinchuk, N. V. Sobolev // Doklady Earth Sciences. – 2015. – V. 465. – № 2. – P. 1297–1301.
  35. Serov, I. V. Mantle sources of the kimberlite volcanism of the Siberian platform / S. I. Serov, V. K. Garanin, N. N. Zinchuk, A. Ya. Zinchuk, A. Ya. Rotman // Petrology. – 2001. – V. 9. – № 6. – P. 576–588.
  36. Vasilenko, V. B. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry / V. B. Vasilenko, L. G. Kuznetsova, N. I. Volkova, N. N. Zinchuk, V. O. Krasavchikov // Journal of Geochemical Exploration. – 2002. – V. 76. – № 2. – P. 93–112.
  37. Зинчук, Н. Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдяных кимберлитов / Н. Н. Зинчук // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 32–50.
  38. Зинчук, Н. Н. Сульфаты в кимберлитовых породах / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2023. – № 2. – С. 56–72.

39. Зинчук, Н. Н. Об особенностях флюидных и гидротермальных включений в некоторых минералах кимберлитов / Н. Н. Зинчук // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. – Вып. 26. – Пермь : ПГНУ, 2023. – С. 45–64.
40. Зинчук, Н. Н. Геолого-технологические особенности поисков и разработки кимберлитов / Н. Н. Зинчук // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 10. – С. 6–15.
41. Зинчук, Н. Н. Об использовании гипергенных образований кимберлитов при алмазопромышленных работах / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2020. – № 2. – С. 62–80.
42. Зинчук, Н. Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2021. – № 3. – С. 50–59.
43. Зинчук, Н. Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
44. Зинчук, Н. Н. Алмазы из современных россыпей Сибирской платформы. Статья 2. Лено-Анабарская субпровинция / Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 2017. – Т. 92, вып. 2. – С. 65–82.
45. Зинчук, Н. Н. Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки / Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, А. И. Горшков // Литология и полезные ископаемые. – 2003. – № 1. – С. 87–96.
46. Зинчук, Н. Н. Апокимберлитовые породы / Н. Н. Зинчук, Ю. М. Мельник, В. П. Серенко // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
47. Зинчук, Н. Н. Историческая минерагения: в 3-х томах: Т. 1. Введение в историческую минерагению / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев. – Воронеж : ВГУ, 2005. – 590 с.
48. Зинчук, Н. Н. Историческая минерагения: в 3-х томах: Т. 2. Историческая минерагения древних платформ / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев. – Воронеж : ВГУ, 2007. – 570 с.
49. Зинчук, Н. Н. Историческая минерагения: в 3-х томах: Т. 3. Историческая минерагения подвижных суперполюсов / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев. – Воронеж : ВГУ, 2008. – 622 с.
50. Савко, А. Д. Эпохи мощного корообразования в истории Земли / А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев, Н. Н. Зинчук. – Воронеж : ВГУ, 1999. – 102 с.
51. Толстов, А. В. Вклад Алмазной лаборатории ЦНИГРИ в научную кладовую Якутии / А. В. Толстов, Н. Н. Зинчук // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 25–35.
52. Харьков, А. Д. Петрохимия кимберлитов / А. Д. Харьков, В. В. Зуенко, Н. Н. Зинчук, А. И. Крючков, А. В. Уханов, М. М. Богатых. – Москва : Недра, 1991. – 304 с.
53. Хитров, В. Г. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава / В. Г. Хитров, Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников // Доклады АН СССР. – 1987. – Т. 296, № 5. – С. 1228–1233.
54. Зинчук, Н. Н. Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания / Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, В. Н. Соколов // Геология и геофизика. – 1982. – № 2. – С. 42–53.

## References

- Zinchuk, N. N. Tipomorfizmalmazov Sibirskoj platformy [Typomorphism of diamonds of the Siberian platform] / N. N. Zinchuk, V. I. Koptil. – Moscow : Nedra, 2003. – 603 p.
- Zinchuk, N. N. Osnovnye aspekty raznomasshtabnogo rajonirovaniya territorij po tipomorfnyim osobennostyamalmazov (na primere Sibirskoj platformy) [Main aspects of multi-scale zoning of territories by typomorphic features of diamonds (on the example of the Siberian platform)] / N. N. Zinchuk, V. I. Koptil, E. I. Boris // Geologiya rudnyh mestorozhdenij [Geology of Ore Deposits]. – 1999. – Vol. 41, Issue 16. – № 6. – P. 516–526.
- Afanasyev, V. P. Mineralogiya i nekotorye voprosy genезisaalmazov V i VII raznovidnostej (po klassifikacii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some questions on the genesis of diamonds of V and VII varieties (according to the classification of Yu. L. Orlov)] / V. P. Afanasyev, A. P. Eliseev, B. A. Nadolnii, N. N. Zinchuk, V. I. Koptil [et al.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geologia [Bulletin of the Voronezh State University. Geology]. – 2000. – № 5. – P. 79–97.
- Afanasyev, V. P. Minerageniya drevnih rossypejalmazov vostochnogo borta Tunguskoj sineklizy [Minerageny of ancient placers of diamonds of the eastern side of the Tunguska syncline] / V. P. Afanasyev, N. N. Zinchuk // Geologia i geofizika [Geology and Geophysics]. – 1987. – № 1. – P. 90–96.
- Afanasyev, V. P. Poligenezalmazov v svyazi s problemoj korennyh rossypej severo-vostoka Sibirskoj platformy [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers of the North-East of the Siberian platform] / V. P. Afanasiev, N. N. Zinchuk, V. I. Koptil // Reports of the Academy of Sciences. – 1998. – V. 361, № 3. – P. 366–369.
- Afanasyev, V. P. Osobennosti raspredeleniya rossypnyhalmazov, svyazannyh s dokembrijskimi istochnikami [Particularities of distribution of placer diamonds associated with Precambrian sources] / V. P. Afanasyev, N. N. Zinchuk, A. M. Loginova // Zapiski Rossijskogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the Russian Mineralogical Society]. – 2009. – V. 138, № 2. – P. 1–13.
- Bardukhinov, L. D. Almazy iz drevnih osadochnyh tolshch i ih postavshchiki (na primere Yakutskoj kimberlitovoj provincii) [Diamonds from ancient sedimentary strata and their suppliers (on the example of the Yakutsk kimberlite province)] / L. D. Bardukhinov, N. N. Zinchuk // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2022. – № 2. – P. 65–86.
- Orlov, Yu. L. Mineralogiya almaza [Mineralogy of diamond] / Yu. L. Orlov. – 2nd ed. – Moscow : Nauka, 1984. – 264 p.
- Vasilenko, V. B. Geodinamicheskij kontrol razmeshcheniya kimberlitovyh polej centralnoj i severnoj chastej Yakutskoj kimberlitovoj provincii (petrohimicheskij aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in

- the central and northern parts of the Yakutsk kimberlite province (petro-chemical aspect)] / V. B. Vasilenko, N. N. Zinchuk, L. G. Kuznetsova // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2000. – № 3 (9). – P. 37–55.
10. Gorshkov, A. I. New ordered mixed-layer lizardite-saponite mineral from kimberlites of South Africa / A. I. Gorshkov, N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, V. G. Shlykov, A. P. Zhukhlistov [et al.] // Reports of the Russian Academy of Sciences. – 2002. – V. 382, № 3. – P. 374–378.
  11. Egorov, K. N. Novyj uporyadochennyj smeshanoslojnyj mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoj Afriki [Prospects of primary and placer diamond contents in the south-western part of the Siberian platform] / K. N. Egorov, N. N. Zinchuk, S. G. Mishenin, B. P. Serov, A. P. Sekerin [et al.] // Collection : Geologicheskie aspekty mineralno-syrevoj bazy Akcionernoj kompanii "ALROSA" : sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya [Geological aspects of the mineral resource base of the Joint Stock Company ALROSA : current state, perspectives, solutions]. Additional materials on the results of the regional scientific-practical conference "Actual Problems of the Geological Industry of JSC ALROSA and Methodological Support for their Solutions" dedicated to the 35th anniversary of the YaNIGP CNIGRI JSC ALROSA. – Mirny : MGT. – 2003. – P. 50–84.
  12. Zinchuk, N. N. Osobennosti litologo-mineralogicheskikh issledovanij prialmazopiskovykh rabotah na Sibirskoj platforme [Particularities of lithological and mineralogical studies at diamond prospecting works in the Siberian platform] / N. N. Zinchuk // Bulletin of MOIP. Geological Department. – 2018. – Vol. 93, Iss. 1. – P. 91–102.
  13. Zinchuk, N. N. Kory vyvetrivaniya kak osnovnye postavshchiki mestnogo materiala v mezozojskie almazonosnye rossypi [Weathering crusts as the main suppliers of local material into the Mesozoic diamondiferous placers] / N. N. Zinchuk // Izvestia VUZov. Geologia i razvedka [Proceedings of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration]. – 2018. – № 2. – P. 24–31.
  14. Zinchuk, N. N. Almazy iz nizkoproduktivnykh kimberlitov [Diamonds from low-productive kimberlites] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2022. – № 1. – P. 77–93.
  15. Zinchuk, N. N. O specifike dokembrijskikh istochnikov almazov v rossypanyah [About the specificity of Precambrian sources of diamonds in placers] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Bulletin of the Perm University. Geology. – 2022. – V. 21, № 2. – P. 149–166.
  16. Zinchuk, N. N. Almazy iz polupromyshlennykh kimberlitov [Diamonds from semi-industrial kimberlites] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2022. – № 2. – P. 32–45.
  17. Zinchuk, N. N. Strukturno-formacionnoe i mineragenicheskoe rajonirovanie territorij razvitiya pogrebennykh kor vyvetrivaniya i produktov ih pereotlozheniya v almazonosnykh regionah (na primere Yakutskoj kimberlitovoj provincii) [Structural-formational and minerogenetic zoning of development territories of buried weathering crusts and products of their re-deposition in diamondiferous regions (on the example of the Yakutian kimberlite province)] / N. N. Zinchuk, E. I. Boris, Yu. B. Stegnitsky // Geologia i geofizika [Geology and Geophysics]. – 1998. – V. 39, № 7. – P. 950–964.
  18. Kotelnikov, D. D. Tipomorfnye osobennosti i paleogeograficheskoe znachenie slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of micaceous minerals] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Proceedings of Higher Educational Institutions Geology and Exploration. – 1996. – № 1. – P. 53–61.
  19. Kotelnikov, D. D. Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyah razlichnykh osadochnykh formacij [Particularities of clay minerals in deposits of different sedimentary formations] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Proceedings of Higher Educational Institutions Geology and Exploration. – 1997. – № 2. – P. 53–63.
  20. Kotelnikov, D. D. Usloviya nakopleniya i postsedimentacionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoj kory [Conditions of accumulation and post-sedimentation transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the Earth's crust] / D. D. Kotelnikov, H. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2001. – № 12. – P. 45–51.
  21. Kotelnikov, D. D. Ob anomalii obshchej skhemy preobrazovaniya razbuhayushchih glinistykh mineralov pri pogruzenii soderzhashchih ih otlozhenij v stratisferu [On the anomaly of the general transformation scheme of swelling clay minerals when the sediments containing them enter the stratisphere] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2003. – № 2. – P. 57–68.
  22. Zinchuk, N. N. Kremnistye mineraly v kimberlitah [Siliceous minerals in kimberlites] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2022. – № 4. – P. 38–52.
  23. Zinchuk, N. N. Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovykh porod [Features of petrographic study of kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. – 2022. – № 4. – P. 34–49.
  24. Zinchuk, N. N. O geohimicheskikh osobennostyakh raznovozrastnykh obrazovanij almazoperspektivnykh territorij [About geochemical particularities of different-age formations on diamond-perspective territories] / N. N. Zinchuk // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. – 2023. – № 1. – P. 42–55.
  25. Zinchuk, N. N. Litologo-stratigraficheskie issledovaniya prialmazopiskovykh rabotah [Lithological and stratigraphic studies during diamond-prospecting works] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the North-Eastern Federal University in Yakutsk. Earth Sciences. – 2023. – № 1 (29). – P. 5–28.
  26. Zinchuk, N. N. Rol petrologo-mineralogicheskikh issledovanij pri ocenke potencialnoj almazonosnosti kimberlitov [Role of petrological and mineralogical studies for the assessment of potential diamond content of kimberlites] / N. N. Zinchuk // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. – 2022. – № 1. – P. 59–70.
  27. Zinchuk, N. N. Kory vyvetrivaniya i ih rol v formirovanii postkimberlitovykh osadochnykh tolshch [Weathering crusts and their role in the formation of post-kimberlite

- sedimentary strata] / N. N. Zinchuk // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2022. – № 2. – P. 100–120.
28. Zinchuk, N. N. Osobennosti mineragenii almaza v drevnih osadochnykh tolshchah (na primere verhnepaleozojskikh otlozhenij Sibirskoj platformy) [Features of diamond minerageny in ancient sedimentary strata (on the example of Upper Paleozoic sediments of the Siberian platform)] / N. N. Zinchuk, E. I. Boris, Yu. T. Yanygin. – Moscow : Mirny City Printing House. – 2004. – 172 p.
  29. Zinchuk, N. N. Strukturno-kristallohimicheskie preobrazovaniya sloistykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennogo izmeneniya kimberlitov [Structural-crystallochemical transformations of layered minerals at different stages of hypergenic alteration of kimberlites] / N. N. Zinchuk, M. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, V. G. Shlykov, A. P. Zhukhlistov // Proceedings of Higher Educational Institutions Geology and Exploration. – 2002. – № 1. – P. 47–60.
  30. Zinchuk, N. N. Strategiya vedeniya i rezultaty almazoposkovykh rabot [Conducting policy and results of diamond prospecting works] / N. N. Zinchuk, V. M. Zuev, V. I. Koptil, S. D. Cherny // Gornyy Vestnik [Mountain Bulletin]. – 1997. – № 3. – P. 53–57.
  31. Zinchuk, N. N. Osobennosti kalcita iz kimberlitovykh porod [Features of calcite from kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2023. – № 2. – P. 28–43.
  32. Zinchuk, N. N. O geologo-poiskovykh tipakh kimberlitovykh trubok [About geological and prospecting types of kimberlite pipes] / N. N. Zinchuk // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2023. – № 2 (60). – P. 43–56.
  33. Zinchuk, N. N. O specifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoj platformy) [On the specificity of studying diamond during prospecting works (on the example of the Siberian platform)] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2021. – № 3. – P. 59–75.
  34. Grachanov, S. A. The age of predictable primary diamond sources in the north-eastern Siberian platform / S. A. Grachanov, N. N. Zinchuk, N. V. Sobolev // Doklady Earth Sciences. – 2015. – V. 465. – № 2. – P. 1297–1301.
  35. Serov, I. V. Mantle sources of the kimberlite volcanism of the Siberian platform / S. I. Serov, V. K. Garanin, N. N. Zinchuk, A. Ya. Zinchuk, A. Ya. Rotman // Petrology. – 2001. – V. 9. – № 6. – P. 576–588.
  36. Vasilenko, V. B. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry / V. B. Vasilenko, L. G. Kuznetsova, N. I. Volkova, N. N. Zinchuk, V. O. Krasavchikov // Journal of Geochemical Exploration. – 2002. – V. 76. – № 2. – P. 93–112.
  37. Zinchuk, N. N. Osobennosti gidrotermalnogo i gipergennogo izmeneniya slyudistykh kimberlitov [Features of hydrothermal and hypergene alteration of micaceous kimberlites] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Perm University. Geology. – 2023. – V. 22, № 1. – P. 32–50.
  38. Zinchuk, N. N. Sulfaty v kimberlitovykh porodakh [Sulphates in kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. – 2023. – № 2. – P. 56–72.
  39. Zinchuk, N. N. Ob osobennostyakh flyuidnykh i gidrotermalnykh vkluchenij v nekotorykh mineralakh kimberlitov [On the particularities of fluid and hydrothermal inclusions in some minerals of kimberlites] / N. N. Zinchuk // Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific readings to the memory of P. N. Chirvinsky. – Iss. 26. – Perm : PGNU. – 2023. – P. 45–64.
  40. Zinchuk, N. N. Geologo-tekhnologicheskie osobennosti poiskov i razrabotki kimberlitov [Geological and technological specificity of prospecting and development of kimberlites] / N. N. Zinchuk // Razvedka i okhrana nedr [Exploration and protection of mineral resources]. – 2018. – № 10. – P. 6–15.
  41. Zinchuk, N. N. Ob ispolzovanii gipergennykh obrazovaniy kimberlitov pri almazoposkovykh rabotakh [On the use of hypergenic formations of kimberlites at diamond prospecting] / N. N. Zinchuk // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. – 2020. – № 2. – P. 62–80.
  42. Zinchuk, N. N. Dokembrijskie istochniki almazov v rossypanykh fanerozojakh [Precambrian sources of diamonds in the placers of the Phanerozoic] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2021. – № 3. – P. 50–59.
  43. Zinchuk, N. N. Geologicheskie issledovaniya pri poiskakh almaznykh mestorozhdenij [Geological studies during search for diamond deposits] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh University. Geology. – 2021. – № 4. – P. 35–52.
  44. Zinchuk, N. N. Almazy iz sovremennykh rossypanykh Sibirskoj platformy. Statya 2. Leno-Anabarskaya subprovinciya [Diamonds from modern placers of the Siberian platform. Article 2. Lena-Anabar subprovince] / N. N. Zinchuk, V. I. Koptil // MOIP Bulletin. Geological Department. – 2017. – V. 92, Iss. 2. – P. 65–82.
  45. Zinchuk, N. N. Identifikaciya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanoslojnogo obrazovaniya v kimberlitah odnoj iz trubok Yuzhnoj Afriki [Identification and genesis of lizardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites in one of the South African pipes] / N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, A. I. Gorshkov // Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Mineral Resources]. – 2003. – № 1. – P. 87–96.
  46. Zinchuk, N. N. Apokimberlitovye porody [Apokimberlite rocks] / N. N. Zinchuk, Yu. M. Melnik, V. P. Serenko // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 1987. – № 10. – P. 66–72.
  47. Zinchuk, N. N. Istoricheskaya minerageniya : v 3 t. T. 1. Vvedenie v istoricheskuyu minerageniyu [Historical minerageny : in 3 vols. V. 1. Introduction to historical minerageny] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh : Voronezh State University, 2005. – 590 p.
  48. Zinchuk, N. N. Istoricheskaya minerageniya : v 3 t. T. 2. Istoricheskaya minerageniya drevnih platform [Historical minerageny : in 3 vols. V. 2. Historical minerageny of ancient platforms] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh : Voronezh State University, 2007. – 570 p.
  49. Zinchuk, N. N. Istoricheskaya minerageniya : v 3 t. T. 3. Istoricheskaya minerageniya podvizhnykh superpoyasov [Historical minerageny : in 3 vols. V. 3. Historical min-

- erageny of mobile superpositions] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh : Voronezh State University, 2008. – 622 p.
50. Savko, A. D. Epochs of powerful encrustation in the Earth's history / A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh : Voronezh State University, 1999. – 102 p.
51. Tolstov, A. V. Vklad Almaznoj laboratorii CNIGRI v nauchnyu kladovuyu Yakutii [Contribution of the Diamond Laboratory of the Central Research Institute of Geology and Geophysics to the scientific treasure trove of Yakutia] / A. V. Tolstov, N. N. Zinchuk // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2022. – № 2. – P. 25–35.
52. Kharkiv, A. D. Petrohimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites] / A. D. Kharkiv, B. V. Zuenko, N. N. Zinchuk, A. I. Kryuchkov, A. V. Ukhanov [et al.]. – Moscow : Nedra, 1991. – 304 p.
53. Khitrov, V. G. Primenenie klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonornostej vyvetrivanija porod razlichnogo sostava [Application of cluster-analysis to understand the weathering regularities of rocks of different composition] / V. G. Khitrov, N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1987. – V. 296, № 5. – P. 1228–1233.
54. Zinchuk, N. N. Izmenenie mineralnogo sostava i strukturnyh osobennostej kimberlitov Yakutii v processe vyvetrivanija [Changes in the mineral composition and structural features of kimberlites of Yakutia in the process of weathering] / N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, V. N. Sokolov // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 1982. – № 2. – P. 42–53.

#### Информация об авторах:

**Зинчук Николай Николаевич** – доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик Академии наук Республики Саха (Якутия), председатель Западно-Якутского научного центра Академии наук Республики Саха (Якутия); заслуженный деятель науки Республики Саха (Якутия), заслуженный геолог Российской Федерации; ORCID ID 0000-0002-9682-3022 (677007, Российская Федерация, г. Якутск, пр-т Ленина, д. 33; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru).

**Бардухинов Леонид Даниилович** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Вилюйской ГРЭ, ассоциированной с Западно-Якутским научным центром Академии наук Республики Саха (Якутия); ORCID ID 0000-0002-2047-4946 (677007, Российская Федерация, г. Якутск, пр-т Ленина, д. 33; e-mail: BarduchinovLD@alrosa.ru).

#### About the authors:

**Nikolai N. Zinchuk** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Professor, Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Head of the West-Yakut Science Centre of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Honored Scientist of the Republic of Sakha (Yakutia), Honored Geologist of the Russian Federation (33 Lenin Avenue, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation, 677007; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru).

**Leonid D. Barduchinov** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of the Vilyuyskaya Geological Exploration Expedition associated with the West-Yakut Science Centre of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) (33 Lenin Avenue, Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation, 677007; e-mail: BarduchinovLD@alrosa.ru).

#### Для цитирования:

Зинчук, Н. Н. Особенности состава и формирования россыпей алмазов в краевых частях древних кратонов (на примере северо-востока Сибирской платформы) / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 63–75.

#### For citation:

Zinchuk, N. N. Osobennosti sostava i formirovaniya rossypej almazov v kraevykh chastyakh drevnih kratonov (na primere severo-vostoka Sibirskoy platformy) [Features of the composition and formation of diamond placers in the marginal parts of ancient cratons (on the example of the North-East of the Siberian platform)] / N. N. Zinchuk, L. D. Barduchinov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 63–75.

Дата поступления рукописи: 05.12.2023

Прошла рецензирование: 22.01.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 05.12.2023

Reviewed: 22.01.2024

Accepted: 27.03.2024

## U/Pb-возраст и источники сноса обломочного циркона из верхнерифейских песчаников Немской возвышенности (Южный Тиман)

О. В. Гракова\*, Н. Ю. Никулова\*, В. Б. Хубанов\*\*

\* Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар

\*\* Геологический институт им. Н. Л. Добрецова СО РАН,  
г. Улан-Удэ

ovgrakova@geo.komisc.ru

### Аннотация

Приведены результаты U-Pb изотопного датирования зерен детритового циркона из терригенных отложений средней подсвиты джежимской свиты, расположенных на Немской возвышенности Южного Тимана. Показано, что породы сформировались не раньше, чем на рубеже нижнего и верхнего протерозоя. Возраст зерен циркона охватывает диапазон от 3170±43 до 1480±49 млн лет. Источниками обломочного материала для метапесчаников джежимской свиты Немской возвышенности предполагаются магматические и метаморфические комплексы центральных районов Волго-Уралии. Возрасты датированных цирконов практически совпадают с возрастными цирконами из нижней подсвиты джежимской свиты, расположенной севернее возвышенности Дзержимпарма, за исключением средне-верхнерифейских датировок. Проведен сравнительный анализ полученных результатов датирования с возрастными зернами из верхнерифейских толщ Урала и Тимана. Показано, что зерна циркона, содержащиеся в изученных метапесчаниках, значительно древнее их стратиграфических аналогов из северной и средней частей Тиманского кряжа, а также Полярного и Приполярного Урала. На Южном Урале данные о возрасте обломочных цирконов сходны с таковыми на Южном Тимане. При сравнении данных по датированию обломочных цирконов в северных и южных разрезах Тимана был установлен ряд отличий. В популяции цирконов из северной части Тимана значительное количество имеет среднерифейский возраст, а количество цирконов с архейским и раннепротерозойским возрастными незначительно. В южной части Тимана древние цирконы с возрастными 2100 и 2500 млн лет преобладают, а цирконы со среднерифейским возрастом отсутствуют. Формирование рифейских пород на Южном Тимане происходило при участии более древних (архей-раннепротерозойских) источников, в отличие Среднего и Северного Тимана, где источниками обломочного материала являлись более молодые (среднерифейские) комплексы.

### Ключевые слова:

верхний рифей, джежимская свита, Южный Тиман, циркон, U-Pb датирование

## U/Pb age and sources of detrital zircon from Upper Rhiphaean sandstones of the Nemskaya Upland (South Timan)

O. V. Grakova\*, N. Yu. Nikulova\*, V. B. Khubanov\*\*

\* Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar

\*\* Geological Institute named after N. L. Dobretsov  
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Ulan-Ude

ovgrakova@geo.komisc.ru

### Abstract

In the South Timan, outcrops of the Riphean basement are exposed in the cores of the Dzhezhiparma, Ochparma and Vadyavozh anticlinal structures. The results of U-Pb isotope dating of detrital zircon grains from terrigenous sediments of the middle formation of the Dzhezhim Formation, located in the Vadyavozh quarry, are presented. The rocks were formed no earlier than at the boundary between the Lower and Upper Proterozoic. The age of zircon grains ranges from 3170±43 to 1480±49 Ma. In South Timan, the source of clastic material for the metasandstones of the Dzhezhim Formation is assumed to be crystal complexes of the central parts of the Volga-Ural region. The ages of dated zircons from the lower subformation of the Dzhezhim Formation of the Dzhezhiparma Upland partially coincide with the ages of zircons from the middle subformation of the Dzhezhim Formation, with exception of the Middle-Upper Riphean dating. The grains of detrital zircon contained in the studied metasandstones are much older than the stratigraphic analogues from the northern and middle parts of the Timan Ridge, as well as the Polar and Subpolar Urals. When comparing the data on dating of detrital zircons in the northern and southern sections, a number of differences were established. The majority of zircons from the northern part of Timan are of Middle Riphean age, whereas the number of zircons of Archean and Early Proterozoic age is insignificant. In the South Timan, when studying the age of detrital zircons, the opposite pattern was established: ancient zircons counting 2100 and 2500 million years predominate, and zircons of Middle Riphean age are absent. The formation of Riphean rocks in the South Timan originated from more ancient (Archean-Early Proterozoic) sources, in contrast to the basement rocks in the Middle and North Timan, where the sources were younger (Middle Riphean) complexes.

### Keywords:

Upper Rhiphaean, Dzhezhim Formation, South Timan, zircon, U-Pb dating

## Введение

На Южном Тимане выходы рифейского фундамента вскрываются в ядрах Джежимпарминской, Очпарминской и Вадьявожской антиклинальных структур. Они расположены в отстоящих друг от друга на десятки километров разрезах, вскрытых в карьерах, разработанных для добычи бутового камня. Немногочисленные исследования геологов из производственных и научных организаций, проведенные в карьере Вадьявож после находки здесь нескольких кристаллов алмазов, были связаны с поисками алмазоносных россыпей, приуроченных к структурным корам выветривания по породам рифейского фундамента, которые рассматривались в качестве вторичного коллектора [1, с. 172–178]. Коренными источниками алмазов считаются перекрытые осадочным чехлом кимберлитовые тела, предположительно, кембрийского возраста, расположенные в пределах Коми-Пермяцкого и Сысольского сводов в Волго-Уральской части Восточно-Европейской платформы [2, с. 59–61; 3, с. 39–40; 4]. Существует также мнение, что источником алмазов могут быть кайнозойские «туффизиты» [5, с. 63–66; 6, с. 54–66]. Необходимость проведения U-Pb датирования определяется отсутствием однозначных данных о возрасте и источниках вещества, участвовавших в формировании отложений. Стратиграфическая принадлежность вскрытой карьером Вадьявож метатерригенной толщи обоснована сопоставлением с породами, отнесенными к нижней подсвите джежимской свиты возвышенности Джежимпарма, расположенной в 90 км к северо-западу<sup>1</sup>, верхнерифейский возраст которых подтвержден результатами U-Pb датирования [7, с. 798–805]. В ходе геологической съемки изотопными исследованиями установлен возраст монацита из элювиально-делювиальных образований по породам рифея:  $1100 \pm 24$  млн лет по  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  и  $817 \pm 127$  млн лет по  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ . Определение возраста микрофоссилий из тонкозернистых прослоев также дало неоднозначный результат – верхний рифей или средний-верхний рифей. Геохимическое изучение, проведенное нами ранее, позволило установить, что в обломочной части метапесчаников преобладает рециклированный и в небольшом количестве присутствует слабо выветрелый материал [8, с. 23–32]. Основным источником вещества, по аналогии с нижней подсвитой джежимской свиты увала Джежимпарма [7, с. 798–805], могли быть породы древнего фундамента Восточно-Европейской платформы. Они же могли являться промежуточным коллектором алмазов в коре выветривания по рифейским породам. В последнее время появились данные, указывающие на более молодой (пострифейский), возможно, вендский возраст джежимской свиты, основанные на обнаружении остатков организмов эдиакарского типа [9, с. 61–65].

Учитывая слабую обнаженность позднекембрийских комплексов Тимана, недостаточный объем геохронологических данных, отсутствие органических остатков и отчетливых маркирующих горизонтов, метод U/Pb изотопного

<sup>1</sup> Здесь и далее описание геологического строения приводится по: «Групповая геологическая съемка м-ба 1: 200 000 на территории листов Р-40-XX, Р-40-XXVI». Ответственный исполнитель: Кириллин С. И. Сыктывкар. 2002 г.

датирования циркона является наиболее актуальным при стратиграфическом изучении, выяснении условий образования и установлении источников сноса палеонтологически немых терригенных докембрийских образований Немской возвышенности Южного Тимана. Полученные данные по U-Pb (LA-SF-ICP-MS) датированию детритовых цирконов и сопоставление с имеющимися датировками цирконов из верхнедокембрийских толщ Тимана помогут установить возраст, источники обломочного материала, уточнить стратиграфическое положение исследуемой толщи, выяснить палеотектонические и палеогеографические условия осадконакопления и реконструировать историю геологического развития исследуемой территории.

## Материалы и методы

Объект исследования – песчаники, вскрытые карьером Вадьявож на Немской возвышенности в крайней юго-восточной части Южного Тимана, расположенные на водоразделе бассейнов рек Вычегды и Камы (образец ВАД-1,  $61^{\circ}27'47''$ ,  $55^{\circ}49'33''$ ). Выделенная по стандартной методике тяжелая фракция минералогической пробы просмотрена под биноклем, монофракция циркона помещена в эпоксидную шашку. Определения U/Pb-изотопного возраста зерен циркона проведены с помощью устройства лазерной абляции UP-213 и одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Element XR (LA-ICP-MS метод) в ЦКП ГИН СО РАН «Геоспектр» (г. Улан-Удэ). Методика измерения, обработка масс-спектрометрического сигнала, расчет изотопных отношений и возрастов изложены в работе [10, с. 241–258]. Дискордантность определяли по формуле:  $D$  (дискордантность) =  $100 \times [\text{возраст } (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}) / \text{возраст } (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}) - 1]$ . Высокодискордантные зерна циркона имеют параметры –  $D \geq 10$  %. Для цирконов моложе 1 млрд лет использовалось  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ -значение возраста, а для древних (более 1 млрд лет) –  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ -возраст. Внутреннее строение циркона изучали по CL-изображениям, полученным на СЭМ ThermoFischer Scientific Axia ChemiSEM с выдвижным детектором катодолюминесценции RGB с диапазоном обнаружения длин волн 350–850 нм (аналитики И. Л. Потапов и В. А. Радаев). Изучение морфологических особенностей минерала проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6400 с энергетическим спектрометром Link с ускоряющим напряжением и током на образцах 20 кВ и  $2 \times 10^{-9}$  А соответственно и сертифицированными стандартами фирмы «Microspec» (аналитик В. Н. Филиппов). Исследования выполняли в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар).

## Геологическое положение и состав песчаников

Алеврито-песчаниковая толща джежимской свиты верхнего рифея слагает ядро Вадьявожского выступа фундамента – ограниченной разрывными нарушениями антиклинальной структуры в области сочленения Тиманского складчато-глыбового сооружения и Восточно-Европейской платформы (рис. 1). Вскрытый карьером в центральной части Вадьявожского выступа фрагмент разреза

средней подсвиты джежимской свиты сложен аркозовыми песчаниками с подчиненными прослоями метаалевролитов, иногда переходящих в глинистые сланцы. На поверхностях напластования отмечаются трещины усыхания и образования, предположительно определяемые как ходы илоедов и отпечатки капель дождя [8, с. 23–32]. С выходами метатерригенных пород джежимской свиты совпадает поле развития латеритной коры выветривания, сложенной глиной, в нижней части с обломками подстилающих пород.

Песчаник характеризуется бластосаммитовой структурой, массивной текстурой с регенерационным кварцевым, реже поровым хлоритовым или глинисто-железистым цементом. Около 90 % обломков представлено кварцем, встречаются зерна политизированных и серицитизированных полевых шпатов. Редкие обломки пород сложены гематит-кварц-серицитовым сланцем, микрокварцитом и мелкокристаллической полевошпат-кварцевой породой. Акцессорные минералы представлены эпидотом, цирконом и монацитом. В песчанике встречены единичные зерна слабо глинизированного обломочного биотита – минерала первого цикла выветривания.

#### U-Pb датирование и описание детритовых цирконов

Продатировано 110 зерен циркона, анализы с высокой дискордантностью (16 зерен) исключены из рассмотрения. Зерна циркона с дискордантными значениями содержат существенные количества элементов-примесей и по составу сходны с описанными нами ранее на увале Джежим-парма высокофосфористыми цирконами [17, с. 947–963].

Возраст зерен циркона охватывает диапазон от 3170±43 до 1480±49 млн лет (рис. 2, таблица). В рассматриваемой выборке наиболее древние зерна циркона с возрастными 3042±18 – 3170±43 млн лет (5 %) представлены минералами розового цвета, прозрачными, хорошо окатанными, с шероховатой поверхностью, на которой отмечаются небольшие углубления. Внутреннее строение зерен циркона неоднородное, пятнистое. Отмечаются яркие и темные зоны, неровные полосы светло-серого цвета. Встречаются зерна с ромбовидным пятнистым ядром в центре, вокруг которого расходятся чередующиеся темно-серые и светло-серые полосы (рис. 2, а).

Наибольшее количество зерен имеют датировки 2265±35 – 2924±20 млн лет. Среди них выделяется две группы, первая – в интервале 2265±35 – 2546±32 млн лет (12 %). Циркон этой группы представлен окатанными округлыми, грушевидными и удлинёнными ( $K_{удл.}$  1–2) непрозрачными зернами темно-розового цвета. Поверхность шероховатая, редко встречаются гладкие грани сохранившейся призмы. В структуре циркона отмечается секториальная зональность, характеризующаяся чередованием темно-серых и светло-серых прямолинейных секторов (рис. 2, б). Вторая группа – 2581±22 – 2924±20 млн лет (35 %) – это в различной степени удлинённые прозрачные зерна циркона ( $K_{удл.}$  2–3 и 2–5) светло-розового цвета, в которых угадывается дипирамидально-призматический облик, и их обломки. Поверхность зерен шероховатая. Встречается гладкая поверхность граней призмы (рис. 2, в). На изображениях видна осцилляционная зональность.

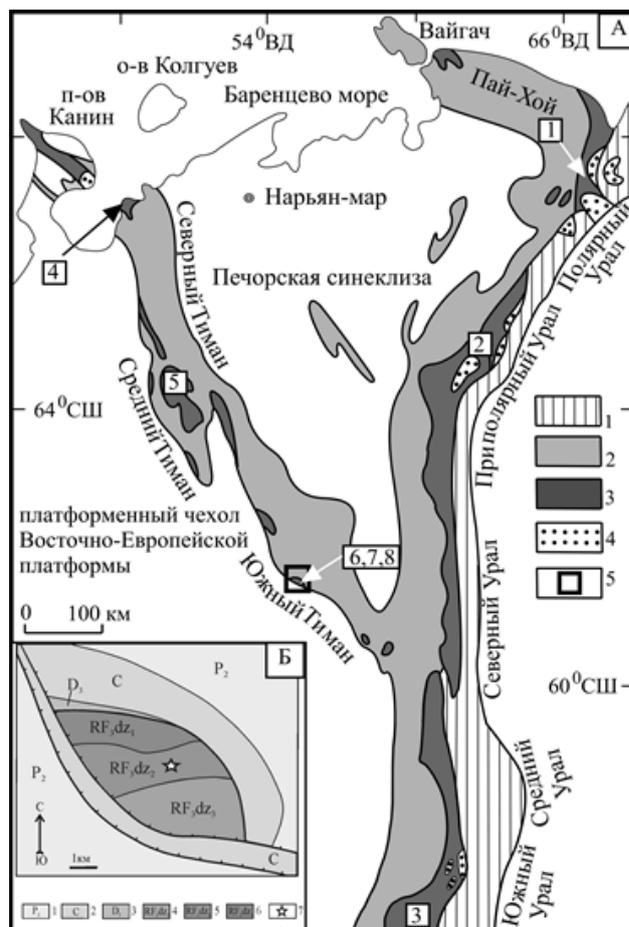


Рисунок 1. А. Схема геологического строения Тимано-Североуральского региона (по: [11, с. 741–760]): 1, 2 – палеозойские формации Урала и Тимана: 1 – палеоокеанические, 2 – палеоконтинентальные; 3 – верхнепротерозойские формации; 4 – нижнедокембрийские метаморфические комплексы; 5 – районы исследований. Цифры в квадратах – места отбора проб (графики показаны на рис. 4): 1 – № 4–28 [12, с. 488–492]; 2 – № 28 [11, с. 741–760]; 3 – № К-12-057 [13, с. 642]; 4 – № 202 [14, с. 14–26]; 5 – [15, с. 384–389]; 6 – № К-21-137 [16, с. 166–169]; 7 – № К-21-142 [16, с. 166–169]; 8 – № ВАД-1 (наши данные). Б. Схематическая геологическая карта Немской возвышенности.

Условные обозначения: 1 – пермская система: известняки, доломиты, гипсы, ангидриты, глины; 2 – карбоновая система: известняки, доломиты, глинистые известняки, глины, песчаники известковистые; 3 – девонская система: известняки, доломиты; 4 – верхнерифейская эра: песчаники с прослоями сланцев; 5 – среднерифейская эра: сланцы, алевролиты, песчаники, гравелиты, брекчии; 6 – нижнерифейская эра: песчаники, сланцы; 7 – карьер Вадьявож.

Figure 1. A. Sketch-map of the geological structure of the Timan-North-Ural region (according to: [11, P. 741–760]): 1, 2 – Paleozoic formations of the Urals and Timan: 1 – paleoceanic, 2 – paleocontinental; 3 – Upper Proterozoic formations; 4 – Lower Precambrian metamorphic complexes; 5 – study areas. Figures in rectangles are sampling locations (graphs are shown in Figure 4): 1 – № 4–28 [12, P. 488–492]; 2 – № 28 [11, P. 741–760]; 3 – № К-12-057 [13, P. 642]; 4 – № 202 [14, P. 14–26]; 5 – [15, P. 384–389]; 6 – № К-21-137 [16, P. 166–169]; 7 – № К-21-142 [16, P. 166–169]; 8 – № VAD-1 (our data). Б. Geological sketch-map of the Nemskaya Upland.

Symbols: 1 – Permian system: limestones, dolomites, gypsum, anhydrites, clays; 2 – carboniferous system: limestones, dolomites, clayed limestones, clays, calcareous sandstones; 3 – Devonian system: limestones, dolomites; 4 – Upper Rhiphaean era: gerbits with shale interlayers; 5 – Middle Rhiphaean era: shales, siltstones, sandstones, gravelites, breccias; 6 – Lower Rhiphaean era: sandstones, shales; 7 – Vadyavozh quarry.

Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования цирконов из песчаника джежимской свиты  
Results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of zircons from sandstone of the Dzhuzhim Formation

№ точки	Th/U	1σ	Изотопные соотношения						Rho	Возраст, млн лет				
			<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	Pb <sup>207</sup> / Pb <sup>206</sup>	1σ	D, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
87	0.49	0.01	0.0926	0.0024	3.2359	0.0824	0.2536	0.0028	0.1	1457	15	1480	49	1
31	0.61	0.01	0.1031	0.0014	4.1709	0.0513	0.2937	0.0027	0.2	1660	13	1680	24	1
65	0.64	0.01	0.1058	0.0023	4.2114	0.0876	0.2890	0.0030	0.2	1636	15	1728	39	6
102	0.68	0.01	0.1127	0.0037	5.1315	0.1613	0.3304	0.0041	0.1	1840	20	1843	58	0
110	0.31	0.01	0.1131	0.0039	5.1472	0.1735	0.3304	0.0043	0.1	1840	21	1849	62	0
22	0.61	0.01	0.1134	0.0014	5.2973	0.0595	0.3389	0.0030	0.3	1882	15	1855	22	-1
78	0.22	0.01	0.1135	0.0026	5.2370	0.1174	0.3348	0.0035	0.2	1862	17	1857	41	0
88	0.88	0.01	0.1144	0.0030	5.1961	0.1332	0.3297	0.0037	0.1	1837	18	1870	47	2
109	0.76	0.01	0.1148	0.0039	5.4261	0.1797	0.3429	0.0044	0.1	1900	21	1877	60	-1
49	0.81	0.01	0.1221	0.0020	5.7962	0.0874	0.3447	0.0032	0.2	1909	16	1987	28	4
56	0.21	0.01	0.1155	0.0021	5.1015	0.0868	0.3207	0.0031	0.2	1793	15	1887	32	5
60	0.95	0.01	0.1159	0.0021	5.1476	0.0902	0.3225	0.0032	0.2	1802	15	1893	33	5
11	0.51	0.01	0.1159	0.0013	5.4749	0.0563	0.3427	0.0030	0.3	1900	14	1894	21	0
66	0.02	0.01	0.1161	0.0033	5.3407	0.1486	0.3340	0.0043	0.2	1858	21	1897	50	2
100	0.36	0.01	0.1166	0.0036	5.6258	0.1677	0.3502	0.0042	0.1	1936	20	1904	54	-2
25	0.72	0.01	0.1170	0.0015	5.4281	0.0623	0.3366	0.0030	0.3	1870	15	1911	22	2
7	0.02	0.01	0.1173	0.0020	5.4877	0.0869	0.3394	0.0034	0.2	1884	17	1915	30	2
90	0.48	0.01	0.1177	0.0032	5.4984	0.1438	0.3390	0.0038	0.1	1882	18	1922	48	2
53	0.74	0.01	0.1180	0.0020	5.4354	0.0887	0.3344	0.0032	0.2	1860	16	1926	31	4
93	0.71	0.01	0.1181	0.0034	5.7122	0.1595	0.3511	0.0041	0.1	1940	20	1927	51	-1
50	0.65	0.01	0.1183	0.0019	5.5259	0.0845	0.3392	0.0032	0.2	1883	15	1930	29	3
99	0.28	0.01	0.1182	0.0036	5.6552	0.1667	0.3471	0.0042	0.1	1921	20	1930	53	0
27	0.83	0.01	0.1182	0.0015	5.6165	0.0644	0.3447	0.0031	0.3	1909	15	1930	22	1
18	0.21	0.01	0.1185	0.0015	5.5237	0.0631	0.3383	0.0030	0.3	1879	15	1933	22	3
10	0.63	0.01	0.1190	0.0014	5.5752	0.0577	0.3397	0.0030	0.3	1885	14	1942	21	3
80	0.68	0.01	0.1191	0.0028	5.6574	0.1301	0.3448	0.0037	0.2	1910	18	1943	42	2
67	0.53	0.01	0.1197	0.0025	5.6955	0.1120	0.3454	0.0035	0.2	1913	17	1952	36	2
48	0.52	0.01	0.1203	0.0019	5.6598	0.0849	0.3416	0.0032	0.2	1894	15	1960	28	3
20	1.03	0.02	0.1206	0.0015	5.6478	0.0645	0.3397	0.0030	0.3	1885	15	1966	22	4
83	0.52	0.01	0.1212	0.0031	5.8392	0.1427	0.3499	0.0038	0.1	1934	18	1973	44	2
58	0.83	0.01	0.1215	0.0023	5.7438	0.1012	0.3431	0.0034	0.2	1902	16	1979	33	4
38	0.74	0.01	0.1217	0.0018	5.8529	0.0791	0.3492	0.0032	0.2	1931	15	1981	26	3
1	0.49	0.01	0.1217	0.0014	5.9245	0.0584	0.3530	0.0031	0.3	1949	15	1981	20	2
92	0.17	0.01	0.1225	0.0035	5.7408	0.1572	0.3402	0.0039	0.1	1888	19	1993	49	6
73	0.32	0.01	0.1229	0.0027	6.0149	0.1289	0.3553	0.0037	0.2	1960	18	1999	39	2
86	1.62	0.03	0.1229	0.0033	6.0072	0.1535	0.3549	0.0040	0.1	1958	19	1999	46	2
29	0.35	0.01	0.1237	0.0016	6.1448	0.0720	0.3604	0.0032	0.2	1984	15	2011	23	1
68	0.26	0.01	0.1238	0.0026	6.1568	0.1229	0.3612	0.0037	0.2	1988	17	2011	36	1
51	0.68	0.01	0.1238	0.0022	6.0802	0.1015	0.3566	0.0035	0.2	1966	17	2011	31	2
16	0.43	0.01	0.1239	0.0015	5.9297	0.0640	0.3473	0.0031	0.3	1922	15	2013	21	5
64	1.44	0.03	0.1240	0.0026	5.8700	0.1198	0.3438	0.0036	0.2	1905	17	2014	37	6
85	0.69	0.01	0.1247	0.0032	6.2711	0.1560	0.3651	0.0040	0.1	2006	19	2024	45	1
12	0.77	0.01	0.1250	0.0014	5.8892	0.0601	0.3418	0.0030	0.3	1895	14	2029	20	7
37	0.42	0.01	0.1257	0.0019	6.4819	0.0898	0.3744	0.0035	0.2	2050	16	2038	26	-1
69	0.64	0.01	0.1431	0.0030	7.8730	0.1559	0.3993	0.0041	0.2	2166	19	2265	35	5
108	0.99	0.01	0.1482	0.0051	8.3667	0.2780	0.4095	0.0053	0.1	2213	24	2326	58	5
94	0.69	0.01	0.1496	0.0043	8.8649	0.2488	0.4300	0.0051	0.1	2306	23	2342	49	2
39	0.55	0.01	0.1524	0.0022	9.0952	0.1198	0.4332	0.0040	0.2	2320	18	2373	24	2
103	0.58	0.01	0.1567	0.0051	9.7381	0.3047	0.4509	0.0056	0.1	2399	25	2421	54	1
52	0.71	0.01	0.1582	0.0027	9.4980	0.1537	0.4359	0.0042	0.2	2332	19	2436	29	4
44	0.79	0.01	0.1598	0.0025	9.8713	0.1421	0.4485	0.0042	0.2	2389	19	2453	26	3

В диапазоне 1843±58 – 2038±26 млн лет условно выделяются три временных интервала. В интервале 1843±58 – 1877±60 млн лет (6 %) циркон представлен удлиненными окатанными непрозрачными зернами розового цвета с гладкой поверхностью ( $K_{удл}$  1–3, 1–4) и их обломками. Внутреннее строение однородное. В одном зерне можно наблюдать пятнистую структуру, магматическую зональность. Встречаются окатанные ядра (рис. 2, г).

Интервал 1887±32 – 1981±26 млн лет (24 %) – хорошо окатанные округлые непрозрачные зерна темно-розового цвета. В структуре большей части зерен отмечаются светлые ядра, на краях видна осцилляционная зональность или чередование ярких и темных полос. Вероятнее всего, в этой группе представлены хорошо окатанные обломки дипирамидально-призматического циркона (рис. 2, д).

Интервал 1987±28 – 2038±26 млн лет (15 %) – окатанные, почти изометричные непрозрачные зерна бордового цвета, в которых иногда можно обнаружить реликты призматического габитуса. Поверхность минерала чаще всего гладкая, местами шероховатая. Циркон характеризуется неоднородным внутренним строением, наблюдаются разупорядоченные полосы серого на фоне темно-серого цвета (рис. 2, е).

Возрасты единичных зерен составляют: 1480±49 млн лет – обломок прозрачного циркона бледно-розового цвета с гладкой поверхностью и однородным внутренним строением, 1680±24 млн лет – хорошо окатанное удлиненное непрозрачное зерно темно-розового цвета с равномерно шероховатой поверхностью и однородным внутренним строением (рис. 2, ж), и 1728±39 млн лет – хорошо окатанное удлиненное ( $K_{удл}$  1–3) прозрачное зерно светло-розового цвета с шероховатой ям-

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
33	0.33	0.01	0.1612	0.0022	10.5094	0.1350	0.4731	0.0044	0.2	2497	19	2468	23	-1
96	0.41	0.01	0.1659	0.0049	10.4614	0.2979	0.4576	0.0054	0.1	2429	24	2517	49	4
55	0.56	0.01	0.1670	0.0030	10.6654	0.1803	0.4635	0.0045	0.2	2455	20	2528	30	3
61	0.51	0.01	0.1688	0.0033	10.7500	0.1987	0.4622	0.0046	0.2	2449	20	2546	32	4
32	0.54	0.01	0.1723	0.0023	10.8462	0.1320	0.4568	0.0041	0.2	2425	18	2581	22	6
13	0.96	0.01	0.1760	0.0021	11.9577	0.1283	0.4928	0.0044	0.3	2583	19	2616	20	1
72	0.61	0.01	0.1766	0.0039	12.1033	0.2551	0.4976	0.0052	0.2	2603	22	2621	36	1
101	1.04	0.02	0.1789	0.0057	12.6471	0.3887	0.5129	0.0063	0.1	2669	27	2643	52	-1
3	0.30	0.01	0.1796	0.0020	12.3282	0.1176	0.4979	0.0043	0.3	2605	19	2649	18	2
63	1.17	0.03	0.1802	0.0049	12.4058	0.3362	0.4998	0.0077	0.3	2613	33	2655	44	2
82	1.03	0.02	0.1807	0.0045	12.3840	0.2988	0.4976	0.0054	0.1	2603	23	2659	41	2
40	1.10	0.02	0.1814	0.0027	12.8638	0.1750	0.5147	0.0048	0.2	2677	20	2666	24	0
107	1.85	0.03	0.1814	0.0061	12.6367	0.4098	0.5054	0.0064	0.1	2637	27	2666	54	1
15	0.75	0.01	0.1827	0.0021	12.5455	0.1295	0.4983	0.0044	0.3	2606	19	2677	19	3
42	0.36	0.01	0.1815	0.0027	12.2842	0.1701	0.4913	0.0045	0.2	2576	20	2667	24	4
98	0.43	0.01	0.1819	0.0055	12.5352	0.3637	0.5002	0.0060	0.1	2615	26	2670	49	2
43	0.89	0.01	0.1818	0.0027	12.4723	0.1758	0.4979	0.0046	0.2	2605	20	2670	25	2
36	0.56	0.01	0.1829	0.0025	12.7779	0.1618	0.5070	0.0046	0.2	2644	20	2680	22	1
45	0.60	0.01	0.1833	0.0028	12.8057	0.1841	0.5071	0.0047	0.2	2644	20	2683	25	1
77	1.10	0.02	0.1837	0.0042	12.4652	0.2772	0.4927	0.0052	0.2	2582	23	2686	38	4
26	0.34	0.01	0.2093	0.0027	15.8706	0.1835	0.5502	0.0050	0.3	2826	21	2900	20	3
5	0.39	0.01	0.1842	0.0021	12.5921	0.1291	0.4957	0.0044	0.3	2595	19	2691	19	4
76	0.73	0.01	0.1845	0.0042	12.7741	0.2802	0.5026	0.0053	0.2	2625	23	2694	37	3
81	2.21	0.03	0.1845	0.0046	12.9894	0.3142	0.5111	0.0057	0.2	2661	24	2694	41	1
70	0.20	0.01	0.1849	0.0039	12.3201	0.2472	0.4838	0.0049	0.2	2544	21	2697	34	6
57	0.16	0.01	0.1858	0.0033	12.9113	0.2183	0.5044	0.0049	0.2	2633	21	2706	29	3
46	0.80	0.01	0.1875	0.0030	13.1145	0.1939	0.5076	0.0048	0.2	2647	21	2721	26	3
54	0.68	0.01	0.1877	0.0035	12.7918	0.2272	0.4947	0.0051	0.2	2591	22	2722	30	5
24	0.63	0.01	0.1880	0.0024	13.7174	0.1600	0.5294	0.0048	0.3	2739	20	2725	21	-1
2	0.08	0.01	0.1883	0.0020	12.7586	0.1201	0.4914	0.0042	0.3	2577	18	2727	18	6
74	0.54	0.01	0.1882	0.0042	13.2920	0.2860	0.5126	0.0053	0.2	2668	23	2727	36	2
35	0.47	0.01	0.1885	0.0027	13.5460	0.1791	0.5215	0.0049	0.2	2705	21	2730	23	1
34	0.58	0.01	0.1891	0.0026	13.3821	0.1667	0.5136	0.0047	0.2	2672	20	2735	22	2
23	0.52	0.01	0.1896	0.0023	13.6929	0.1532	0.5241	0.0047	0.3	2717	20	2739	20	1
21	0.49	0.01	0.1977	0.0024	14.8381	0.1626	0.5447	0.0049	0.3	2803	20	2807	20	0
14	0.51	0.01	0.1979	0.0023	14.7072	0.1555	0.5391	0.0048	0.3	2780	20	2809	19	1
75	0.38	0.01	0.2035	0.0046	15.1819	0.3302	0.5415	0.0057	0.2	2790	24	2855	36	2
28	0.60	0.01	0.2124	0.0027	16.1179	0.1845	0.5506	0.0049	0.3	2828	20	2924	20	3
9	0.87	0.01	0.2286	0.0026	19.0679	0.1962	0.6050	0.0054	0.3	3050	22	3042	18	0
17	0.48	0.01	0.2324	0.0027	19.3416	0.2004	0.6039	0.0053	0.3	3046	21	3068	18	1
71	0.52	0.01	0.2405	0.0052	20.0767	0.4193	0.6061	0.0063	0.2	3054	25	3123	34	2
106	0.60	0.01	0.2428	0.0081	20.6983	0.6654	0.6186	0.0078	0.1	3104	31	3138	52	1
89	0.35	0.01	0.2476	0.0068	21.0106	0.5569	0.6159	0.0073	0.2	3093	29	3170	43	2

чатой поверхностью и внутренним строением, характеризующимся неравномерным чередованием ярко-серых и серых полос (рис. 2, з).

Зерна циркона различаются по величине Th/U отношения, зависящего от их происхождения [18; 19, с. 73–78; 20, с. 1–37; 21, с. 122–138; 22, с. 117–133]. Отношения Th/U в датированных зернах циркона из песчаников джежимской свиты варьируют в пределах от 0.02 до 2.21 (таблица, рис. 3).

Большинство фигуративных точек зерен циркона всех возрастных диапазонов укладываются в интервал значений  $0.3 < \text{Th}/\text{U} < 1.1$ , характерных для большинства магматических и метаморфических горных пород. В пяти зернах

позднепалеопротерозойской популяции и одном неорархейском зерне значения Th/U меньше порогового (0.3), характерного для цирконов из метаморфических пород и жильных образований [21, с. 123–138]. Аномально низкие значения Th/U отмечены в трех зернах циркона с низким содержанием Th, источником которых могут быть низкотемпературные граниты [23, с. 635–638]. Источником зерен циркона с величинами Th/U 0.5–0.8 могут быть гранитоиды и метаморфические породы амфиболитовой фации [18; 22, с. 117–133]. Зерна циркона с высокими значениями Th/U (0.8–1.1) свойственны породам высокой степени метаморфизма, а четыре зерна с наиболее высокими значениями (1.44–2.21) могут происходить из мантийных пород основного состава [24, с. 295–312].

## Результаты и их обсуждение

Особенности морфологии, внутреннего строения и U-Pb датирование циркона из метапесчаников джежимской свиты указывают на поступление терригенного материала в осадочную толщу из нескольких источников, разноудаленных друг от друга. Вероятным первичным источником зерен циркона с мезо- и неорархейскими датировками могли быть породы, принимающие участие в строении кристаллического фундамента Волго-Уральской и Сарматской частей Восточно-Европейской платформы.

Большинство зерен циркона этой популяции представлены окатанными изометричными и удлиненными формами. Встречаются удлиненные призматические кристаллы с сохранившимися гранями и сглаженными ребрами.

Зерна циркона с возрастными 1987±28 – 2038±26 млн лет могут быть связаны с гранитоидами, внедрением которых сопровождалось коллизионные процессы, сопряженные с формированием Волго-Сарматского орогена [25, с. 427–432; 26, с. 23–45]. В двух зернах с возрастными 1915±30 и 1897±50 млн лет отмечены аномально низкие значения Th/U. Оба зерна характеризуются идеальной окатанностью ( $K_{удл.}$  1.1 и 1.0), отсутствием зональности и неравно-

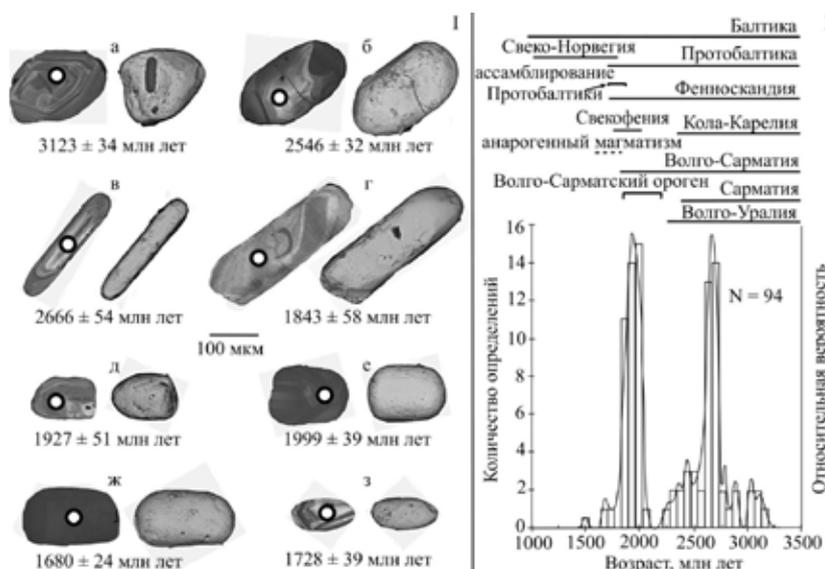


Рисунок 2. Цирконы из метапесчаников джежимской свиты: I – внутреннее строение по CL-снямкам (слева) и морфология по SE-снямкам (справа), II – гистограмма и кривая плотности вероятности распределения изотопных возрастов.

Figure 2. Zircons from metasandstones of the Dzhezhim Formation. I – internal structure from CL images (left) and morphology from SE images (right), II – histogram and probability density curve of isotopic age distribution.

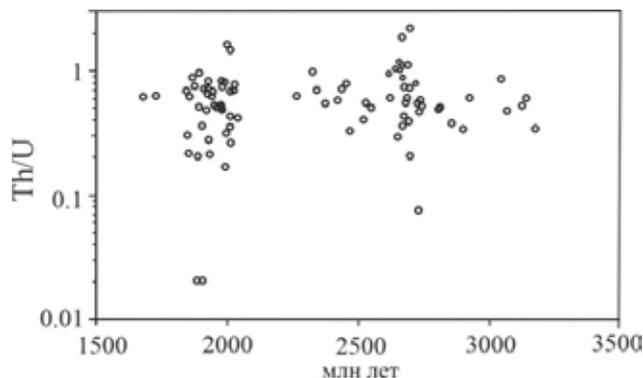


Рисунок 3. Диаграмма зависимости величины Th/U в зернах детритового циркона из песчаников джежимской свиты от их возраста.

Figure 3. Dependency diagram of the Th/U value in detrital zircon grains from sandstones of the Dzhezhim Formation on their age.

мерной пятнистой окраской в CL-изображении. В качестве источника этих зерен можно предположить эцлогитовые комплексы Лапландско-Беломорского пояса в восточной части Балтийского щита [27, с. 5–10]. Образование циркона популяции  $1843 \pm 58$  –  $1877 \pm 60$  млн лет может быть связано с проявлениями анорогенного магматизма на окраинах Фенноскандии [25, с. 427–432]. Источниками зерен с датировками  $1480 \pm 49$ ,  $1680 \pm 24$  и  $1728 \pm 39$  млн лет, соответствующими по возрасту готской аккреционной фазе на западной окраине Балтики, могли быть породы, участвовавшие в строении аккреционно-коллизийного Свело-Норвежского мегаблока [26, с. 23–45].

Вероятным первичным источником зерен циркона с мезо- и неогархейскими датировками  $2265 \pm 35$  –  $2924 \pm 20$  млн лет могли быть породы, принимающие участие в строении кристаллического фундамента Волго-Уральской и Сарматской частей древнего остова Восточно-Европейской платформы. Большинство зерен циркона этой популяции по значениям отношения Th/U (рис. 3) попадают в

II характерный для гранитов интервал 0.5–0.8 [18] и представлены окатанными овальными и округлыми зернами. Редко встречаются удлиненные призматические кристаллы с сохранившимися гранями и сглаженными ребрами. Два зерна с аномально высокими значениями Th/U и возрастaми  $2694 \pm 41$  и  $2666 \pm 54$  млн лет представлены остроугольным обломком и окатанным с круглым сечением удлиненным зерном с четко проявленной тонкой CL-зональностью.

Мы сопоставили полученные результаты датирования зерен детритового циркона из метапесчаников средней подсвиты джежимской свиты Немской возвышенности (рис. 1, 4) с возрастaми зерен циркона из верхнерифейских толщ Урала и Тимана: нижней подсвиты джежимской свиты возвышенности Джежимпарма – карьеры Асывож [7, с. 798–805] и Джежим [16, с. 166–169], паунской свиты Среднего Тимана [15, с. 166–169],

румяничной свиты Северного Тимана [14, с. 14–26], зильмердакской свиты Южного Урала [13, с. 642], хобеинской свиты Приполярного Урала [11, с. 741–760], минисейшорской свиты Полярного Урала [12, с. 488–492].

На схеме сопоставления (рис. 4) видно, что песчаники джежимской свиты Немской возвышенности содержат большее количество цирконов с древними датировками, чем их стратиграфические аналоги из северной и средней частей Тиманского кряжа. Возраст обломочных цирконов нижней подсвиты джежимской свиты возвышенности Джежимпарма отчасти совпадает с возрастaми цирконов изученной пробы, отличаясь присутствием средне-верхнерифейских датировок. Это может быть обусловлено изменением области питания – выведением из области размыва расположенных на окраине гранитных массивов в результате продвижения береговой линии вглубь палеоконтинента.

Проведенное сравнение позволяет сделать вывод о широтной смене источников детритовых цирконов, уменьшении с севера на юг доли молодых зерен за счет сокращения области размыва. На относительно небольшой территории Тимано-Североуральского региона накопление терригенных толщ происходило при разных условиях. Источники детритового циркона Северного и Среднего Тимана сходны с источниками циркона севера Урала, включая Приполярный, Полярный и Северный Урал. Значения возрастaми циркона из разрезов Южного Урала сходны со с таковыми для Южного Тимана. По мере продвижения на юг молодых значений становится меньше, появляются новые пики с возрастaми 2100 и 2500 млн лет, соответствующие не задействованным в формировании более северных разрезов источникам обломочного материала. На графике самого южного разреза Тиманской гряды присутствует только два древних пика. Не исключено, что на Немской возвышенности отложения имеют более древний возраст

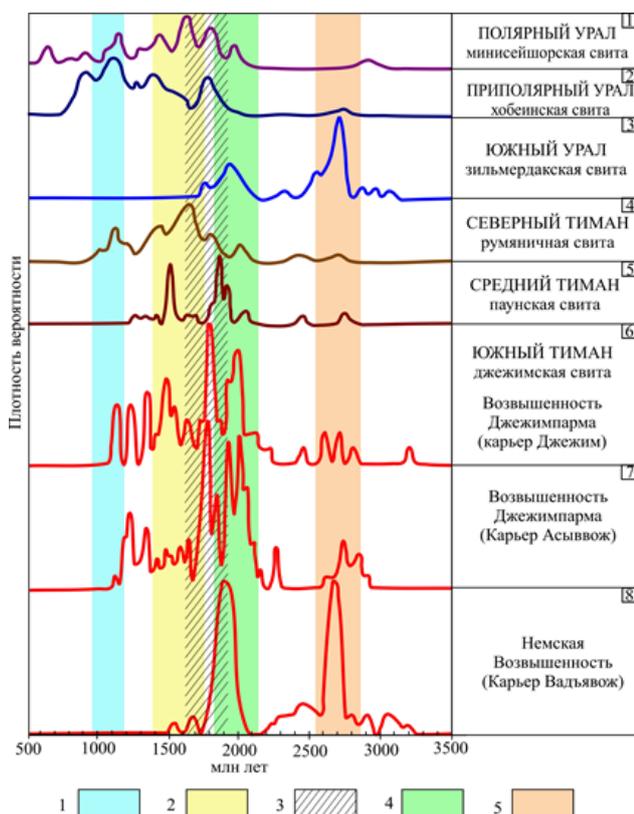


Рисунок 4. Схема сопоставления U/Pb-возрастов детритовых цирконов из верхнерифейских отложений Урала и Тимана.

Условные обозначения: 1-3 – фазы орогении: 1 – Sveko-Norwegian (Grenville); 2 – Dano-Polonskaya, Telemarkskaya and Gothic; 3 – Svecofenian; 4-5 – тектонические события: 4 – кратонизация Прото-Балтики; 5 – формирование неогарейских комплексов протократонов. Цифры в квадратах и ссылки на работы авторов соответствуют рис. 1.

Figure 4. Scheme of comparison of U/Pb ages of detrital zircons from the Upper Riphæan deposits of the Urals and Timan.

Symbols: 1-3 – phases of orogeny: 1 – Sveko-Norwegian (Grenville); 2 – Dano-Polonskaya, Telemarkskaya and Gothic; 3 – Svecofenian; 4-5 – tectonic events: 4 – cratonization of Proto-Baltics; 5 – formation of Neoproterozoic complexes. Figures in squares and references (links to the authors' works) correspond to Figure 1.

и представляют нижние, по сравнению со вскрытыми карьером Асывож на увале Джежимпарма, горизонты джежимской свиты.

## Заключение

В результате датирования зерен детритового циркона из метапесчаников средней подсвиты джежимской свиты на Немской возвышенности установлено, что породы сформировались не раньше, чем на рубеже нижнего и верхнего протерозоя. Формирование состава отложений проходило преимущественно за счет привноса в осадочный бассейн терригенного материала из разрушавшихся кристаллических комплексов фундамента Восточно-Европейской платформы – древних глубоко метаморфизованных образований кратонов, а также гранитоидов, внедрение которых сопровождало коллизионные процессы в ходе формирования Волго-Уральского, Волго-Сарматского орогенов и образования континента Прото-Балтики. Песчаники Немской возвышенности Южного Тимана по литологическим параметрам, положению в разрезе, полу-

ченным данным о возрасте обломочных цирконов сходны с подобными образованиями на Южном Урале и, вероятно, формировались в едином осадочном бассейне за счет разрушения и переотложения материала кристаллических комплексов древнего фундамента Восточно-Европейской платформы. Вариации встречаемости цирконов наиболее древней популяции обусловлены различной интенсивностью разрушения отдельных блоков древнего фундамента. Различия в возрасте цирконов из нижней и средней подсвит джежимской свиты можно объяснить постепенным, по мере накопления более чем 700-метровой терригенной толщи, уменьшением области размыва, смещением с территории, где были развиты комплексы активных континентальных окраин, в сторону континента – центральных районов Волго-Уралии.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Жарков, В. А. Крупнокристаллический монацит из кайнозойских отложений в районе ручья Вадьявож (Немская возвышенность, Южный Тиман) / В. А. Жарков, И. В. Швецова // Труды Института геологии Коми НЦ УрО РАН. Вып. 101. – Сыктывкар, 1999. – № 28 – С. 172–178.
2. Оловянишников, В. Г. Первоисточники россыпей алмазов Тимана / В. Г. Оловянишников // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: материалы всеросс. совещ. – Сыктывкар, 2001. – С. 59–61.
3. Щербаков, Э. С. Условия образования среднедевонских алмазоносных отложений Тимана / Э. С. Щербаков, А. М. Плякин, П. П. Битков // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: материалы всеросс. совещ. – Сыктывкар, 2001. – С. 39, 40.
4. Гракова, О. В. Алмазопроявления Среднего и Южного Тимана / О. В. Гракова. – Сыктывкар, 2021. – 144 с.
5. Макеев, А. Б. Новые перспективы алмазоносности Тимана / А. Б. Макеев, А. Я. Рыбальченко, В. А. Дудар, В. Г. Шеметько // Геология и минерально-сырьевые ресурсы европейского Северо-Востока России: новые результаты и новые перспективы: материалы XIII Геол. съезда Республики Коми. Т. IV. – Сыктывкар, 1999. – С. 63–66.
6. Рыбальченко, А. Я. Теоретические основы прогнозирования и поисков коренных месторождений алмазов туфзитового типа / А. Я. Рыбальченко, Т. М. Рыбальченко, В. И. Силаев // Известия Коми научного центра УрО РАН. – Сыктывкар, 2011. – № 1 (5). – С. 54–66.
7. Кузнецов, Н. Б. Первые результаты U/Pb-датирования и изотопно-геохимического изучения детритных цирконов из позднедевонских песчаников Южного Тимана (увал Джежим-Парма) / Н. Б. Кузнецов, Л. М. Натапов, Е. А. Белоусова, У. Л. Гриффин, С. О. Рейлли [и др.] // Доклады Академии наук. – 2010. – Т. 435, № 6. – С. 798–805.
8. Никулова, Н. Ю. Вещественный состав и особенности формирования метаосадочных пород фундамента Вадьявожского выступа (Немская возвышенность, Юж-

- ный Тиман) / Н. Ю. Никулова // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 69. – С. 23–32.
9. Колесников, А. В. Биота эдиакарского типа в верхнем докембрии Тиманского кряжа (возвышенность Джежим-Парма, Республика Коми) / А. В. Колесников, И. В. Латышева, А. В. Шацилло, Н. Б. Кузнецов, А. С. Колесников [и др.] // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2023. – Т. 510, № 1. – С. 61–65. – DOI 10.31857/S2686739722602964.
  10. Хубанов, В. Б. U-Pb изотопное датирование цирконов из PZ 3-MZ магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставление с SHRIMP данными / В. Б. Хубанов, М. Д. Буянтуев, А. А. Цыганков // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 1. – С. 241–258.
  11. Пыстин, А. М. U-Pb (LA-SF-ICP-MS) возраст и вероятные источники сноса детритовых цирконов из терригенных отложений верхнего докембрия Приполярного Урала / А. М. Пыстин, О. В. Гракова, Ю. И. Пыстина, Е. В. Кушманова, К. С. Попвасев [и др.] // Литосфера. – 2022. – Т. 22, № 6. – С. 741–760. – DOI 10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-760.
  12. Уляшева, Н. С. Первые результаты U-Pb LA-SF-ICP-MS-датирования детритовых цирконов из среднерифейских (?) терригенных отложений Полярного Урала / Н. С. Уляшева, Ю. И. Пыстина, А. М. Пыстин, О. В. Гракова, В. Б. Хубанов // Доклады Академии наук. – 2019. – Т. 485, № 4. – С. 488–492. – DOI 10.31857/S0869-56524854488-492.
  13. Романюк, Т. В. Первые результаты U/Pb LA-ICP-MS датирования детритных цирконов из верхнерифейских песчаников Башкирского антиклинория (Южный Урал) / Т. В. Романюк, А. В. Маслов, Н. Б. Кузнецов, Е. А. Белоусова, Ю. Л. Ронкин [и др.] // Доклады Академии наук. – 2013. – Т. 452, № 6. – С. 642. – DOI 10.7868/S0869565213310174.
  14. Андреичев, В. Л. U-Pb (LA-ICP-MS) возраст детритовых цирконов из метаосадочных пород основания верхнедокембрийского разреза Северного Тимана / В. Л. Андреичев, А. А. Соболева, В. Б. Хубанов, И. Д. Соболев // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2018. – Т. 93, № 2. – С. 14–26.
  15. Брусницына, Е. А. Результаты исследований U-Pb изотопного возраста обломочных цирконов из средне-верхнерифейских отложений Четласского камня (Тиманской гряды) / Е. А. Брусницына, В. Б. Ершова, А. К. Худолей, Т. Андерсен // Проблемы тектоники и геодинамики земной коры и мантии: Материалы I Тектонического совещания. – Москва : ГЕОС, 2018. – Т. 2 – С. 384–388.
  16. Латышева, И. В. U-Pb возраст зерен детритового циркона из обломочных пород джежимской свиты (верхний докембрий Южного Тимана) / И. В. Латышева, Н. Б. Кузнецов, А. В. Шацилло, А. В. Колесников, А. В. Страшко [и др.] // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса от океана к континенту: Материалы научной конференции. – Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2022. – Вып. 20. – С. 166–169.
  17. Гракова, О. В. Геохимия высокофосфористого циркона из верхнерифейских песчаников Южного Тимана / О. В. Гракова, С. Г. Скублов, Н. Ю. Никулова, О. Л. Галанкина // Геохимия. – 2023. – Т. 68, № 9. – С. 947–963. – DOI 10.31857/S0016752523090054.
  18. Вотяков, С. Л. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микронзондового датирования / С. Л. Вотяков, Ю. В. Шапова, В. В. Хиллер. – Екатеринбург : Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2011. – 336 с.
  19. Пыстин, А. М. Новые данные о возрасте гранитоидов Приполярного Урала в связи с проблемой выделения кожимской среднерифейской гранит-риолитовой формации / А. М. Пыстин, Ю. И. Пыстина // Известия Коми научного центра УрО РАН. – 2011. – № 4(8). – С. 73–78.
  20. Романюк, Т. В. Палеотектонические и палеогеографические обстановки накопления нижнерифейской айской свиты Башкирского поднятия (Южный Урал) на основе изучения детритовых цирконов методом «TerraneChrono®» / Т. В. Романюк, Н. Б. Кузнецов, Е. А. Белоусова, В. М. Горожанин, Е. Н. Горожанина // Геодинамика и тектонофизика. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 1–37. – DOI 10.5800/GT-2018-9-1-0335.
  21. Rubatto, D. Zircon trace element geochemistry : partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism / D. Rubatto // D Chem. Geol. – 2002. – Vol. 184. – P. 123–138.
  22. Verma, S. P. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins / S. P. Verma, J. S. Armstrong-Altrin // Chem. Geol. – 2013. – № 355. – P. 117–133.
  23. Harrison, T. M. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks / T. M. Harrison, E. B. Watson, A. B. Aikman // Geology. – 2007. – № 35 (7). – 635–638. – DOI 10.1130/G23505A.1.
  24. Kaczmarek, M. A. Trace element chemistry and U-Pb dating of zircons from oceanic gabbros and their relationship with whole rock composition (Lanzo, Italian Alps) / M. A. Kaczmarek, O. Müntener, D. Rubatto // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2008. – № 155 (3). – P. 295–312. – DOI 10.1007/s00410-007-0243-3.
  25. Кузнецов, Н. Б. Первые U/Pb-данные о возрастах детритных цирконов из песчаников верхнеэмской тактинской свиты Западного Урала (в связи с проблемой коренных источников уральских алмазоносных россыпей) / Н. Б. Кузнецов, Т. В. Романюк, А. В. Шацилло, С. Ю. Орлов, В. М. Горожанин, Е. Н. Горожанина [и др.] // Доклады Академии наук. – 2014. – Т. 455, № 4. – С. 427–432.
  26. Bogdanova, S. V. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia / S.V. Bogdanova, B. Bingen, R. Gorbatshev, T.N. Kheraskova, V.I. Kozlov, V.N. Puchkov, Yu.A. Volozh // Precambrian Res. – 2008. – V. 160. – P. 23–45.
  27. Slabunov, A. Geological review. Archean-paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province (Fen-

noscandian Shield) and the tectonic position of eclogites / A. Slabunov, V. Balagansky, A. Shchipansky // Early Precambrian Eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield. Field Guidebook. – Petrozavodsk, 2019. – P. 5–10.

## References

1. Zharkov, V. A. Krupnokristallicheskie monaziti iz kainozoiskikh otlozhenii v raione ruchya Vadyavozh (Nemskaya vozvyshennost, Yuzhnyi Timan) [Coarse-crystalline monazite from Cenozoic deposits in the area of the Vadyavozh stream (Nemskaya Upland, South Timan)] / V. A. Zharkov, I. V. Shvetsova // Proceedings of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – Vol. 101. – Syktyvkar, 1999. – № 28 – P. 172–178.
2. Olovyanishnikov, V. G. Pervoistochniki rossypei almazov Timana [Primary sources of Timan diamond placers] / V. G. Olovyanishnikov // Almazy i almazonosnost Timano-Uralskogo regiona [Diamonds and Diamond Potential of the Timan-Ural Region] : Materials of the All-Russian Meeting. – Syktyvkar, 2001. – P. 59–61.
3. Shcherbakov, E. S. Usloviya obrazovaniya srednedevonskii almazonosnykh otlozhenii Timana [Conditions for the formation of the Middle Devonian diamondiferous deposits of Timan] / E. S. Shcherbakov, A. M. Plyakin, P. P. Bitkov // Almazy i almazonosnost Timano-Uralskogo regiona [Diamonds and Diamond Potential of the Timan-Ural Region] : Materials of the All-Russian Meeting. – Syktyvkar, 2001. – P. 39, 40.
4. Grakova, O. V. Almazoproyavleniya Srednego i Yuzhnogo Timana [Diamond occurrences in the Middle and South Timan] / O. V. Grakova. – Syktyvkar, 2021. – 144 p.
5. Makeev, A. B. Novye perspektivy almazonosnosti Timana [New prospects for diamond potential in Timan] / A. B. Makeev, A. Ya. Rybalchenko, V. A. Dudar, V. G. Shemet'ko // Geologiya i mineralno-syryevye resursy evropeiskogo severo-vostoka Rossii : novye rezultaty i novye perspektivy [Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia : New Results and New Prospects] : Materials of XIII Geol. Congress of the Komi Republic. Vol. IV. – Syktyvkar, 1999. – P. 63–66.
6. Rybalchenko, A. Ya. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya i poiskov korennykh mestorozhdenii almazov tuffizitovogo tipa [Theoretical basis for forecasting and searching for primary deposits of tuffsite-type diamonds] / A. Ya. Rybalchenko, T. M. Rybalchenko, V. I. Silaev // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – Syktyvkar, 2011. – Iss. 1 (5). – P. 54–66.
7. Kuznetsov, N. B. Pervye rezultaty U/Pb-datirovaniya i izotopno-geokhimicheskogo izucheniya detritnykh tsirkonov iz pozdnedokembriiskikh peschanikov Yuzhnogo Timana (uval Dzhhezhim-Parma) [First results of U/Pb dating and isotope-geochemical study of detrital zircons from the Late Precambrian sandstones of the South Timan (Dzhhezhim-Parma Ridge)] / N. B. Kuznetsov, L. M. Natapov, E. A. Belousova, U. L. Griffin, S. O'Reilli [et al.] // Reports of the Academy of Sciences. – 2010. – Vol. 435, № 6. – P. 798–805.
8. Nikulova, N. Yu. Veshchestvennyi sostav i osobennosti formirovaniya metaosadochnykh porod fundamenta Vadyavozhskogo vystupa (Nemskaya vozvyshennost, Yuzhnyi Timan) [Material composition and formation particularities of metasedimentary rocks of the basement of the Vadyavozhsky Ledge (Nemskaya Upland, South Timan)] / N. Yu. Nikulova // Regionalnaya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2017. – № 69. – P. 23–32.
9. Kolesnikov, A. V. Biota ediakarskogo tipa v verkhnem dokembrii Timanskogo kryazha (vozvyshennost Dzhhezhim-Parma, respublika Komi) [Biota of the Ediacaran type in the Upper Precambrian of the Timan Ridge (Dzhhezhim-Parma Upland, Komi Republic)] / A. V. Kolesnikov, I. V. Latysheva, A. V. Shatsillo, N. B. Kuznetsov, A. S. Kolesnikov [et al.] // Reports of the Russian Academy of Sciences. Earth Sciences. – 2023. – Vol. 510, № 1. – P. 61–65. – DOI 10.31857/S2686739722602964.
10. Khubanov, V. B. U-Pb izotopnoe datirovanie tsirkonov iz PZ3-MZ magmaticheskikh kompleksov Zabaikalya metodom magnitno-sekturnoi mass-spektrometrii s lazernym probotooborom : protsedura opredeleniya i sopostavlenie s SHRIMP dannymi [U-Pb isotope dating of zircons from PZ3-MZ igneous complexes of Transbaikalia using magnetic sector mass spectrometry with laser sampling : determination procedure and comparison with SHRIMP data] / V. B. Khubanov, M. D. Buyantuev, A. A. Tsygankov // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2016. – Vol. 57, № 1. – P. 241–258.
11. Pystin, A. M. U-Pb (LA-SF-ICP-MS) vozrast i veroyatnye istochniki snosa detritovykh tsirkonov iz terrigennykh otlozhenii verkhnego dokembriya Pripolyarnogo Urala [U-Pb (LA-SF-ICP-MS) age and probable sources of detrital zircons from terrigenous deposits of the Upper Precambrian of the Subpolar Urals] / A. M. Pystin, O. V. Grakova, Yu. I. Pystina, E. V. Kushmanova, K. S. Popvasev [et al.] // Litosfera [Lithosphere]. – 2022. – Vol. 22, № 6. – P. 741–760. – DOI 10.24930/1681-9004-2022-22-6-741-760.
12. Ulyasheva, N. S. Pervye rezul'taty U-Pb LA-SF-ICP-MS-datirovaniya detritovykh tsirkonov iz srednerifeiskikh (?) terrigennykh otlozhenii Polyarnogo Urala [First results of U-Pb LA-SF-ICP-MS dating of detrital zircons from Middle Riphean (?) terrigenous deposits of the Polar Urals] / N. S. Ulyasheva, Yu. I. Pystina, A. M. Pystin, O. V. Grakova, V. B. Khubanov // Reports of the Academy of Sciences. – 2019. – Vol. 485, № 4. – P. 488–492. – DOI 10.31857/S0869-56524854488-492.
13. Romanyuk, T. V. Pervye rezul'taty U/Pb LA-ICP-MS datirovaniya detritnykh tsirkonov iz verkhnerifeiskikh peschanikov Bashkirkoskogo antiklinoriya (Yuzhnyi Ural) [First results of U/Pb LA-ICP-MS dating of detrital zircons from Upper Riphean sandstones of the Bashkir anticlinorium (Southern Urals)] / T. V. Romanyuk, A. V. Maslov, N. B. Kuznetsov, E. A. Belousova, Yu. L. Ronkin [et al.] // Reports of the Academy of Sciences. – 2013. – Vol. 452, № 6. – P. 642. – DOI 10.7868/S0869565213310174.

14. Andreichev, V. L. U-Pb (LA-ICP-MS) возраст detritovykh tsirkonov iz metaosadochnykh porod osnovaniya verkhnedokembriiskogo razreza Severnogo Timana [U-Pb (LA-ICP-MS) age of detrital zircons from metasedimentary rocks of the basement of the Upper Precambrian section of the North Timan] / V. L. Andreichev, A. A. Soboleva, V. B. Khubanov, I. D. Sobolev // Bulletin of the Moscow Society of Natural Scientists. Geological Department]. – 2018. – Vol. 93, № 2. – P. 14–26.
15. Brusnitsyna, E. A. Rezul'taty issledovaniy U-Pb-izotopnogo vozrasta oblomochnykh tsirkonov iz sredne-verkhnereifeiskikh otlozhenii Chetlaskogo kamnya (Timanskoi gryady) [Study results of the U-Pb isotope age of detrital zircons from the Middle-Upper Riphean deposits of the Chetlas stone (Timan Ridge)] / E. A. Brusnitsyna, V. B. Ershova, A. K. Khudolei, T. Andersen // Problemy tektoniki i geodinamiki zemnoi kory i mantii [Issues of Tectonics and Geodynamics of the Earth's Crust and Mantle] : Materials of L Tectonic Meeting]. – Moscow : GEOS, 2018. – Vol. 2 – P. 384–388.
16. Latysheva, I. V., U-Pb возраст zeren detritovogo tsirkona iz oblomochnykh porod dzhezhimskoi svity (verkhnei dokembrii Yuzhnogo Timana) [U-Pb age of detrital zircon grains from clastic rocks of the Dzhezhim Formation (Upper Precambrian of South Timan)] / I. V. Latysheva, N. B. Kuznetsov, A. V. Shatsillo, A. V. Kolesnikov, A. V. Strashko [et al.] // Geodinamicheskaya evolyutsiya litosfery Tsentral'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa ot okeana k kontinentu [Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt from Ocean to Continent] : Proceedings of the scientific conference. – Irkutsk : Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2022. – Vol. 20. – P. 166–69.
17. Grakova, O. V. Geokhimiya vysokofosforistogo tsirkona iz verkhnereifeiskikh peschanikov Yuzhnogo Timana [Geochemistry of high-phosphorus zircon from Upper Riphean sandstones of the South Timan] / O. V. Grakova, S. G. Skublov, N. Yu. Nikulova, O. L. Galankina // Geokhimiya [Geochemistry]. – 2023. – Vol. 68, № 9. – P. 947–963. – DOI 10.31857/S0016752523090054.
18. Votyakov, S. L. Kristallokhimiya i fizika radiatsionno-termicheskikh effektiv v ryade U-Th-soderzhashchikh mineralov kak osnova dlya ikh khimicheskogo mikrozonirovaniya [Crystal chemistry and physics of radiation-thermal effects in a number of U-Th-containing minerals as a basis for their chemical microprobe dating] / S. L. Votyakov, Yu. V. Shchapova, V. V. Khiller. – Ekaterinburg : Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2011. – 336 p.
19. Pystin, A. M. Novye dannye o vozraste granitoidov Pripol'yarnogo Urala v svyazi s problemoi vydeleniya kozhimskoi srednerifeiskoi granit-riolitovoi formatsii [New data on the age of granitoids of the Subpolar Urals in view of the identification problem of the Kozhimsk Middle Riphean granite-rhyolite formation] / A. M. Pystin, Yu. I. Pystina // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2011. – № 4(8). – P. 73–78.
20. Romanyuk, T. V. Paleotektonicheskie i paleogeograficheskie obstanovki nakopleniya nizhnereifeiskoi aiskoi svity Bashkirkogo podnyatiya (Yuzhnyi Ural) na osnove izucheniya detritovykh tsirkonov metodom "TerraneChrono®" [Paleotectonic and paleogeographic settings of accumulation of the Lower Riphean Ai Formation of the Bashkir Uplift (Southern Urals) based on the study of detrital zircons by the TerraneChrono® method] / T. V. Romanyuk, N. B. Kuznetsov, E. A. Belousova, V. M. Gorozhanin, E. N. Gorozhanina // Geodinamika i tektonofizika [Geodynamics and Tectonophysics]. – 2018. – Vol. 9, № 1. – P. 1–37. – DOI 10.5800/GT-2018-9-1-0335
21. Rubatto, D. Zircon trace element geochemistry : partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism / D. Rubatto // D Chem. Geol. – 2002. – Vol. 184. – P. 123–138.
22. Verma, S. P. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins / S. P. Verma, J. S. Armstrong-Altrin // Chem. Geol. – 2013. – № 355. – P. 117–133.
23. Harrison, T. M. Temperature spectra of zircon crystallization in plutonic rocks / T. M. Harrison, E. B. Watson, A. B. Aikman // Geology. – 2007. – № 35 (7). – 635–638. – DOI 10.1130/G23505A.1.
24. Kaczmarek, M. A. Trace element chemistry and U-Pb dating of zircons from oceanic gabbros and their relationship with whole rock composition (Lanzo, Italian Alps) / M. A. Kaczmarek, O. Müntener, D. Rubatto // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2008. – № 155 (3). – P. 295–312. – DOI 10.1007/s00410-007-0243-3.
25. Kuznetsov, N. B. Pervye U/Pb-dannye o vozrastakh detritnykh tsirkonov iz peschanikov verkhnereifeiskoi takatinskoi svity Zapadnogo Urala (v svyazi s problemoi korennykh istochnikov ural'skikh almazonosnykh rossypei) [The first U/Pb data on the ages of detrital zircons from sandstones of the Upper Emsian Takatin Formation of the Western Urals (in view of the problem of the primary sources of the Ural diamond-bearing placers)] / N. B. Kuznetsov, T. V. Romanyuk, A. V. Shatsillo, S. Yu. Orlov, V. M. Gorozhanin [et al.] // Reports of the Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 455, № 4. – P. 427–432.
26. Bogdanova, S. V. The East European Craton (Baltica) before and during the assembly of Rodinia / S. V. Bogdanova, B. Bingen, R. Gorbatshev, T. N. Kheraskova, V. I. Kozlov [et al.] // Precambrian Res. – 2008. – V. 160. – P. 23–45.
27. Slabunov, A. Geological review. Archean-Paleoproterozoic crustal evolution of the Belomorian Province (Fennoscandian Shield) and the tectonic position of eclogites / A. Slabunov, V. Balagansky, A. Shchipansky // Early Precambrian Eclogites of the Belomorian Province, Fennoscandian Shield. Field Guidebook. – Petrozavodsk, 2019. – P. 5–10.

### Благодарность (госзадание)

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по темам НИР: «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского сегмента литосферы» (ГР № 122040600012-2) и «Осадочные формации: вещество, седиментация, литогенез, геохимия, индикаторы литогенеза, реконструкция осадконакопления» (ГР № 122040600013-9).

### Acknowledgements (state task)

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences on the research themes: "Deep structure, geodynamic evolution, interaction of geospheres, magmatism, metamorphism, and isotopic geochronology of the Timan-North Ural lithosphere segment" (state registration № 122040600012-2) and "Sediment formations: matter, sedimentation, lithogenesis, geochemistry, lithogenesis indicators, sedimentation reconstruction" (state registration № 122040600013-9).

### Информация об авторах:

**Гракова Оксана Васильевна** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [ovgrakova@geo.komisc.ru](mailto:ovgrakova@geo.komisc.ru)).

**Никулова Наталия Юрьевна** – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; <https://orcid.org/0000-0002-1511-6124> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [Nikulova@geo.komisc.ru](mailto:Nikulova@geo.komisc.ru)).

**Хубанов Валентин Борисович** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геологического института им. Н. Л. Добрецова СО РАН; <https://orcid.org/0000-0001-5237-6614> (670047, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6а; e-mail: [khubanov@mail.ru](mailto:khubanov@mail.ru)).

### About the authors:

**Oksana V. Grakova** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0001-5917-9218> (54 Pervomayskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [ovgrakova@geo.komisc.ru](mailto:ovgrakova@geo.komisc.ru)).

**Natalia Yu. Nikulova** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0002-1511-6124> (54 Pervomayskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [Nikulova@geo.komisc.ru](mailto:Nikulova@geo.komisc.ru)).

**Valentin B. Khubanov** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Head of Laboratory, Geological Institute named after N. L. Dobretsov of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, <https://orcid.org/0000-0001-5237-6614> (6a Sakhyanova st., Ulan-Ude, Russian Federation, 670047; e-mail: [khubanov@mail.ru](mailto:khubanov@mail.ru)).

### Для цитирования:

Гракова, О. В. U/Pb-возраст и источники сноса обломочного циркона из верхнерифейских песчаников Немской возвышенности (Южный Тиман) / О. В. Гракова, Н. Ю. Никулова, В. Б. Хубанов // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 76–86.

### For citation:

Grakova, O. V. U/Pb-vozrast i istochniki snosa oblomochnogo cirkona iz verhnerrifejskih peschanikov Nemskoj vozvyshennosti (Yuzhnyj Timan) [U/Pb age and sources of detrital zircon from Upper Rhiphaean sandstones of the Nemskaaya Upland (South Timan)] / O. V. Grakova, N. Yu. Nikulova, V. B. Khubanov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 76–86.

Дата поступления статьи: 04.03.2024

Прошла рецензирование: 31.03.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 04.03.2024

Reviewed: 31.03.2024

Accepted: 27.03.2024

## Комплексная интерпретация геофизических данных в районе локальных гравитационных аномалий на севере Волго-Уральской антеклизы

Н. В. Конанова, В. В. Удоратин,  
А. Ш. Магомедова, Ю. Е. Езимова

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
konanova@geo.komisc.ru

### Аннотация

В работе использованы авторские материалы результатов интерпретации поля силы тяжести по программе Golden Software SURFER и рекогносцировочных геолого-геофизических работ, проведенных в рамках полевых исследований за период 2016–2023 гг. в области сочленения Кировско-Кажимского прогиба, Коми-Пермяцкого свода Волго-Уральской антеклизы с Вычегодским прогибом Мезенской синеклизы, осложненных породами Локчимского «траппового» поля в районе выявленных нами локальных гравитационных аномалий повышенной интенсивности. Выделены кусты локальных магнитных аномалий на Фроловском и Четдинском участках и одиночная – на Локчимском. Фроловский участок обогащен неокатанными хромшпинелидами, содержание  $Cr_2O_3$  в некоторых из них превышает 64 % [1]. На периферии интенсивной Четдинской гравитационной аномалии обнаружена [2, 3] одноименная радоновая аномальная зона с высокими значениями объемной активности радона.

Мирагеническая специфика Четдинского объекта по результатам интерпретации, скорее всего, связана с особенностями формирования Кировско-Кажимского прогиба Волго-Уральской антеклизы, Фроловского – вероятно, с домезозойским магматизмом «основного» состава (?) в районе краевых дислокаций северной оконечности Волго-Уральской антеклизы, а Локчимского – с продуктами дефлюидизации разуплотненных магнитных пород в зоне ответственности крутого западного борта Коми-Пермяцкого свода.

### Ключевые слова:

глубинное строение, тектоника, разломные зоны, аномальное гравитационное и магнитное поля, геоплотностные разрезы, радоновая аномалия, объемная активность радона

## Integrated interpretation of geophysical data in the area of local gravity anomalies in the North of the Volga-Ural antecline

N. V. Konanova, V. V. Udoratin,  
A. Sh. Magomedova, Yu. E. Ezimova

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar  
konanova@geo.komisc.ru

### Abstract

The complex work uses only original materials of both the measurement results using the Golden Software SURFER program and the results of reconnaissance geological and geophysical field surveys carried out in 2017–2023. The study covered the area of junction of the Kirov-Kazhim trough, the Komi-Permian arch of the Volga-Ural antecline with the Vycheгда trough of the Mezen syncline, complicated by the rocks of the Lokchim “trap” field in the area of high-intensity local gravitational anomalies we discovered. The clusters of local magnetic anomalies have been identified in the Frolovsk and Chetdin areas and a single one – in Lokchim. Frolovsk is enriched with unrounded chrome spinels, the  $Cr_2O_3$  content in some of them exceeds 64 % [1]. On the periphery of the intense Chetdin gravitational anomaly, we have discovered the same-name radon anomalous zone with high values of volumetric radon activity [2, 3].

The study results on the miragenic characteristics of the Chetdin location seem to be related to the formation features of the Kirov-Kazhim trough of the Volga-Ural antecline, those of the Frolovsk location – to the pre-Mesozoic magmatism of the “basic” composition (?) in the area of edge dislocations of the northern end of the Volga-Ural antecline, and Lokchim – to the defluidization products of decompressed magnetic rocks on the steep western side of the Komi-Permian arch.

### Keywords:

deep structure, tectonics, fault zones, anomalous gravitational and magnetic fields, geo-density sections, radon anomaly, volumetric radon activity

## Введение

Объекты исследований расположены на юге Республики Коми (далее – РК) в зоне сочленения Сысольского свода, Кировско-Кажимского прогиба, Коми-Пермяцкого свода Волго-Уральской антеклизы с Вычегодским прогибом Мезенской синеклизы [4, 5], осложненных породами Локчимского «траппового» поля [6, 7] (рис. 1, а, б). Геолого-геофизическая изученность на севере Волго-Уральской антеклизы в пределах наших участков рекогносцировочных работ ограничивается кондиционными съемками гравитационного и магнитного полей масштаба 1 : 200 000, глубокими параметрическими скважинами Сысола-1 и Лопыдино-1, съемками геологоразведочных работ масштаба 1 : 200 000. Три сейсмических профиля с хорошим качеством временных разрезов выходят на глубокие скважины: Лопыдино-1, который заканчивается вблизи северной границы Четдинского участка; Кельтма-1, расположенный за восточными пределами площади исследований; Сысола-1, отработанный в ~5 км к западу от скважины, также за пределами западной границы широтной полосы исследований. Количество сейсмических разрезов явно недостаточное, строго говоря, можно констатировать практически полное их отсутствие на площади исследований.

Особенности глубинного строения северо-востока Русской плиты по профилю MEZTIMPESN, проходящего в ~50 км севернее площа-

ди исследований, свидетельствуют о том, что разуплотненное вещество верхней мантии Кировско-Кажимского и Вычегодского прогибов характеризуется отсутствием протяженных сейсмических горизонтов и, вероятно, имеет в своем составе породы частичного плавления продуктов

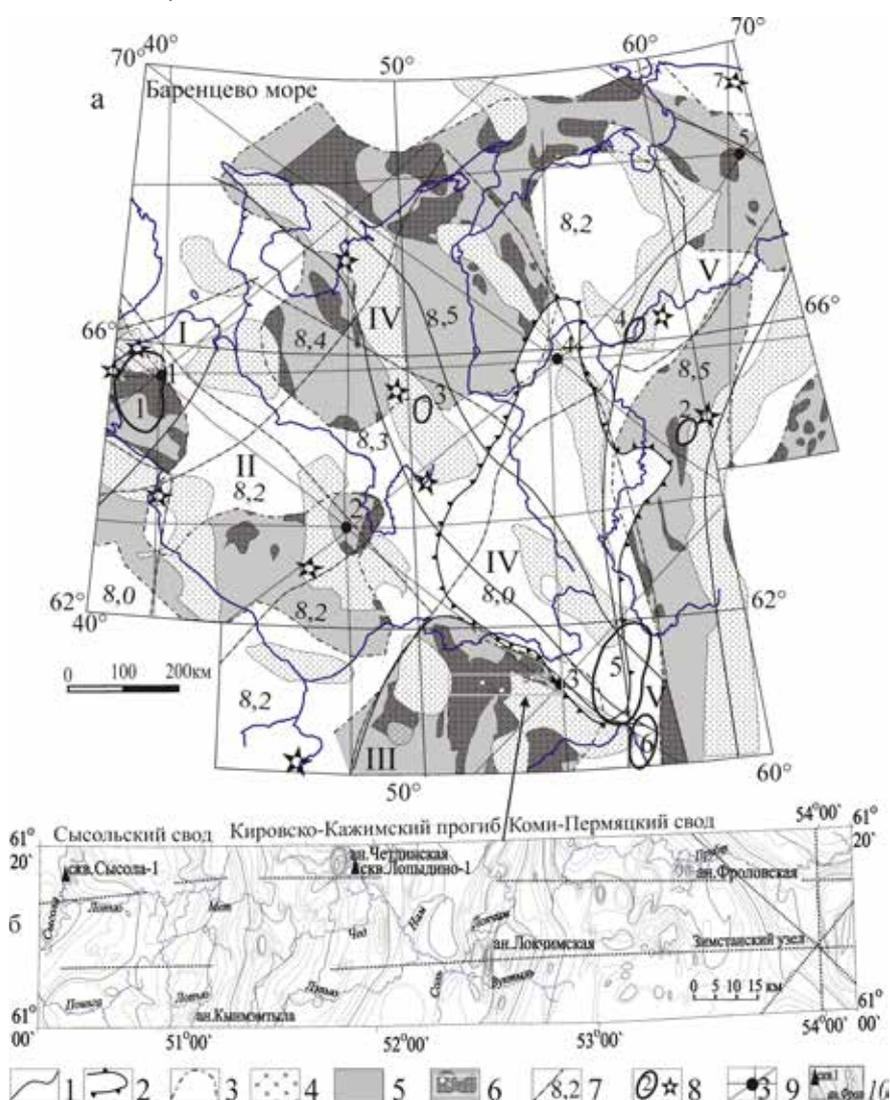


Рисунок 1. Глубинные критерии коренной алмазоносности европейского Севера России (а), участок детализации (б).

Условные обозначения: 1 – границы алмазоносных субпровинций [по: 8]: I – Балтийского щита, II – Московско-Мезенской синеклизы, III – Волго-Уральской антеклизы; минерогенические зоны: IV – Тиманская, V – Приуральская; 2 – повышенная мощность нижней коры [по: 9]; 3 – повышенная мощность верхней коры [по: 8]; 4 – плотные породы земной коры; 5 – зоны насыщения глубинного флюидизата в областях [по: 9] с пониженной мощностью нижней коры и повышенной мощностью верхней коры; 6 – фундамент «ультраосновного» состава с повышенными значениями магнитного и гравитационного полей в зонах 5, серый прямоугольник – площадь исследований, ромб – перспективные на коренную алмазоносность геофизические аномалии: 1 – Четдинская, 2 – Локчимская, 3 – Фроловская; 7 – границы блоков верхней мантии, цифрами обозначены граничные скорости сейсмических волн в верхней мантии [по: 9]; 8 – кимберлитовые поля и находки алмазов в четвертичных отложениях [по: 8]: 1 – Зимнего берега, 2 – Урала (Хартесское), 3 – Тимана; 4 – лампроитовое поле гряды Чернышева; «туффизитовые» поля «уральского» типа: 5 – Красновишерское, 6 – Чикманское, 7 – алмазы Карской астроблемы; 9 – узлы пересечения ортогональных разломов: 1 – Зимнебережный, 2 – Вашкинский, 3 – Зимстанский, 4 – Ижма-Печорский, 5 – Коротаихинский; 10 – аномалии поля силы тяжести [10], изолинии проведены через 1 усл. ед., параметрические скважины и локальные аномалии поля силы тяжести.

Figure 1. Depth criteria of the root diamondiferous content of the European North of Russia (a), detail plot (b).

Symbols: 1 – boundaries of diamondiferous subprovinces [by: 8]: I – Baltic Shield, II – Moscow-Mezen Syncline, III – Volga-Ural Syncline; mineralogical zones: IV – Timan, V – Sub-Ural; 2 – increased thickness of the lower crust [by: 9]; 3 – increased thickness of the upper crust [by: 8]; 4 – dense rocks of the Earth's crust; 5 – saturation zones of the deep fluidisate in the areas [by: 9] with the lowered thickness of the lower crust and increased thickness of the upper crust; 6 – basement of "ultrabasic composition" with increased values of magnetic and gravitational fields in zones 5, grey rectangle – study area, rhombus – geophysical anomalies promising by root diamond content: 1 – Chetdin, 2 – Lokchim, 3 – Frolovsk; 7 – boundaries of the upper mantle blocks, numbers denote boundary velocities of seismic waves in the upper mantle [by: 9]; 8 – kimberlite fields and diamond findings in Quaternary sediments [by: 8]: 1 – Zimnyy Bereg, 2 – Ural (Khartesskoe), 3 – Timan; 4 – lamproite field of the Chernyshev ridge; "tuffisite" fields of the "Ural" type: 5 – Krasnovisherskoe, 6 – Chikman, 7 – diamonds of the Kara astroblema; 9 – intersection nodes of orthogonal faults: 1 – Zimnebrezhny, 2 – Vashkinsky, 3 – Zimstansky, 4 – Izhma-Pechora, 5 – Korotaikha; 10 – anomalies of the gravity field [10], isolines are drawn after next 1 standard unit, parametric wells and local anomalies of the gravity field.

«горячей» астеносферы. А уплотненные породы верхней мантии Сысольского свода характеризуются наличием протяженных площадок отражения и преломления сейсмических волн, которые, вероятно, испытали процессы дифференциации вещества. На границе разнородных мантийных блоков обязательно возникает зона релаксаций температур, давлений и напряжений, которая способствует выносу мантийных ксенолитов по ослабленным зонам к поверхности Земли. Границы разнородных мантийных блоков находят свое продолжение и в консолидированной части земной коры в виде глубинных разломов [11]. С такими разломами – возможными транспортерами глубинных флюидов – связаны настоящие исследования.

При районировании пород кристаллического фундамента по данным гравитационного и магнитного полей выявлено [12], что северная часть Волго-Уральской антеклизы характеризуется наличием пород «ультраосновного» и «основного» составов. При одинаковой глубине залегания архейско-нижнепротерозойского кристаллического фундамента Сысольского и Коми-Пермяцкого сводов Сысольский свод сложен плотными и преимущественно немагнитными породами «основного» состава, а Коми-Пермяцкий свод и разделяющий эти своды Кировско-Кажимский прогиб – плотными и в основном магнитными породами «ультраосновного» состава. Сысольский свод обрамлен на периферии оторочкой «ультраосновных» пород, а Коми-Пермяцкий свод – пород «основного» состава. Поэтому особое внимание авторы уделяют периферии вышеуказанных сводов.

На северо-восточной окраине Восточно-Европейской платформы при изучении особенностей глубинного строения земной коры, литосферной и подлитосферной верхней мантии по геофизическим данным выявлены субмеридиально-субширотная и диагональная системы разломов глубинного заложения. Наиболее четко отображается диагональная Зимнебережно-Красновишерская линейная система разломов, в пределах которой обнаружены Зимнебережный, Вашкинский и Зимстанский узлы пересечения глубинных разломов (рис. 1, а), вероятно, обладающие сходными минерагеническими особенностями. Зимстанский узел приурочен к зоне сочленения Коми-Пермяцкого свода и Вычегодского прогиба [13]. Вблизи Зимстанского узла проявляется наличие магнитных пород Локчимского «траппового» поля [6, 7]. В его окрестностях нами обнаружены (рис. 1, б) Фроловская, Четдинская, Локчимская и другие интенсивные локальные гравитационные аномалии [14, 15]. Эти локальные аномалии поля силы тяжести и послужили объектами для проведения рекогносцировочных полевых работ с целью обнаружения изометричных локальных аномалий магнитного поля, предположительно обусловленных приповерхностными «основными» («ультраосновными» (?)) породами.

По глубинным сейсмическим критериям прогнозно-минерагенических зон в створе фрагмента геотраверса Костомукша – Семипалатинск, проходящего в ~50–100 км юго-западнее района исследований, Н. К. Булин и А. В. Егоркин выявили потенциально кимберлитовую зону на периферии Сысольского свода [16]. Следует от-

метить, что геологи городов Сыктывкар и Ухта всегда утверждали, что признаки алмазоносного кимберлитового магматизма в Республике Коми тяготеют к периферии Сысольского и Коми-Пермяцкого сводов [17].

Б. П. Богдановым предложено обоснование критериев поисков алмазов европейского Севера России и его периферии [18], в котором главным индикатором являются Волго-Тиманский рифейский барьерный риф и одиночные рифы, образовавшиеся на перикратонном склоне Русской плиты. На обширном фактическом материале он показывает, что рифы пронизаны разломами взбросового характера, являющимися путями проникновения алмазов, их спутников, редких и редкоземельных элементов к дневной поверхности в эпохи тектонической активизации от рифея-венда до мезозоя. Исследователь делает вывод о том, что к разломным зонам рифового пространства приурочены трубки взрыва, древние вулканы и прочие источники магматических проявлений.

На рис. 1, а приводятся результаты регионального сопоставления схем глубинного строения земной коры и верхней мантии европейского Северо-Востока России разных авторов, в том числе и наших, с вынесенными на них месторождениями и находками алмазов. В результате проведенных исследований выявлены вероятные глубинные критерии коренной алмазоносности европейского Северо-Востока России, которые, по нашему мнению [14, 19] определяются наличием:

- пониженных значений сейсмических скоростей в верхней мантии;
- областей с повышенной мощностью верхней коры и пониженной толщиной нижней коры, зон насыщения флюидизата в этих областях;
- локализованных участков с аномальными плотностными характеристиками в земной коре на разных ее уровнях близ узлов пересечения ортогональных разломов;
- пород фундамента с повышенными значениями плотности и магнитной восприимчивости узлов пересечения разломов различных направлений;
- узлов пересечения разломов различных направлений.

Из этих региональных сопоставлений с учетом правила Клиффорда следует, что на северо-востоке Русской плиты существует еще один перспективный участок в плане обнаружения продуктов кимберлитового магматизма, который располагается на севере Волго-Уральской антеклизы в зоне сочленения Сысольского и Коми-Пермяцкого сводов с Кировско-Кажимским прогибом вблизи Зимстанского узла пересечения ортогональных разломов [19].

Вдоль перспективной на коренную алмазоносность полосы субширотного разлома проводилась ревизия гравитационного поля, в результате которой были выявлены Фроловская, Четдинская, Локчимская и другие локальные аномалии поля силы тяжести повышенной интенсивности (рис. 1, б). В их пределах осуществлялись полевые рекогносцировочные геофизические работы, результаты которых приводятся в данной статье.

С учетом вышеизложенного основными целями полевых рекогносцировочных геолого-геофизических работ явились уточнение вероятной минерагенической специфики выявленных локальных аномалий поля силы тяжести и поиски изометричных аномалий магнитного поля, обусловленных близповерхностными объектами перспективных на обнаружение полезных ископаемых.

## Материалы и методы

**Гравитационное поле.** В пределах локальных гравитационных аномалий ( $V_z$ ) создана база данных XYZ в условных единицах поля силы тяжести и их прямоугольных координат [10] в программе Microsoft EXCEL, а созданные по ним grid-файлы использовались при расчетах в программе Golden Software SURFER. Региональный фон ( $V_{z\text{ рф}}$ ) вычисляли в результате осреднения с шагом 1 км в скользящем окне. Размер окна определялся размерами объектов исследований. Локальные аномалии ( $V_{z\text{ лока}}$ ) находили путем вычитания региональной составляющей из исходного поля ( $V_z$ ). Для увеличения глубины исследований поэтапно вычисляли остаточные аномалии ( $V_{z\text{ ост}}$ ), которые также подвергали аналогичным расчетам на разных уровнях-срезах. Для оконтуривания блоков с различными значениями плотности пород использовали вертикальные и горизонтальные производные первого ( $V_{zz}$  и  $V_{zx}$ ) и второго ( $V_{zzz}$  и  $V_{zxx}$ ) порядков. Очевидно, что точки перехода через ноль вторых производных и экстремумы первых производных отражают границы разнородных геоблоков и разломные зоны. Построение плотностных границ проводилось по градиентам первого и второго порядков и по локальным аномалиям, обусловленным влиянием аномальных масс с повышенными и пониженными значениями плотности.

**Магнитное поле.** Магнитометрическая съемка в пределах выявленных локальных аномалий поля силы тяжести выполнялась по стандартной методике приборами «МИНИ-МАГ» по системе региональных рекогносцировочных профилей с шагом между пунктами наблюдений 50 м и участков детализации – с шагом 10 м при одновременной записи вариаций магнитного поля. Точка наблюдений вариаций имела значение опорной для каждого участка исследований. Географическую привязку осуществляли с помощью GPS-навигатора. Наземные магниторазведочные работы проводили в рамках полевых сезонов 2016–2023 гг. На каждом участке построены схематические карты аномального магнитного поля с профилями и пикетами наблюдений, отражающие характер поведения магнитного поля. Погрешность измерений не превышала 2 нТл.

**Радиометрические исследования.** Измерения объемной активности радона (далее – ОАР) в почвенном воздухе осуществляли с помощью портативного радиометра «РРА-01М-01», относительная погрешность которого при измерениях ОАР составляла 20 %. Радиометрические исследования выполняли в летний период, в сухую погоду. Расстояние между пунктами наблюдения составляло 1 км. На каждом пункте наблюдения для уменьшения влияния почвенного слоя и растительности бурили скважину глубиной 0.5 м и диаметром 0.1 м. Затем скважину прикрыва-

ли накопительной камерой и проводили измерение. Замер продолжался 23 мин, из которых первые 3 мин происходила закачка воздуха из скважины посредством насоса. После каждого измерения камеру радиометра очищали окружающим воздухом в течение 4 мин [2, 3].

**Шлиховое опробование** отработывали по стандартной методике вблизи выявленных локальных магнитных аномалий в руслах ближайших ручьев. Объем проб составлял 10–40 л.

## Результаты и их обсуждение

В геологическом строении севера Волго-Уральской антеклизы и прилегающей к ней части Вычегодского прогиба Мезенской синеклизы принимают участие два структурно-формационных этажа. Нижний соответствует кристаллическому фундаменту платформы. Он сложен метаморфогенными породами архея и нижнего протерозоя. Глубина залегания кристаллического фундамента достигает 1.6–3.5 км, а в Вычегодском прогибе – 3.5–4.5 км и более. Верхний этаж представлен образованиями осадочного чехла рифейско-вендского, девонского, каменноугольного, пермского, триасового и юрского возрастов, перекрытыми четвертичными отложениями [4, 5, 18, 20 и др.]. При построении геоплотностных разрезов наиболее четко обнаруживается граница AR-PR<sub>1</sub> кристаллического фундамента, а в осадочном чехле прослеживаются еще две геоплотностные границы, связанные с кровлями R-V и, вероятно, V<sub>3</sub>-P<sub>2</sub> отложений.

**Фроловский участок** расположен в зоне краевых дислокаций северо-восточного склона Волго-Уральской антеклизы, а по структуре осадочного чехла он приурочен к юго-западному борту Вычегодского прогиба Мезенской синеклизы. Фроловская гравитационная аномалия (рис. 2, а) имеет форму подковы (3х3,5 км) с двумя максимумами. Плотностной разрез (рис. 2, б) пересекает оба эпицентра с запада на восток, длина его составляет 16 км, а глубина построений – 6 км. Поверхность кристаллического AR-PR<sub>1</sub> фундамента в зоне восточной системы разломов испытывает резкое погружение с 2.1 до 3.5 км и потерю корреляции. Аномалеобразующие объекты расположены в пределах осадочного чехла, ограничены вертикальными разломами и поверхностями двух геоплотностных границ, связанных с кровлей R-V и V<sub>3</sub>-P<sub>2</sub> отложений. Характер их простирания в разрезе позволяет сделать вывод о том, что осадочные породы повышенной плотности внутри данного интервала разреза, вероятно, содержат элементы пород «основного» («ультрасоснового» (?)) состава.

Радоновая съемка проводилась в ограниченном объеме из-за отсутствия дорог в пределах Фроловского участка в зоне ответственности восточной системы разломов. Вероятно, повышенные значения объемной активности радона в 1300 и 2300 Бк/м<sup>3</sup> следует увязывать с краевыми дислокациями сбросового типа.

Рекогносцировочные (рис. 2, в) магнитометрические работы на Фроловском участке позволили раскрыть характер взаимоотношения с гравитационными аномалиями. Выявлено, что высокоградиентные положительные

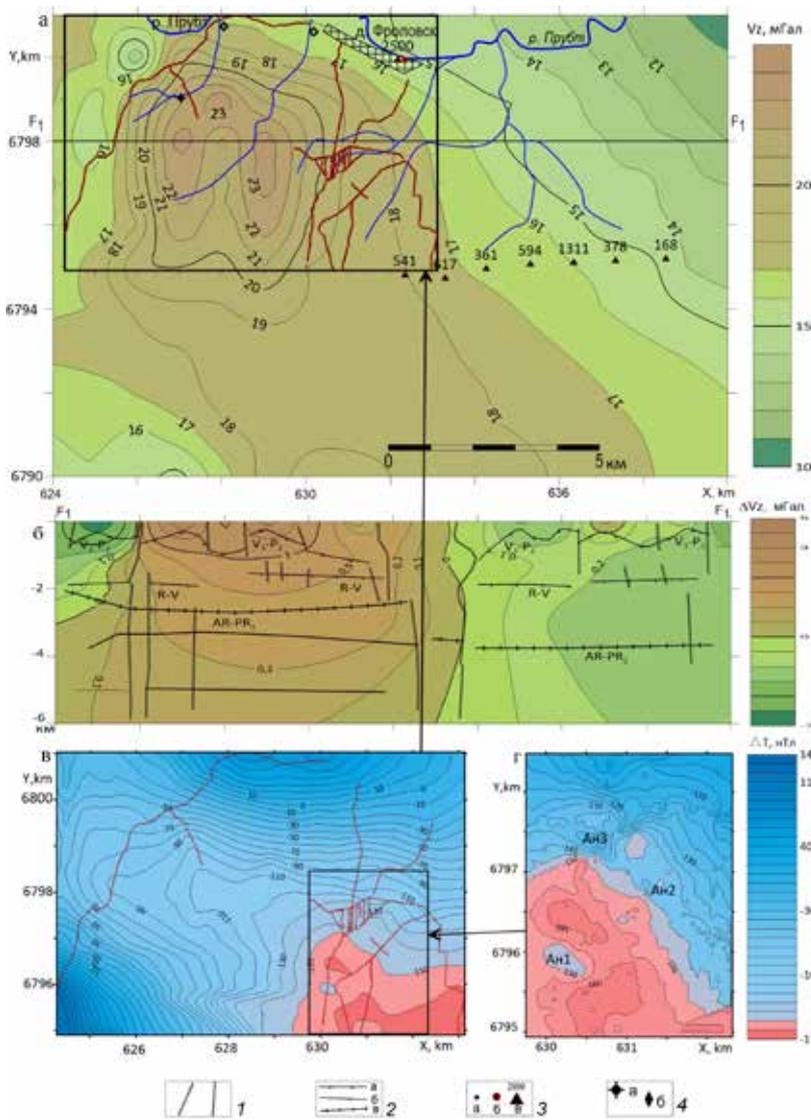


Рисунок 2. Результаты интерпретации геолого-геофизических данных, Фроловский участок: а – поле  $V_2$ ; б – геоплотностной разрез по линии профиля  $F_1$ ; в – аномальное магнитное поле  $\Delta T_g$ ; г – детализационный участок магнитного поля.

Условные обозначения (здесь и рис. 3, 4): 1 – разломы; 2 – геоплотностные границы: а – кровля  $V_3-P_2$  (?) комплекса, б – кровля R-V отложений, в – кровля AR-PR<sub>1</sub> фундамента; 3 – точки наблюдения: а – магнитного поля  $\Delta T_g$ , б – вариаций  $\Delta T_g$ , в – радоновой съемки, цифрами сверху указаны средние значения объемной активности радона; 4 – точки обнаружения: а – туффилов, б – хромшпинелидов.

Figure 2. Interpretation results of geological and geophysical data, Frolovsk area: а –  $V_2$  field; б – geo-density section along  $F_1$  profile; в – anomalous magnetic field  $\Delta T_g$ ; г – detailed part of the magnetic field.

Symbols (here and Figs. 3, 4): 1 – faults; 2 – geo-density boundaries: а – hanging wall of the  $V_3-P_2$  (?) complex, б – hanging wall of R-V sediments, в – hanging wall of AR-PR<sub>1</sub> basement; 3 – observation points: а – magnetic field  $\Delta T_g$ , б – variations  $\Delta T_g$ , в – radon survey, figures above indicate average values of radon volumetric activity; 4 – detection points of: а – tuffites, б – chromspinelides.

локальные аномалии поля силы тяжести располагаются в спокойном аномальном магнитном поле с пониженными значениями магнитной восприимчивости. Плотные немагнитные объекты характеризуют распространение пород «основного» состава или интерпретируются как выступы изверженных и метаморфических немагнитных пород или сочетанием обоих факторов. Очевидно, что домезозойский внутриплитный магматизм Восточно-Европейской платформы, предположенный ранее в результате интерпретации высокоточной аэромагнитной съемки [6, 7], или

внутриплитный базитовый вулканизм [21] находят отражение и в результате комплексной интерпретации гравитационного и магнитного полей Фроловского участка.

Детальные магниторазведочные работы позволили выявить (рис. 2, г) куст локальных магнитных аномалий, представленный тремя изометричными аномалиями интенсивностью до 15 нТл и размерами в поперечнике 200–450 м. Глубины залегания аномалеобразующих объектов рассчитывались по характерным точкам графиков аномального магнитного поля методом касательных. Искомые объекты представлены в виде штоков (диатрем) неправильной формы вертикального заложения, верхние кромки которых расположены на глубине 80–100 м. Магнитоактивные тела приурочены к зоне перехода от высокоградиентного аномального магнитного поля на севере участка к спокойному полю в его центральной части.

На присутствие близповерхностных тел «основного» состава указывают многочисленные находки неокатанных хромшпинелидов идеального октаэдрического габитуса. Результаты микрозондового экспресс-анализа хромшпинелидов свидетельствуют о том, что в некоторых из них содержание  $Cr_2O_3$  превышает 64 %. Минерагеническая специфика Фроловской аномалии оценивается по геолого-геофизическим признакам как производная преимущественно «основных» пород.

**Четдинский участок** расположен на субширотном глубинном разломе в пределах Кировско-Кажимского прогиба в поле развития полосовых аномалий гравитационного поля (рис. 1, б), вытянутых в меридиональном направлении. Аномалия в плане имеет грушевидную форму (4x4 км) (рис. 3, а). Геоплотностной разрез (рис. 3, б) пересекает аномалию с северо-запада на юго-восток. Длина его составляет 18.5 км, а глубина исследований – 7 км. Поверхность кристаллического AR-PR<sub>1</sub> фундамента (?) залегает здесь по гравиметрическим данным на глубине от 2.2 до 2.8 км. Прослежены две геоплотностные границы внутри осадочного чехла, связанные с кровлей R-V и  $V_3-P_2$  (?) отложений.

Аномалеобразующие объекты с высокими значениями плотности ограничиваются вертикальными разломами глубинного (до 6 км) заложения. В верхней части разреза, в зоне распространения пород верхнего структурного этажа ( $V_3-P_2$ ), по гравитационным данным отчетливо

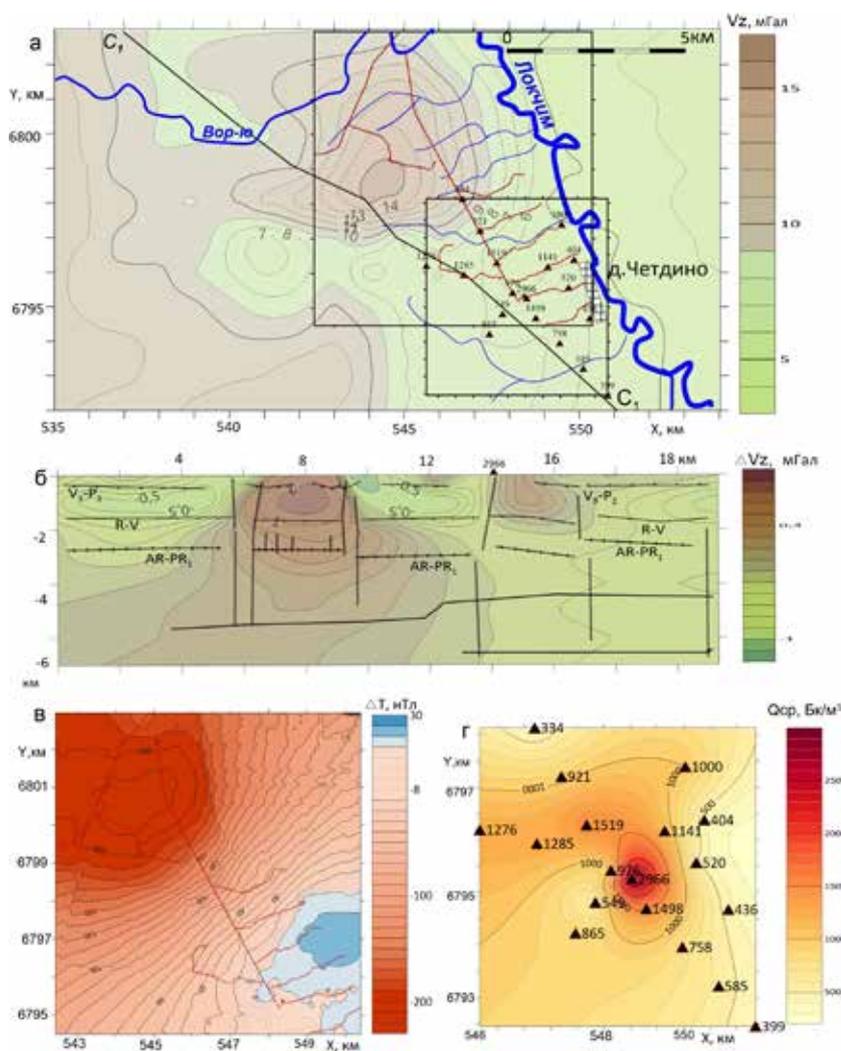


Рисунок 3. Результаты интерпретации геолого-геофизических данных, Четдинский участок: а – гравитационное поле  $V_z$ , б – геоплотностной разрез по линии профиля  $C_1$ , в – аномальное магнитное поле  $\Delta T$ , г – схема изолиний средних значений объемной активности радона.

Figure 3. Interpretation results of geological and geophysical data, Chetdin area: а – gravity field  $V_z$ , б – geo-density section along  $C_1$  profile, в – anomalous magnetic field  $\Delta T$ , г – isolation scheme of average values of radon volumetric activity.

определяются вертикальные разломы, затрудняющие трассирование основных структурно-формационных границ осадочного чехла. Вероятно, они ретушируют местами до полного исчезновения самую верхнюю гравиактивную границу, которая достаточно четко фиксируется на соседних участках.

Магниторазведочные рекогносцировочные работы на Четдинской гравитационной аномалии обрабатывались по стандартной методике. В результате обработки и интерпретации магниторазведочных данных была построена схематическая карта аномального магнитного поля (рис. 3, в), в соответствии с которой наблюдается увеличение значений магнитного поля с северо-запада на юго-восток. Оказалось, что гравитационный максимум в плане совпадает с минимумом аномального магнитного поля, поэтому сделан вывод о том, что он обусловлен породами преимущественно «основного» состава. Тем не менее проведенная рекогносцировочная съемка магнитного поля показала (рис. 3, в), что на юго-восточной периферии Четдинской гравитационной аномальной области, в зоне

субширотного разлома при переходе от минимума магнитного поля к максимуму, присутствует большое количество (рис. 3, в) близко расположенных локальных магнитных аномалий разного знака невысокой интенсивности (2–7 нТл), граничащей с погрешностью измерений. Но бесспорно также, что при проведении детальных магниторазведочных работ количество, интенсивность и форма магнитных аномалий будут уточняться. Именно там была обнаружена Четдинская радоновая аномалия, в эпицентре которой концентрация радона меняется от 3000–7000 до 10 000–12 000 Бк/м<sup>3</sup>.

Радиометрический мониторинг Четдинской радоновой аномалии проводился в течение нескольких полевых сезонов. Площадные наблюдения включали измерения по сети пунктов наблюдения в радиусе 3–6 км от центра аномалии для ее локализации. В результате проведенных исследований оконтурена центральная часть радоновой аномалии с максимальной концентрацией радона, которая имеет округлую форму размером 2х2 км. Средние значения концентрации почвенного радона увеличиваются от 600–800 Бк/м<sup>3</sup> на периферии и до 3800–4800 Бк/м<sup>3</sup> в центре (рис. 3, г). Значения ОАР меняются в зависимости от сезонов года и метеорологических условий, но ее эпицентр остается на одном месте [2, 3].

Первые результаты сопоставления проведенных геофизических исследований на Четдинской площади свидетельствуют, что проекция эпицентра одноименной радоновой аномалии на линию геоплотностного разреза в региональном плане располагается в зоне двухуровневого контакта пород с различными плотностными характеристиками (рис. 3, б, пк 14). Верхний уровень контакта двух сред находится на глубине до 2 км, нижний – от 4 до 6 км. В аномальном магнитном поле (рис. 3, в) ему соответствует локальная аномалия невысокой интенсивности. Поэтому основным источником радоновой аномалии следует предположить проникновение флюидов в приповерхностные части геологического разреза по системе разломов глубинного заложения. Для однозначного истолкования генезиса Четдинского радонового максимума необходимо проведение детальных геофизических исследований.

**Локчимская система** локальных гравитационных аномалий располагается на субширотном разломе и состоит из двух близко расположенных интенсивных локальных аномалий разного знака (рис. 1, б). В структуре архейско-нижнепротерозойского кристаллического фундамента площадь участка находится в области сочленения

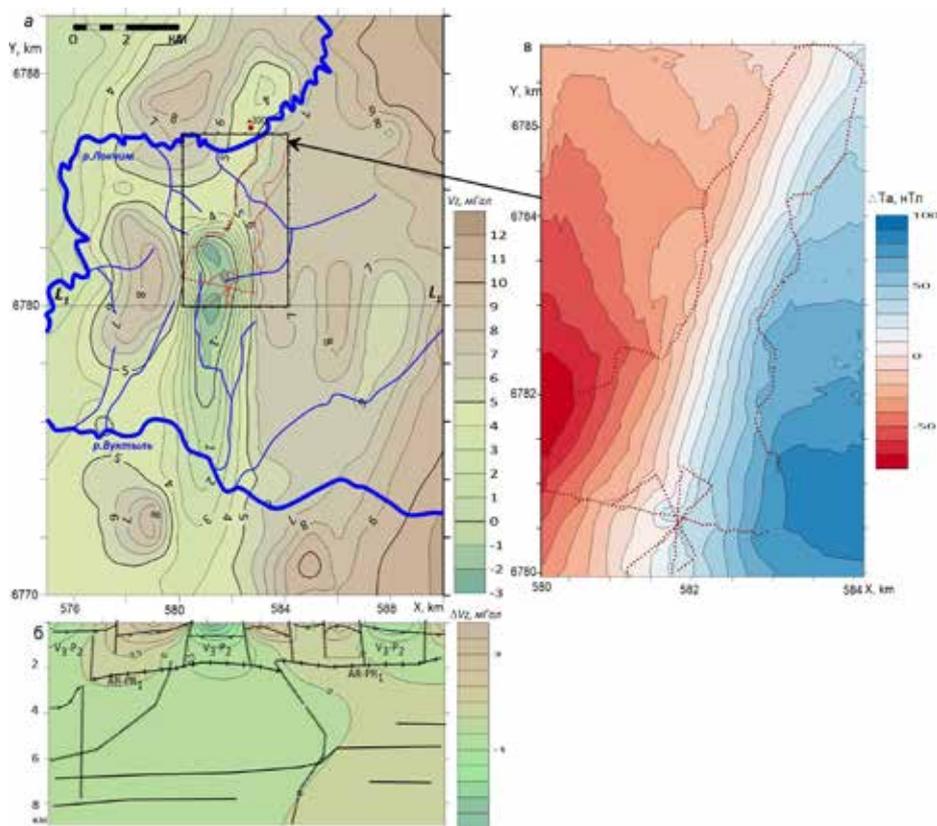


Рисунок 4. Результаты интерпретации геолого-геофизических данных, Локчимский участок: а – поле  $V_z$ , б – геоплотностной разрез по линии профиля L, в – аномальное магнитное поле  $\Delta T_a$ .  
 Figure 4. Interpretation results of geological and geophysical data, Lokchim area: a – field  $V_z$ , б – geo-density section along L profile, в – anomalous magnetic field  $\Delta T_a$ .

Кировско-Кажимского прогиба и Коми-Пермяцкого свода Волго-Уральской антеклизы.

Гравитационный максимум более изометричный и менее интенсивный, а минимум – градиентный и вытянутый (рис. 4, а). Плотностной разрез (рис. 4, б) показывает, что аномалеобразующие объекты Локчимского гравитационного минимума располагаются в пределах осадочного чехла и ограничиваются разломами корового заложения и поверхностями кровли AR-PR<sub>1</sub> фундамента и, вероятно, V<sub>3</sub>-P<sub>2</sub> отложений. Вследствие маломощности рифейско-вендских отложений или их полного отсутствия R-V граница по гравитационным данным на Локчимском участке не обнаружена. Вероятно, именно здесь располагаются зона краевых дислокаций Коми-Пермяцкого свода и его сочленение с Кировско-Кажимским прогибом. Наличие в верхней части разреза нарушений сплошности распространения границ структурно-формационных зон вблизи разрывных нарушений, характер простираения в разрезе и незначительные, до 1500 м, мощности указывают на то, что осадочные породы внутри данного интервала разреза могут содержать элементы пород с аномально низкими значениями плотности пород (флюидизатов, туффитов и др.).

Магнитометрические исследования выполнялись по трем рекогносцировочным профилям, один из которых проходит через градиентную зону и пересекает Локчимский минимум поля силы тяжести в ее эпицентре (рис. 4, в). Результаты исследований представлены в виде

схемы изолиний аномально-го магнитного поля. Значения магнитного поля возрастают с северо-запада на юго-восток, что согласуется с общим характером регионального магнитного поля. В юго-восточной части площади съемки отмечается «раздув» изолиний в высоко-градиентной зоне, диаметр которого составляет 650 м. В пределах «раздува» в результате проведенных по «лепестковой» системе магнитометрических исследований удалось оконтурить локальную аномалию магнитного поля диаметром 250 м, интенсивностью 13 нТл. Выполненные расчеты показали, что кровля магнитоактивного тела залегает на глубине 80 м. Сочетание гравитационного минимума и магнитного максимума указывает на присутствие в верхних частях геологического разреза разуплотненных высоконамагниченных образований, например, вулканогенно-осадочных пород наподобие туффитов, туфобрекчий,

ксенотуфобрекчий с присутствием магнитных минералов. Такие породы принимают участие в строении трубок взрыва на территории Архангельской алмазонасной провинции [22]. Локчимская аномалия и ее окрестности являются перспективными на поиски тел трубчатого типа, что подразумевает необходимость проведения комплекса детальных полевых исследований.

## Выводы

В результате рекогносцировочных геолого-геофизических полевых работ на северо-восточной окраине Русской плиты (юг Республики Коми) в пределах выявленных Фроловской, Четдинской и Локчимской локальных гравитационных аномалий проведена комплексная интерпретация собранных данных и получена новая информация об особенностях геологического строения слабо изученных объектов.

Фроловская аномалия, вероятнее всего, обусловлена продуктами домезозойского магматизма (?) в районе краевых дислокаций северной оконечности Волго-Уральской антеклизы в области сочленения с Вычегодским прогибом Мезенской синеклизы и оценивается нами по геолого-геофизическим признакам как производная преимущественно «основных» магм.

Четдинский объект по результатам интерпретации, скорее всего, связан с особенностями формирования осадочного чехла Кировско-Кажимского прогиба, а проник-

новение различного рода флюидизатов из двухуровневых резервуаров в приповерхностные части геологического разреза происходило по системе разломов глубинного заложения. Здесь требуется проведение детальных магниторазведочных работ в комплексе с радиометрическими исследованиями с целью уточнения генезиса Четдинской радоновой аномалии.

Локчимская аномалия по геолого-геофизическим данным обусловлена разуплотненными магнитными породами в зоне стыка Кировско-Кажимского прогиба и консолидированного крутого западного борта Коми-Пермяцкого свода и является перспективной на поиски тел трубчатого типа.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Конанова, Н. В. Магнитные аномалии зоны сочленения северо-восточной части Волго-Уральской антеклизы и Вычегодского прогиба / Н. В. Конанова, В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – Сыктывкар, 2017. – № 12. – С. 25–30.
2. Удоратин, В. В. Радоновая съемка для картирования разломных зон Тимано-Североуральского региона / В. В. Удоратин, Ю. Е. Езимова, А. Ш. Магомедова. – Сыктывкар, 2021. – 153 с.
3. Езимова, Ю. Е. Четдинская радоновая аномалия (Республика Коми): локализация и изучение / Ю. Е. Езимова, В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова // Геофизические исследования. – 2022. – Т. 23, № 4. – С. 36–54. – DOI: 10.21455/gr2022.4-3.
4. Структура платформенного чехла Европейского Севера СССР / под ред. В. А. Дедеева. – Ленинград : Наука, 1982. – 200 с.
5. Фундамент Тимано-Печорского нефтегазоносного бассейна / Л. Т. Белякова, В. И. Богацкий, Б. П. Богданов, Е. Г. Довжикова, В. М. Ласкин. – Киров : ОАО «Кировская областная типография», 2008. – 288 с.
6. Буш, В. А. Новые данные по домезозойскому внутриплитному магматизму Восточно-Европейской платформы / В. А. Буш, Б. А. Калмыков // Геотектоника. – 2015. – № 5. – С. 43–61.
7. Цыганов, В. А. Новые данные о геологическом строении территории Мезенской синеклизы и ее перспективах на углеводороды (по результатам высокоточной аэромагнитной съемки) / В. А. Цыганов // Георесурсы. – 2006. – № 1 (18). – С. 26–35.
8. Недрa Северо-Запада Российской Федерации / В. А. Коровнин, Л. В. Турылева, Д. Г. Руденко, Г. Н. Ключникова. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Пб. картфабрики ВСЕГЕИ, 2003. – 520 с.
9. Краснопевцева, Г. В. Объемная глубинная модель земной коры Восточно-Европейской платформы по данным региональных сейсмических исследований / Г. В. Краснопевцева, Ю. К. Щукин // Региональная геология и металлогения. – Санкт-Петербург : ВСЕГЕИ, 2000. – № 10. – С. 75–85.
10. Гравиметрическая карта России, увязанная с картами по территории стран СНГ. М.: 1 : 1 000 000 / гл. ред. О. В. Петров / Федеральное агентство по недропользованию. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского» (ФГУП «ВСЕГЕИ»). – 2008.
11. Удоратин, В. В. Глубинное строение литосферы по профилю MEZTIMPECH / В. В. Удоратин, Н. В. Конанова // Отечественная геология. – 2000. – № 1. – С. 15–23.
12. Конанова, Н. В. Районирование кристаллического фундамента Тимано-Североуральского сегмента литосферы и сопредельных территорий по геофизическим данным / Н. В. Конанова, В. В. Удоратин // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – Сыктывкар, 2014. – № 6. – С. 7–13.
13. Конанова, Н. В. Узлы пересечения ортогональных разломов европейского севера России по геофизическим данным / Н. В. Конанова // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – Сыктывкар, 2019. – № 7. – С. 8–14.
14. Конанова, Н. В. Глубинное строение Тимано-Североуральского региона (по гравиметрическим данным) / Н. В. Конанова. – Сыктывкар : ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. – 160 с., 16 с. цв. вкл.
15. Конанова, Н. В. Геолого-плотностные модели глубинного строения в районе локальных гравитационных аномалий севера Волго-Уральской антеклизы / Н. В. Конанова // Вестник геонаук. – 2022. – № 10 (334). – С. 3–10. – DOI:10.19110/geov.2022.10.1.
16. Булин, Н. К. Региональный прогноз нефтегазоносности недр по глубинным сейсмическим критериям / Н. К. Булин, А. В. Егоркин. – Москва : Центр ГЕОН, 2000. – 194 с.
17. Юшкин, Н. П. Геологические предпосылки выявления месторождений алмазов в Тимано-Уральском регионе / Н. П. Юшкин, А. М. Пыстин, Н. В. Кононова, Л. В. Махлаев, В. С. Цыганко [и др.] // Региональная геология и металлогения. – Санкт-Петербург : Издательство ВСЕГЕИ, 2005. – № 26. – С. 115–120.
18. Богданов, Б. П. Волго-Тиманский и Восточно-Европейский рифейские барьерные рифы как индикаторы формационно-тектонической модели верхнего докембрия Восточно-Европейской платформы (в связи с перспективами поисков углеводородов, алмазов и других полезных ископаемых) / Б. П. Богданов, А. В. Громыко, С. А. Горобец // Уральский геологический журнал. – 2024. – № 1 (157). – С. 3–147.
19. Конанова, Н. В. Перспективы коренной алмазоносности зоны стыка Сысольского свода и Кировско-Кажимского авлакогена севера Волго-Уральской антеклизы / Н. В. Конанова // ДАН. – 2008. – Вып. 423, № 4. – С. 498–501.
20. Богацкий, В. И. Уточнение геологического строения и перспектив нефтегазоносности Казанско-Кажимского авлакогена и его обрамления / В. И. Богацкий, Б. П. Богданов. – Ухта : ТП НИЦ-2, 2003. – 150 с.
21. Носова, А. А. Петрология позднедокембрийского и палеозойского внутриплитного базитового вулканизма Восточно-Европейской платформы: автореф. дис. ...

д-ра геол.-минерал. наук / А. А. Носова. – Москва : ИГЕМ РАН, 2007. – 52 с.

22. Кутинов, Ю. Г. Иерархический ряд проявлений щелочно-ультраосновного магматизма Архангельской алмазонасной провинции. Их отражение в геолого-геофизических материалах / Ю. Г. Кутинов, З. Б. Чистова. – Архангельск, 2004. – 285 с.

## References

1. Konanova, N. V. Magnitnye anomalii zony sochleneniya severo vostochnoj chasti Volga Uralskoj anteklizy i Vychevodskogo progiba [Magnetic anomalies of the junction zone of the northeastern part of the Volga-Ural antecline and the Vychevda trough] / N. V. Konanova, V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova // Bulletin of the Institute of Geology, Komi SC UB RAS. – Syktyvkar, 2017. – № 12. – P. 25-30.
2. Udoratin, V. V. Radonovaya s'emka dlya kartirovaniya razlomnyh zon Timano Severouralskogo regiona [Radon survey for mapping fault zones in the Timan-Northern Urals region] / V.V. Udoratin, Yu. E. Ezimova, A. Sh. Magomedova. – Syktyvkar, 2021. – 153 p.
3. Ezimova, Yu. E. Chetdinskaya radonovaya anomalija (Respublika Komi) : lokalizatsiya i izuchenie [Chetdin radon anomaly (Komi Republic) : localization and study] / Yu. E. Ezimova, V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova // Geofizicheskie issledovaniya [Geophysical Surveys]. – 2022. – Vol. 23/4 – P. 36-54. – DOI: 10.21455/gr2022. 4-3.
4. Struktura platformennogo chekhla Evropejskogo Severa SSSR [Structure of the platform cover of the European North of the USSR] / Ed. V. A. Dedeev. – Leningrad : Nauka, 1982. – 200 p.
5. Fundament Timano-Pechorskogo neftegazonosnogo bassejna [Foundation of the Timan-Pechora oil and gas basin] / L. T. Belyakova, V. I. Bogatskij, B. P. Bogdanov, E. G. Dovzhikova, V. M. Laskin. – Kirov : OAO Kirovskaya oblastnaya tipografiya. – 2008. – 288 p.
6. Bush, V. A. Novye dannye po domezozojskomu vnutripitnomu magmatizmu Vostochno Evropejskoj platformy [New data on pre-Mesozoic intraplate magmatism of the East European Platform] / V. A. Bush, B. A. Kalmykov // Geotektonika [Geotectonics]. – 2015. – № 5. – P. 43-61.
7. Tsyganov, V. A. Novye dannye o geologicheskom stroenii territorii Mezenskoj sineklizy i ee perspektivah na uglevodorody po rezul'tatam vysokotochnoj aeromagnitnoj semki [New data on geological structure of the territory of Mezen syncline and its prospects for hydrocarbons (based on the results of high-precision aeromagnetic survey)] / V. A. Tsyganov // Georesursy [Georesources]. – 2006. – № 1 (18). – P. 26-35.
8. Korovnin, V. A. Nedra Severo-Zapada Rossijskoj Federacii [Subsoil of the North-West of the Russian Federation] / V. A. Korovnin, L. V. Turyleva, D. G. Rudenko, G. N. Klyuchnikova. – Saint-Petersburg : Izd-vo SPb kartfabriki VSEGEI, 2003. – 520 p.
9. Krasnopedceva, G. V. Obemnaya glubinnaya model zemnoj kory Vostochno-Evropejskoj platformy po dannym regionalnyh sejsmicheskikh issledovanij [Volumetric deep model of the Earth's crust of the East European Platform based on regional seismic research data] / G. V. Krasnopedceva, Yu. K. Shchukin // Regionalnaya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – Saint-Petersburg : VSEGEI, 2000. – № 10. – P. 75-85.
10. Gravimetricheskaya karta Rossii uvyazannaya s kartami po territorii stran SNG M 1 : 1 000 000 [Gravimetric map of Russia adjusted with maps for the territory of the CIS countries]. Scale 1 : 1 000 000 / Ed. O. V. Petrov // Federal Subsoil Agency. All-Russian Research and Development Geological Institute named after A. P. Karpinsky (FGUP VSEGEI). – 2008.
11. Udoratin, V. V. Glubinnoe stroenie litosfery po profilyu MEZTIMPECH [Deep structure of the lithosphere along the MEZTIMPECH profile] / V. V. Udoratin, N. V. Konanova // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. – 2000. – № 1. – P. 15-23.
12. Konanova, N. V. Rajonirovanie kristallicheskogo fundamenta Timano Severouralskogo segmenta litosfery i sopredelnyh territorij po geofizicheskim dannym [Zoning of the crystalline basement of Timan-Severouralsk segment of the lithosphere and adjacent territories according to geophysical data] / N. V. Konanova, V. V. Udoratin // Bulletin of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. – Syktyvkar, 2014. – № 6 – P. 7-13.
13. Konanova, N. V. Uzly peresecheniya ortogonalnyh razlomov evropejskogo severa Rossii po geofizicheskim dannym [Intersection nodes of orthogonal faults in the European North of Russia according to the geophysical data] / N. V. Konanova // Bulletin of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. – Syktyvkar, 2019 – № 7. – P. 8-14.
14. Konanova, N. V. Glubinnoe stroenie Timano Severouralskogo regiona po gravimetricheskim dannym [Deep structure of the Timan-Northern Urals region (according to gravimetric data)] / N. V. Konanova – Syktyvkar : Institute of Geology Komi SC UB RAS, 2020 – 160 p. + 16 colour inserts.
15. Konanova, N. V. Geologo-plotnostnye modeli glubinnogo stroeniya v rajone lokalnyh gravitatsionnyh anomalij severa Volga Uralskoj anteklizy [Geological-density models of the deep structure in the area of local gravity anomalies in the north of the Volga-Ural antecline] / N. V. Konanova // Vestnik geonauk [Bulletin of Geosciences]. – 2022. – № 10 (334). – P. 3-10. – DOI 10.19110/geov.2022.10.1.
16. Bulin, N. K. Regionalnyj prognoz neftegazonosnosti nedr po glubinnym sejsmicheskim kriterijam [Regional forecast of oil and gas content of subsoil using deep seismic criteria] / N. K. Bulin, A. V. Egorkin. – Moscow : Tsentr GEON, 2000. – 194 p.
17. Yushkin, N. P. Geologicheskie predposylki vyyavleniya mestorozhdenijalmazov v Timano Uralskom regione [Geological prerequisites for identifying diamond deposits in the Timan-Ural region] / N. P. Yushkin, A. M. Pystin, N. V. Kononova, L. V. Mahlaev, V. S. Tsyganko [et al.] // Regionalnaya Geologiya i Metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – Saint-Petersburg : Izdatelstvo VSEGEI. – 2005. – № 26. – P. 115-120.

18. Bogdanov, B. P. Volgo-Timanskij i Vostochno-Evropskij rifejskie barernye rify kak indikatory formacionno-tektonicheskoj modeli verhnego dokembrija Vostochno-Evropskoj platformy (v svyazi s perspektivami poiskov uglevodorodov,almazov i drugih poleznyh iskopaemyh) [Volga-Timan and East European Rhiphaean barrier reefs as indicators of the formation-tectonic model of the Upper Precambrian of the East European Platform (in connection with the prospects for the search for hydrocarbons, diamonds and other minerals)] / B. P. Bogdanov, A. V. Gromyko, S. A. Gorobec // *Uralsky geologicheskij zhurnal [Ural Geological Journal]*. – 2024. – № 1 (157). – P. 3–147.
19. Konanova, N. V. Perspektivy korennoj almazonosnosti zony styka Sysolskogo svoda i Kirovsko-Kazhimskogo avlakogena severa Volgo-Uralskoj anteklizy [Prospects for the primary diamondiferous potential of the junction zone of the Sysola arch and the Kirov-Kazhim aulacogen in the north of the Volga-Ural anteklise] / N. V. Konanova // *DAN*. – 2008. – Iss. 423. – № 4. – P. 498–501.
20. Bogatskij, V. I. Utochnenie geologicheskogo stroeniya i perspektiv neftegazonosnosti Kazansko Kazhimskogo avlakogena i ego obramleniya [Clarification of the geological structure and prospects for oil and gas potential of the Kazan-Kazhim aulacogen and its framing] / V. I. Bogatskij, B. P. Bogdanov. – Ukhta : TP NITS-2, 2003. – 150 p.
21. Nosova, A. A. Petrologiya pozdnedokembrijskogo i paleozojskogo vnutriplitnogo bazitovogo vulkanizma Vostochno Evropskoj platformy [Petrology of Late Precambrian and Paleozoic within slab mafic volcanism of the East European Platform] : extended abstract of Doctor's thesis (Geology and Mineralogy) / A. A. Nosova. – Moscow : IGEM RAN, 2007. – 52 p.
22. Kutinov, Yu. G. Ierarhicheskij ryad proyavlenij shchelochno ultraosnovnogo magmatizma Arhangel'skoj almazonosnoj provintsii Ikh otrazhenie v geologo geofizicheskikh materialah [Hierarchical series of manifestations of alkaline-ultrabasic magmatism in the Arkhangel'sk diamondiferous province. Their reflection in geological and geophysical materials] / Yu. G. Kutinov, Z. B. Chistova. – Arhangel'sk, 2004. – 285 p.

#### Благодарность (госзадание)

Исследование выполнено в рамках реализации государственного задания по теме НИР «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» (ГР № 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085).

#### Acknowledgements (state task)

The study was carried out within the framework of the state task on the research theme “Deep structure, geodynamic evolution, geosphere interaction, magmatism, metamorphism and isotopic geochronology of the Timan-North Ural lithospheric segment” (state registration № 1021062211107-6-1.5.6; FUUU-2022-0085).

#### Информация об авторах:

**Конанова Надежда Витальевна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: konanova@geo.komisc.ru).

**Удортин Валерий Вячеславович** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией Геофизическая обсерватория «Сыктывкар», ведущий научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: udoratin@geo.komisc.ru).

**Магомедова Александра Шамильевна** – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: asmagomedova@geo.komisc.ru).

**Езимова Юлия Евгеньевна** – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: yeezimova@geo.komisc.ru).

#### About the authors:

**Nadezhda V. Konanova** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: konanova@geo.komisc.ru).

**Valery V. Udoratin** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory “Geophysical Observatory of the city of Syktyvkar”, Leading Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: udoratin@geo.komisc.ru).

**Alexandra Sh. Magomedova** – Junior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: asmagomedova@geo.komisc.ru).

**Yulia E. Ezimova** – Junior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: yeezimova@geo.komisc.ru).

**Для цитирования:**

Конанова, Н. В. Комплексная интерпретация геофизических данных в районе локальных гравитационных аномалий на севере Волго-Уральской антеклизы / Н. В. Конанова, В. В. Удоратин, А. Ш. Магомедова, Ю. Е. Езимова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 87–97.

**For citation:**

Konanova, N. V. Kompleksnaya interpretaciya geofizicheskikh dannyh v rajone lokalnyh gravitacionnyh anomalij na severe Volgo-Uralskoj anteklizy [Integrated interpretation of geophysical data in the area of local gravity anomalies in the North of the Volga-Ural antecline] / N. V. Konanova, V. V. Udoratin, A. Sh. Magomedova, Yu. E. Ezimova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2024. – № 3 (69). – P. 87–97.

Дата поступления статьи: 17.01.2024

Прошла рецензирование: 05.03.2024

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 17.01.2024

Reviewed: 05.03.2024

Accepted: 27.03.2024

## Землетрясение 26 декабря 2023 года в Кировско-Кажимском авлакогене

Н. Н. Носкова

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
noskova@geo.komisc.ru

### Аннотация

26 декабря 2023 г. зарегистрировано землетрясение в Зуевском районе Кировской области, в верхнем течении р. Чепца. Целью настоящей работы являются анализ сейсмических данных, полученных региональными сейсмостанциями, расчет основных параметров сейсмического события 26 декабря 2023 г. и определение сейсмотектонической позиции эпицентра. Сейсмическое событие зарегистрировали сейсмические станции республик Коми и Башкортостан, Пермского края, Архангельской, Кировской, Оренбургской, Самарской, Саратовской, Свердловской областей. В обработке события использовались волновые формы 24 станций с эпицентральными расстояниями от 81 до 1352 км, азимутальное окружение – 18–359.5°, GAP=80°. В результате инструментальной обработки получены следующие параметры землетрясения 26 декабря: координаты 58.4843N, 50.794E, время в очаге  $t_0=01:44:36$  (UTC), глубина  $h=4$  км, энергетический класс по Т. Г. Раутиан  $Kp=10.2/4$ , локальная магнитуда  $ML=3.6/5$ ,  $Ms=2.7/5$ , эллипс ошибок:  $Az_{major}=60^\circ$ ,  $R_{minor}=4.5$  км,  $R_{major}=5.5$  км. Оно является тектоническим и приурочено к Кировско-Кажимскому авлакогену Волго-Уральской антеклизы. Здесь известны ощутимые исторические землетрясения, а также периодически фиксируются инструментальные. Предыдущая активизация авлакогена происходила в 2020 г., также в центральном его фланге. Возникновение сейсмических событий свидетельствует, что он является сейсмически активной структурой.

### Ключевые слова:

землетрясение, эпицентр, слабая сейсмичность, Кировско-Кажимский авлакоген, Восточно-Европейская платформа

### Введение

Северо-восток Восточно-Европейской платформы (далее – ВЕП) относится к территориям со слабой и редкой сейсмичностью, тем не менее здесь периодически возникают землетрясения. Они происходят в основном в Кировской области и на юге Республики Коми. Данную площадь следует рассматривать как единую, поскольку административные границы условны, когда речь идет

## Earthquake on December 26, 2023 in the Kirov-Kazhim aulacogen

N. N. Noskova

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar  
noskova@geo.komisc.ru

### Abstract

The accident was registered in the Zuevka District of the Kirov Region in the upper reaches of the Cheptsya River on December 26, 2023. The purpose of this work is to analyze seismic data obtained by regional seismic stations, calculate the main parameters of the seismic event happened on December 26, 2023, and determine the seismotectonic position of the epicentre. The seismic event was recorded by seismic stations of the Komi Republic, Bashkortostan, the Perm Territory, Arkhangelsk, Kirov, Orenburg, Samara, Saratov, and Sverdlovsk Regions. The event was analyzed using wave forms of 24 stations with epicentral distances from 81 to 1352 km, azimuthal environment – 18–359.5°, GAP=80°. The instrumental processing gave the following parameters of the December 26 earthquake: coordinates 58.4843N, 50.794E, origin time  $t_0=01:44:36$  (UTC), depth  $h=4$  km, energy class according to T.G. Rautian  $Kp=10.2/4$ , local magnitude  $ML=3.6/5$ ,  $Ms=2.7/5$ , error ellipse:  $Az_{major}=60^\circ$ ,  $R_{minor}=4.5$  km,  $R_{major}=5.5$  km. The earthquake is tectonic and belongs to the Kirov-Kazhim aulacogen of the Volga-Ural antecline. The area is known for serious historical earthquakes; instrumental disturbances are also regularly recorded here. The previous activation of the aulacogen occurred in 2020, also in its central flank. The occurrence of seismic events indicates that it is a seismically active structure.

### Keywords:

earthquake, epicentre, weak seismicity, Kirov-Kazhim aulacogen, East European platform

о сейсмичности. Причины в сейсмическом потенциале тектонические, а тектонические структуры могут занимать несколько административно-территориальных единиц. В тектоническом отношении Кировскую область и юг Республики Коми занимает единая структура – Кировско-Кажимский авлакоген, а также прилегающие к нему системы сводовых поднятий Волго-Уральской антеклизы

Русской плиты. На данной территории возникают редкие и низкомагнитудные землетрясения. Возможная максимальная интенсивность сейсмических сотрясений в соответствии с картами ОСР-2016-А, В составляет 5 баллов, ОСР-2016-С – 6 баллов [1]. Платформенная сейсмичность представляет особый интерес, так как редкие проявления сейсмической активности делают каждое зарегистрированное землетрясение уникальным событием, которое детально изучается.

26 декабря 2023 г. произошло землетрясение в Кировской области (рис. 1). Его зарегистрировали сейсмические станции республик Коми и Башкортостан, Пермского края, Архангельской, Кировской, Оренбургской, Самарской, Саратовской, Свердловской областей. Цель настоящей работы – анализ сейсмических данных, полученных региональными сейсмостанциями, расчет основных параметров сейсмического события 26 декабря 2023 г. и определение сейсмотектонической позиции эпицентра. Определение сейсмического потенциала имеет научное и практическое значение. Исследования сейсмичности важны для решения задач сейсмического районирования ВЕП, оценки сейсмической опасности при строительстве и эксплуатации промышленных и гражданских объектов.

## Материалы и методы

Сейсмологический мониторинг Кировской области осуществляется сейсмической станцией «Киров» (KIRV) Службы спецконтроля Министерства обороны Российской Федерации, а также сейсмическими сетями соседних регионов – станциями Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск), Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар), Горного института УрО РАН (ГИ УрО РАН, г. Пермь) и Архангельской сейсмической сети (ФИЦКИА УрО РАН).

На территории Республики Коми сейсмические наблюдения в 2023 г. проводились станциями ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Сыктывкар» (SYK) в г. Сыктывкаре, «Пожег» (PZG) в с. Пожег Усть-Куломского района и «Инта» в г. Инте. В конце года произошли изменения: 17 октября была открыта сейсмостанция «Воч» в с. Нижний Воч Усть-Куломского района, а 6 декабря закрыта станция «Пожег». Новая станция имеет следующие характеристики: код VOCH, координаты 61.2051N, 54.1615E, h=149 м, оборудование CM-3KB+UGRA.

Таким образом, в обработке сейсмического события 26 декабря 2023 г. использовались волновые формы (рис. 2) 24 станций: «Сыктывкар» (SYK), «Воч» (VOCH) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН; «Верхнечусовские городки» (PR0R), «Добрянка» (PR2R), «Кунгур» (PR3R), «Власы» (PR41R), «Екимята» (PR6R), «Сараны» (PR7R) ГИ УрО РАН [2]; «Байтуган-1» (BT1), «Байтуган-2» (BT2), «Бай-

туган-3» (BT3) Отдела геоэкологии Оренбургского ФИЦ УрО РАН [3]; «Оренбург» (ORR) ФИЦ ЕГС РАН и Отдела геоэкологии Оренбургского ФИЦ УрО РАН; «Романово» (PR1R), «Североуральск» (SVUR), «Уфа» (BA1R), «Свердловск» (SVE), «Каменск-Уральский» (KAUR), «Катав-Ивановск» (KAIR) ФИЦ ЕГС РАН; «Лешуконское» (LSH), «Амдерма» (AMDE1) Архангельской сейсмической сети [4]; «Андозеро» (ADZ) ФИЦ ЕГС РАН и Архангельской сейсмической сети; «Киров» (KIRV), «Белогорное» (BELG) ФИЦ ЕГС РАН; «Арти» (ARTI) ФИЦ ЕГС РАН совместно с IMS СТВТО, доступ к которым осуществлялся через электронный ресурс корпорации EarthScope Consortium (США) [5]. Таким образом, эпицентральные расстояния составили от 81 (KIRV) до 1352 (AMDE1) км, азимутальное окружение – 18–359.5°, достаточно равномерное, максимальная азимутальная брешь GAP=80°. Конфигурация перечисленных сейсмостанций показана на рис. 1.

Определение параметров гипоцентра на сейсмических записях выполняли в программах WSG [6] методом минимизации невязок и NAS [7] методом Generalized beamforming. При этом применялась скоростная модель для ВЕП [8], дополненная глубокими слоями модели АК-135 [9]. Для вычисления значений локальной магнитуды  $M_L$  (MWA) и магнитуды по поверхностным волнам ( $M_s$ ) использовали реализованные в WSG способы расчета, ос-

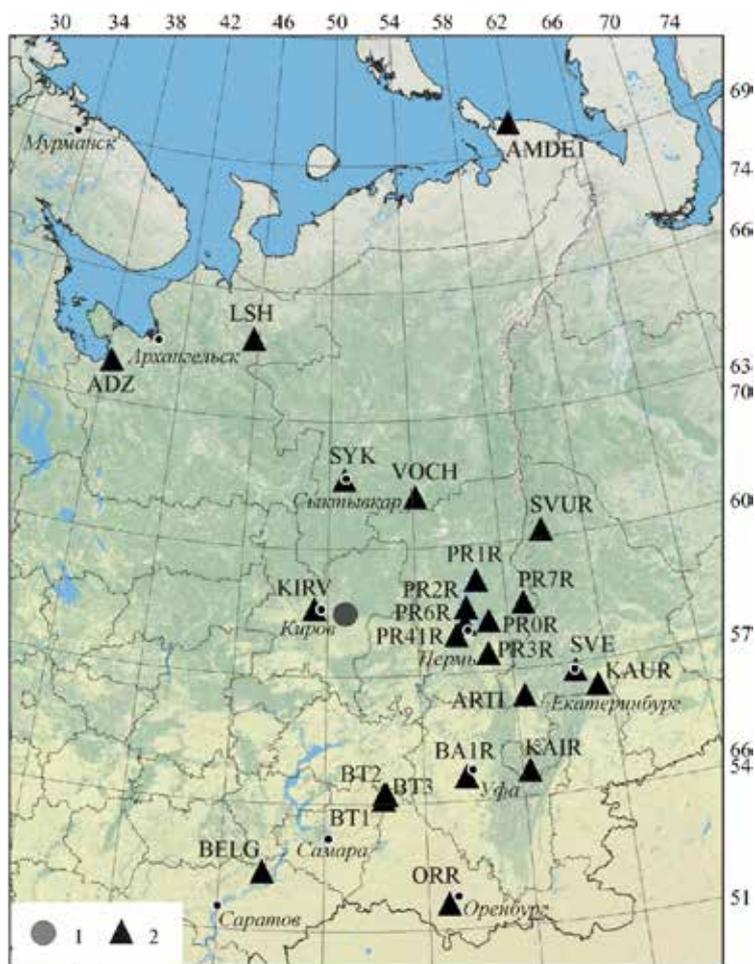


Рисунок 1. Эпицентр землетрясения 26 декабря 2023 г. (1) и конфигурация сейсмостанций, его зарегистрировавших (2).  
Figure 1. Epicentre of the earthquake happened on December 26, 2023 (1) and configuration of seismic stations registered it (2).

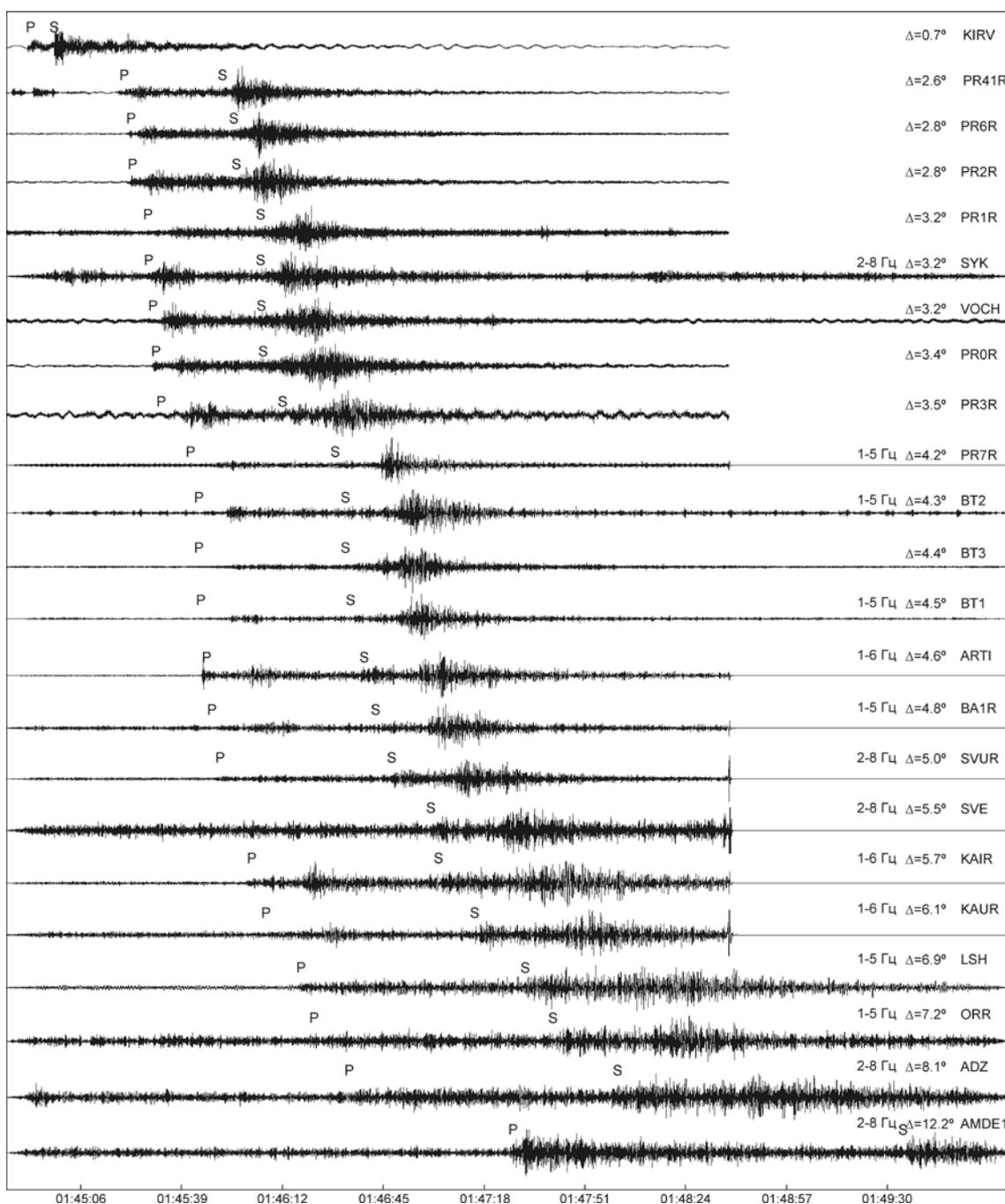


Рисунок 2. Фрагменты сейсмограмм вертикальной компоненты землетрясения 26 декабря 2023 г., расположенные по времени прихода первой фазы.  
Figure 2. Fragments of vertical component seismograms of the earthquake happened on December 26, 2023, arranged by the arrival time of the first phase.

нованные на осредненной по Северной Евразии калибровочной функции [10] и рекомендациях, указанных в работе И. П. Габсатаровой [11] соответственно. Для распознавания природы сейсмического события применяли программы В. Э. Асминга *PSRatio* и *Spec* [12].

#### Инструментальные параметры землетрясения 26 декабря 2023 года.

В результате инструментальной обработки получены следующие параметры землетрясения 26 декабря: координаты 58.4843N, 50.794E, время в очаге  $t_0=01:44:36$  (UTC), глубина  $h=4$  км, энергетический класс по Т. Г. Раутиан  $Kp=10.2/4$ , локальная магнитуда  $ML=3.6/5$ ,  $M_s=2.7/5$ , эллипс

ошибок:  $Az_{major}=60^\circ$ ,  $R_{minor}=4.5$  км,  $R_{major}=5.5$  км. В таблице представлен сейсмический бюллетень события. По нашим расчетам землетрясение произошло в верхнем течении р. Чепца, в границах Семушинского сельского поселения Зуевского района Кировской области. Ближайшие к эпицентру землетрясения населенные пункты: пос. Мотоус, дер. Целоус Зуевского района, пос. Семушино, д. Косинка, входящие в Семушинское сельское поселение Зуевского района Кировской области. В 3 км расположены железнодорожные станции Рехино и Береговой и железнодорожная линия Киров–Пермь.

Эпицентр события по данным ГИ УрО РАН [13] расположен в 12 км севернее нашего и имеет близкие параметры:

Станционный бюллетень сейсмического события 26 декабря 2023 года  
Station bulletin of the seismic event happened on December 26, 2023

Код станции	Время вступления сейсмических фаз, ч мин с		$\Delta$ , °	AZM, °	A, мкм	T, с	Магнитуда
	P	S					
KIRV	01:44:48.42	01:44:57.46	0.7	278.6			
PR41R	01:45:18.43	01:45:51.61	2.6	100.4			
PR6R	01:45:21.85	01:45:55.88	2.8	94.2	0.198	0.40	ML=3.7
PR2R	01:45:22.11	01:45:56.76	2.8	86.4	0.135 0.086	0.30 3.90	ML=3.5 Ms=2.4
SYK0	01:45:26.93	01:46:04.62	3.2	359.5	0.115 0.142	0.30 3.26	ML=3.6 Ms=2.8
PR1R	01:45:26.97	01:46:04.76	3.2	74.7			
VOCH	01:45:27.71	01:46:05.67	3.2	30.5	0.102 0.063	0.28 3.12	ML=3.5 Ms=2.4
PR0R	01:45:29.33	01:46:09.25	3.4	92.2			
PR3R	01:45:30.92	01:46:11.79	3.5	104.8			
PR7R	01:45:39.87	01:46:28.34	4.2	85.7			
BT2	01:45:42.04	01:46:32.23	4.3	167.7			
BT3	01:45:42.59	01:46:33.08	4.4	167.0			
BT1	01:45:43.89	01:46:35.23	4.5	168.2			
ART1	01:45:45.74	01:46:38.31	4.6	113.9	0.049 0.094	0.35 3.65	ML=3.6 Ms=2.8
BA1R	01:45:47.53	01:46:41.73	4.8	143.0			
SVUR	01:45:50.32	01:46:47.12	5.0	66.0			
SVE		01:47:00.52	5.5	103.2			
KAIR	01:45:59.98	01:47:03.57	5.7	129.9			
KAUR	01:46:05.58	01:47:14.24	6.1	105.0			
BELG		01:47:19.84	6.4	197.8			
LSH	01:46:16.06	01:47:31.20	6.9	341.6			
ORR	01:46:20.96	01:47:40.79	7.2	160.0			
ADZ	01:46:32.94	01:48:01.55	8.1	317.4			
AMDE1	01:47:26.31	01:49:36.62	12.2	18.1	0.067	7.44	Ms=3.1

$t_0=01:44:34$ , 58.578N, 50.770E,  $ML=3.3$ . Кроме того, в бюллетене норвежского сейсмологического центра *NORSAR* (Норвегия) зафиксировано решение, рассчитанное по записям станций *FINESS Array*, *Hagfors Array* и *NORESS Array*. Согласно бюллетеню [14], землетрясение произошло в Вологодской области, его параметры:  $t_0=01:45:35.0$ , 59.74N, 42.34E,  $M=2.4/3$ . Расхождение в определении положения эпицентра составило более 500 км.

Тектоническое происхождение землетрясения не вызывает сомнений, так как на рассматриваемой территории, которая, как уже отмечалось, относится к слабосейсмичной, регулярно происходят землетрясения, в том числе известны исторические. Тем не менее с целью накопления статистики для последующих исследований различий тектонических и техногенных событий на записях сейсмических станций «Киров», «Екимята», «Воч» и «Арти» применили некоторые критерии идентификации взрывов и землетрясений, разработанные в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН к.ф.-м.н. В. Э. Асмингом [12] для определения природы сейсмического события. Оценивались приведенные ниже параметры.

**Отношение амплитуд объемных волн P и S.** Рассчитанное в программе *PSRatio*

(рис. 3, а) отношение P/S свидетельствует о тектонической природе. Низкие значения (меньше 0.3) служат аргументом в пользу того, что сейсмическое событие является землетрясением.

**Спектральные свойства события.** Построенные в программе *Spec* диаграммы (рис. 3, б), характеризующие изменения спектра во времени, также свидетельствуют о природном происхождении сейсмического события (значения параметра  $a$  ниже 0.5). Спектральные диаграммы (сонограммы) станций ART1, KIRV, PR6R, VOCH события 26 декабря 2023 г. (рис. 4) указывают на то, что оно является землетрясением. Спектральная плотность взрывов меняется во времени медленнее, чем для землетрясений, что выражается в «полосах» на сейсмограммах [12]. В нашем случае этого не наблюдается, частотный состав изменчив во времени.

**Форма сейсмических сигналов.** Волновая картина события 26 декабря 2023 г. (рис. 2) – более сильные и высокоамплитудные S-волны по сравнению с P-волной, характерна для тектонических землетрясений и также говорит о природном происхождении.

**Изучение горнодобывающей активности в регионе.** В данном районе Кировской области, согласно Геоинформационной системе Кировской области [15], добыча полезных ископаемых не производится, отсутствуют действующие промышленные карьеры и предприятия. За время инструментальных наблюдений техногенные сейсмические события в Зуевском районе не зафиксированы.

**Время в очаге** (04:44 по местному времени) также указывает на вероятный естественный процесс возникновения события.

Таким образом, все рассмотренные параметры свидетельствуют о природном происхождении сейсмического события 26 декабря 2023 г. и нами оно классифицируется как «тектоническое землетрясение».

## Результаты и их обсуждение

В тектоническом плане землетрясение 26 декабря 2023 г. относится к Кировско-Кажимскому авлакогену Волго-Уральской антеклизы, который является сейсмо-

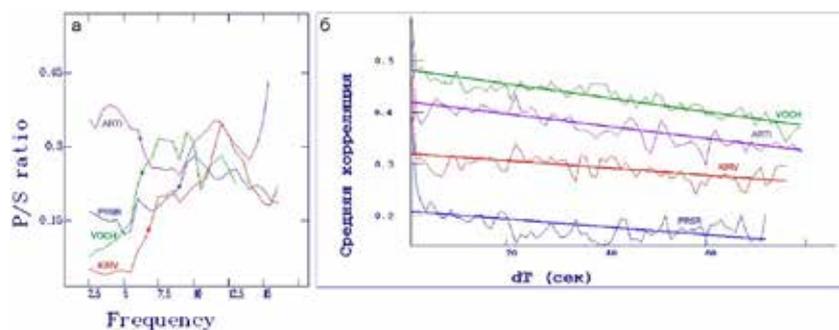


Рисунок 3. Отношение амплитуд P/S (а) и средняя корреляция спектра во времени (б) сейсмического события 26 декабря 2023 г. для станций KIRV, PR6R, VOCH, ART1.  
Figure 3. P/S amplitude ratio (a) and mean spectrum correlation in time (б) of the seismic event happened on December 26, 2023 for stations KIRV, PR6R, VOCH, ART1.

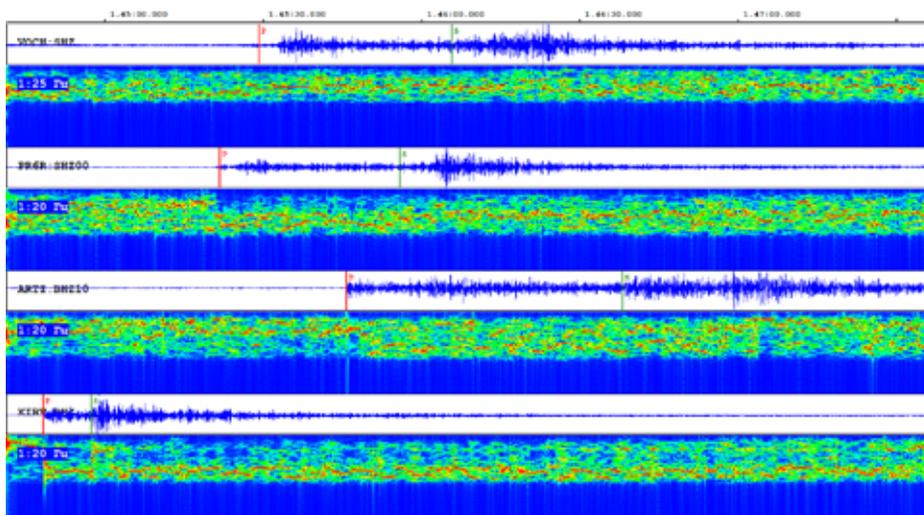


Рисунок 4. Сонограммы события 26 декабря 2023 г. станций KIRV, PR6R, VOCH, ARTI.  
Figure 4. Sonograms of the event happened on December 26, 2023 for stations KIRV, PR6R, VOCH, ARTI.

активной структурой. На рис. 5 вынесены исторические и инструментальные эпицентры землетрясений на северо-востоке Русской плиты, в пределах Кировско-Кажимского авлакогена и прилегающих к нему Котельнич-Сысольской и Северо-Татарско-Коми-Пермяцкой систем сводовых поднятий Волго-Уральской антеклизы. За инструментальный период сильных событий в рассматриваемом районе отмечено не было, значения локальной магнитуды ( $ML$ ) составили от 2.1 до 3.9.

Эпицентры распределены неравномерно, наибольшее количество событий локализуется в центральной части авлакогена. Особенно заметные землетрясения на данной площади – 6-балльное Вятское 1897 г. [18] и 5-балльное Верхошижемское 2000 г. [19]. Землетрясение 1897 г. – одно из сильнейших исторических землетрясений севера ВЕП, оно ощущалось по всей центральной части Вятской губернии и предствительно обеспечено макросейсмическими сведениями в местных газетах 1897 г. Кроме того, вблизи эпицентральной области землетрясения 26 декабря 2023 г. известны ощутимые исторические землетрясения Вятского края 1795 и 1908 гг., информация о которых содержится в изданиях того времени [20–22].

Последняя активизация авлакогена происходила в 2020 г. [23] также в его центральном фланге и в пределах восточного борта. Землетрясение 26 декабря 2023 г. приурочено к восточному борту авлакогена. Землетрясения в основном происходят на бортах авлакогена и, вероятно, приурочены к разломам, контролирующим наиболее погруженный центральный грабен авлакогена. Глубина гипоцентра 26 декабря 2023 г. соответствует залеганию поверхности фундамента. В целом для Кировско-Кажимского авлакогена характерны преимущественно мелкофокусные очаги с глубинами до 10 км.

## Выводы

Землетрясение 26 декабря 2023 г.,  $ML=3.6$ , по нашим расчетам произошло в Зуевском районе Кировской области. Оно является тектоническим, верхнекоровым и приурочено к восточному борту Кировско-Кажимского авлакогена Волго-Уральской антеклизы. Вблизи эпицент-

ральной области события известны ощутимые исторические землетрясения, а также зафиксированы инструментальные с  $ML=2.6-3.4$ . Предыдущая активизация авлакогена происходила в 2020 г. также в центральном его фланге. Возникновение сейсмических событий свидетельствует, что Кировско-Кажимский авлакоген является тектонически подвижной структурой. Землетрясения в основном происходят в бортах авлакогена и, вероятно, приурочены к разломам северо-восточного простирания, контролирующим наиболее погруженный центральный грабен авлакогена. Полученные результаты могут использоваться для оценки сейсмической опасности территории северо-востока Восточно-Европейской платформы.

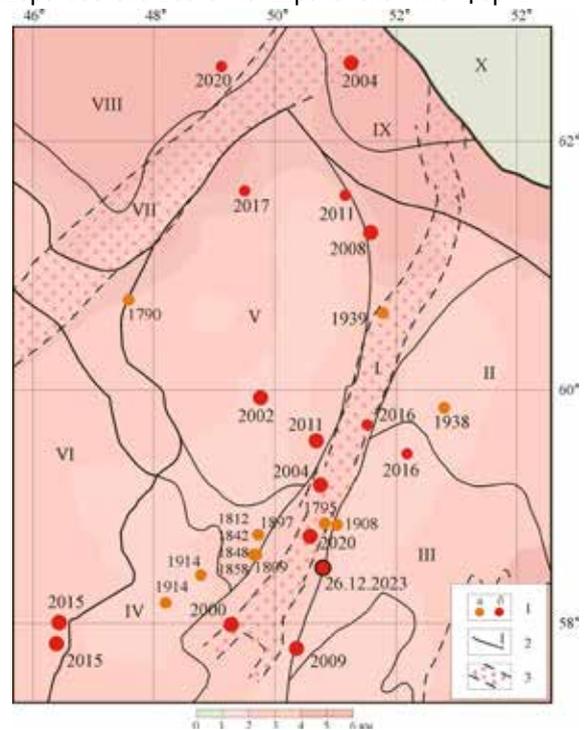


Рисунок 5. Фрагмент схемы тектонического районирования территории Российской Федерации и прилегающих акваторий, масштаб 1 : 2 500 000 [16, 17]: 1 – эпицентры землетрясений: а – исторические, б – инструментальные; 2 – разломы кристаллического фундамента; 3 – континентальные рифты, авлакогены; 4 – надвиги. Римскими цифрами обозначены названия структур: I – Кировско-Кажимский авлакоген, II – Коми-Пермяцкий свод, III – Северо-Татарский свод, IV – Котельничский свод, V – Сысольский свод, VI – Московская синеклиза, VII – Среднерусский авлакоген, VIII – Мезенская синеклиза, IX – Вычегодский прогиб, X – Тиманское поднятие.  
Figure 5. Fragment of the tectonic zoning scheme of the territory of the Russian Federation and adjacent water areas, scale 1 : 2 500 000 [16, 17]: 1 – epicentres of earthquakes: а – historical, б – instrumental; 2 – crystalline basement faults, 3 – continental rifts, aulacogens, 4 – thrust faults. Roman numerals denote the names of structures: I – Kirov-Kazhim aulacogen, II – Komi-Permyak vault, III – North-Tatar vault, IV – Kotelnichy vault, V – Sysola vault, VI – Moscow syneclyse, VII – Middle Russian aulacogen, VIII – Mezen syneclyse, IX – Vychegda trough, X – Timan uplift.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Источники и литература

1. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации ОСР-2015. Приложение А // СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. – Москва : Стандартинформ, 2018. – С. 59–99.
2. Верховланцев, Ф. Г. Сейсмичность Урала и Западной Сибири в 2018–2019 гг. / Ф. Г. Верховланцев, И. В. Голубева, Р. А. Дягилев, Т. В. Злобина // Землетрясения Северной Евразии. – 2023. – Вып. 26 (2018–2019 гг.). – С. 225–238. – DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.19>.
3. Нестеренко, М. Ю. Автоматизированная распределенная ГИС система мониторинга и оценки риска функционирования природно-техногенных объектов нефтегазовой промышленности / М. Ю. Нестеренко, М. С. Карпюк, В. В. Влацкий // Российскому научному обществу анализа риска 15 лет: основные итоги и перспективы деятельности: сб. – Москва, 2018. – С. 347–352.
4. Arkhangelsk Seismic Network. – URL: <https://doi.org/10.7914/SN/АН> (дата обращения: 15.01.2024).
5. EarthScope Data Center (IRISDMC). (2023). NSF SAGE Facility. Global Seismograph Network – IRIS/IDA. International Federation of Digital Seismograph Networks. URL: <https://doi.org/10.7914/SN/II> (дата обращения: 11.01.2024).
6. Красилов, С. А. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG / С. А. Красилов, М. В. Коломиец, А. П. Акимов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы международной сейсмологической школы, посвященной 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». – Обнинск : ГС РАН, 2006. – С. 77–83.
7. Фёдоров, А. В. Система автоматического мониторинга сейсмичности Европейской Арктики / А. В. Фёдоров, В. Э. Асминг, З. А. Евтюгина, А. В. Прокудина // Сейсмические приборы. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 29–39. – DOI: 10.21455/si2018.1-3.
8. Schueller, W. Crustal and uppermost mantle velocity structure of northern Eurasia along the profile Quartz / W. Schueller, I. B. Morozov, S. B. Smithson // Bulletin of the Seismological Society of America. – 1997. – № 87. – P. 414–426.
9. Kennett, B. L. N. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times / B. L. N. Kennett, E. R. Engdahl, R. Buland // Geophysical Journal International. – 1995. – № 122. – P. 108–124.
10. Габсатарова, И. П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды / И. П. Габсатарова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. – Обнинск : ГС РАН, 2006. – С. 49–53.
11. Габсатарова, И. П. Определение магнитуды MLV по поверхностным волнам региональных событий Кольского полуострова / И. П. Габсатарова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск : ГС РАН, 2011. – С. 107–113.
12. Годзиковская, А. А. Ретроспективный анализ первичных материалов о сейсмических событиях, зарегистрированных на Кольском полуострове и прилегающих территориях в XX веке / А. А. Годзиковская, В. Э. Асминг, Ю. А. Виноградов. – Москва : Ваш полиграфический партнер, 2010. – 130 с.
13. Сейсмологический мониторинг Западного Урала. – URL: [http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page\\_id=718&pic=regst](http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=718&pic=regst) (дата обращения: 15.01.2024).
14. NORSAR (1971). NORSAR Seismic Bulletins, <https://doi.org/10.21348/b.0001> (дата обращения: 11.01.2024).
15. Геоинформационная система Кировской области. – URL: <https://gis.geokirov.ru/> (дата обращения: 15.01.2024).
16. Схема тектонического районирования территории Российской Федерации и прилегающих акваторий. Масштаб 1 : 2 500 000. Всероссийский научно-исследовательский институт им. А. П. Карпинского (ФГБУ «ВСЕГЕИ»). – URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/webmapget/index.php> (дата обращения: 17.04.2024).
17. Петров, О. В. Тектоническая карта Российской Федерации и прилегающих акваторий масштаба 1 : 2 500 000: принципы создания, содержание, предварительные результаты / О. В. Петров, Г. А. Бабин, А. И. Ханчук, С. Д. Соколов // Петрология и рудоносность магматических формаций. Материалы научной конференции, посвященной памяти член-корреспондента АН СССР и РАН Г. В. Полякова и профессора А. Г. Владимировича. – Новосибирск, 2022. – С. 153–155.
18. Носкова, Н. Н. Макросейсмическое поле Вятского землетрясения 13 августа 1897 г. / Н. Н. Носкова, Ф. Г. Верховланцев, Р. А. Дягилев // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XVII Международной сейсмологической школы / отв. ред. А. А. Маловичко. – Обнинск : ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 87.
19. Габсатарова, И. П. Верхошижемское землетрясение 18 января 2000 года с  $M_{PSP}=4.0$ ,  $K_p=11.2$ ,  $I_0=5$  (Кировская область) / И. П. Габсатарова, Л. С. Чепкунас // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск : ГС РАН, 2006. – С. 230–235.
20. Столетие Вятской губернии, 1780–1880. Т. 1 Вятский губернский статистический комитет, 1880. Национальная библиотека Удмуртской республики. – URL: <https://elibrary.unatlib.ru/handle/123456789/7647> (дата обращения: 11.01.2024).
21. Хроника. Землетрясение // Вятская речь. – 15 марта 1908 г. – № 23. – С. 3.
22. Памятная книжка Вятской губернии и календарь на 1909 г. (Год XXX-й). Издание губернского статистического комитета. – Вятка : Губернская типография, 1909.
23. Носкова, Н. Н. Землетрясение 16 сентября 2020 г. в Кировско-Кажимском авлакогене / Н. Н. Носкова // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2020. – Т. 47, № 4. – С. 92–100. – <https://doi.org/10.21455/VIS2020.4-6>.

## References

1. Obshchee seismicheskoe raionirovanie territorii Rossiiskoi Federatsii OSR-2015. Prilozhenie A [General seismic

- zoning of the territory of the Russian Federation OSR-2015. Appendix A] // SP 14.13330.2018. Stroitelstvo v seismicheskikh raionakh [Housebuilding in seismic areas]. – Moscow : Standartinform, 2018. – P. 59–99.
2. Verkholantsev, F. G. Seismichnost Urala i Zapadnoj Sibiri v 2018–2019 gg. [Seismicity of the Urals and Western Siberia in 2018–2019] / F. G. Verkholantsev, I. V. Golubeva, R. A. Dyagilev, T. V. Zlobina // *Zemletriaseniia Severnoi Evrazii* [Earthquakes in Northern Eurasia]. – 2023. – Issue 26 (2018–2019). – P. 225–238. – DOI: <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2023.26.19>.
  3. Nesterenko, M. Yu. Avtomatizirovannaya raspredelennaya GIS sistema monitoringa i ochenki riska funkcionirovaniya prirodno-tekhnogennykh ob'ektov neftegazovoy promyshlennosti [Automated distributed GIS system of monitoring and risk assessment of natural-technological facilities of oil and gas industry] / M. Yu. Nesterenko, M. S. Karpyuk, V. V. Vlaskiy // *Rossijskomu nauchnomu obshchestvu analiza riska 15 let : osnovnye itogi i perspektivy deyatelnosti* [The Russian Scientific Society of Risk Analysis is 15 years old : Main Results and activity prospects] : Collection of articles. – Moscow, 2018. – P. 347–352.
  4. Arkhangel'sk Seismic Network. – URL: <https://doi.org/10.7914/SN/AH> (accessed: 15.01.2024).
  5. EarthScope Data Center (IRISDMC). (2023). NSF SAGE Facility. Global Seismograph Network – IRIS/IDA. International Federation of Digital Seismograph Networks. URL: <https://doi.org/10.7914/SN/II> (accessed: 30.12.2023).
  6. Krasilov, S. A. Organizatsiya processa obrabotki cifrovyykh seismicheskikh dannykh s ispolzovaniem programmnoy kompleksa WSG [Organization of the processing of digital seismic data with the WSG program complex] / S. A. Krasilov, M. V. Kolomic, A. P. Akimov // *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]: Materials of the International Seismological School Dedicated to the 100-anniversary of the Pulkovo and Ekaterinburg Seismic Stations. – Obninsk : GS RAS, 2006. – P. 77–83.
  7. Fedorov, A. V. Sistema avtomaticheskogo monitoringa seismichnosti Evropejskoj Arktiki [Automated seismic monitoring system for the European Arctic] / A. V. Fedorov, V. E. Asming, Z. A. Evtugina, A. V. Prokudina // *Seismicheskie pribory* [Seismic Instruments]. – 2018. – Vol. 54. – № 1. – P. 29–39. – DOI: 10.21455/si2018.1-3.
  8. Schueller, W. Crustal and uppermost mantle velocity structure of northern Eurasia along the profile Quartz / W. Schueller, I. B. Morozov, S. B. Smithson // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1997. – № 87. – P. 414–426.
  9. Kennett, B. L. N. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times / B. L. N. Kennett, E. R. Engdahl, R. Buland // *Geophysical Journal International*. – 1995. – № 122. – P. 108–124.
  10. Gabsatarova, I. P. Vnedrenie v rutinnuyu praktiku podrazdelenij Geofizicheskoy sluzhby RAN procedury vychisleniya lokalnoj magnitudy [Introduction of the local magnitude calculation procedure into the routine practice of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences] / I. P. Gabsatarova // *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh* [Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data] : Materials of the International Seismological School Dedicated to the 100-anniversary of the Pulkovo and Ekaterinburg Seismic Stations. – Obninsk : GS RAS, 2006. – P. 49–53.
  11. Gabsatarova, I. P. Opreделение magnitudy MLV po poverhnostnym volnam regionalnykh sobytij Kolskogo poluostrova [Determination of MLV magnitude from surface waves of regional events of the Kola Peninsula] / I. P. Gabsatarova // *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data]. Materials of the Sixth International Seismological School. – Obninsk : GS RAS, 2011 – P. 107–113.
  12. Godzikovskaya, A. A. Retrospektivnyj analiz pervichnykh materialov o seismicheskikh sobyitiyah, zaregistrirovannykh na Kolskom poluostrove i prilgayushchih territoriyah v XX veke [Retrospective analysis of primary data about seismic events recorded in the Kola Peninsula and neighboring territories in the XX century] / A. A. Godzikovskaya, V. E. Asming, Yu. A. Vinogradov. – Moscow : Vash poligraficheskii partner, 2010. – 130 p.
  13. Seismologicheskij monitoring Zapadnogo Urala [Seismological monitoring of the Western Urals]. – URL: [http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page\\_id=718&pic=regst](http://pts.mi-perm.ru/mlp/?page_id=718&pic=regst) (accessed : 15.01.2024).
  14. NORSAR (1971). NORSAR Seismic Bulletins, <https://doi.org/10.21348/b.0001> (accessed : 11.01.2024).
  15. Geoinformacionnaya sistema Kirovskoj oblasti [Geoinformation system of the Kirov Region]. – URL: <https://gis.geokirov.ru/> (accessed : 17.04.2024)
  16. Skhema tektonicheskogo rajonirovaniya territorii Rossijskoj Federatsii i prilgayushchih akvatorij. Masshtab 1:2 500 000 [Tectonic classification plan of the Russian Federation and the adjacent water areas, scale 1:2500000]. A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). – URL : <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/webmapget/index.php> (accessed : 17.04.2024).
  17. Petrov, O. V. Tektonicheskaya karta Rossijskoj Federatsii i prilgayushchih akvatorij masshtaba 1:2 500 000 : principy sozdaniya, soderzhanie, predvaritelnye rezultaty [Tectonic map of the Russian Federation and adjacent water areas, scale 1:2 500 000 : principles of creation, content, preliminary results] / O. V. Petrov, G. A. Babin, A. I. Khanchuk, S. D. Sokolov // *Petrologiya i rudonosnost magmaticheskikh formacij* [Petrology and Ore Content of Igneous Formations]. Materials of the Scientific Conference dedicated to the Memory of the Corresponding Member of the USSR AS and RAS G. V. Polyakov and Professor A. G. Vladimirova. – Novosibirsk, 2022. – P. 153–155.
  18. Noskova, N. N. Makrosejsmicheskoe pole Vyatskogo zemletryaseniya 13 avgusta 1897 g. [Macroseismic field of the Vyatka earthquake of August 13, 1897] / N. N. Noskova, F. G. Verkholantsev, R. A. Dyagilev // *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh* [Modern Methods of Processing and Interpretation of Seismological Data]. Materials of the XVII International Seismo-

- logical School / Resp. editor A. A. Malovichko. – Obninsk: FRC EGS RAS, 2023. – P. 87.
19. Gabsatarova, I. P. Verhoshizhenskoe zemletryasenie 18 yanvarya 2000 goda s MPSP=4.0, Kp=11.2, I0=5 (Kirovskaya oblast) [The Verkhoshizhem earthquake of January 18, 2000 with MPSP=4.0, Kp=11.2, I0=5 (Kirov Region)] / I. P. Gabsatarova, L. S. Chepkunas // Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 2000 godu [Earthquakes of Northern Eurasia in 2000]. – Obninsk : GS RAS, 2006. – P. 230–235.
  20. Stoletie Vyatskoj gubernii, 1780–1880. T. 1. Vyatskij gubernskij statisticheskij komitet, 1880. Nacionalnaya biblioteka Udmurtskoj respubliky [Centenary of the Vyatka province, 1780–1880. Vol. 1. Vyatka Provincial Statistical Committee, 1880. National Library of the Udmurt Republic]. URL: <https://elibrary.unatlib.ru/handle/123456789/7647> (accessed: 01.11.2024).
  21. Hronika. Zemletryasenie [Chronicle. Earthquake] // Vyatskaya rech [Vyatka Speech]. – March 15, 1908. – № 23. – P. 3.
  22. Pamyatnaya knizhka Vyatskoj gubernii i kalendar na 1909 g. (God XXX-j). Izdanie gubernskogo statisticheskogo komiteta [Commemorative book of the Vyatka province and 1909 calendar (Year XXX). Publication of the Provincial Statistical Committee]. – Vyatka : Gubernskaya tipografiya, 1909.
  23. Noskova, N. N. Zemletryasenie 16 sentyabrya 2020 g. v Kirovsko-Kazhimskom avlakogene [Earthquake of September 16, 2020 in the Kirov-Kazhim aulacogen] / N. N. Noskova // Voprosy inzhenernoi seismologii [Engineering Seismology Issues]. – 2020. – Vol. 47. – № 4. – P. 92–100. – DOI: 10.21455/VIS2020.4-6.

### Благодарность (госзадание)

Автор выражает глубокую признательность коллегам из Горного института УрО РАН г. Перми, Архангельской сейсмической сети, ФИЦ ЕГС РАН г. Обнинска и Отдела геоэкологии Оренбургского ФИЦ УрО РАН за предоставленные записи сейсмических событий.

Исследования выполнены в рамках реализации государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГР № 122040600012-2).

### Acknowledgements (state task)

The author is deeply grateful to the colleagues of the Mining Institute UB RAS (Perm), the Arkhangelsk Seismic Network, the FRC UGS RAS (Obninsk), and the Department of Geoecology of the Orenburg FRC UB RAS for the providing records of seismic events.

The research was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS (state registration № 122040600012-2).

### Информация об авторе:

**Носкова Наталия Николаевна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; ORCID 0000-0001-8590-011X (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: noskova@geo.komisc.ru).

### About the author:

**Nataliya N. Noskova** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: noskova@geo.komisc.ru).

### Для цитирования:

Носкова, Н. Н. Землетрясение 26 декабря 2023 года в Кировско-Кажимском авлакогене / Н. Н. Носкова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 98–105.

### For citation:

Noskova, N. N. Zemletryasenie 26 dekabrya 2023 goda v Kirovsko-Kazhimskom avlakogene [Earthquake on December 26, 2023 in the Kirov-Kazhim aulacogen] / N. N. Noskova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2024. – № 3 (69). – P. 98–105.

Дата поступления статьи: 22.04.2024

Прошла рецензирование: 24.04.2024

Принято решение о публикации: 17.05.2024

Received: 22.04.2024

Reviewed: 24.04.2024

Accepted: 17.05.2024

## Взаимосвязь динамики оползневого процесса в долине реки Воркуты и основных климатических параметров

А. Н. Вихоть, В. А. Лютоев

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
vikhhot.anna@mail.ru

### Аннотация

Причинами активизации оползневого процесса на территории жилой застройки в г. Воркуте являются эрозия вследствие мерзлотного и гидрогенного крипов и обводнение склона поверхностными водами. В статье дана оценка взаимосвязи динамики движения оползня, глубины сезонного промерзания грунтов и основных климатических параметров, влияющих на перечисленные показатели: мощность снежного покрова, средняя температура воздуха холодного периода, количество холодных дней, количество жидких осадков – за период 2010–2020 гг. Расчеты глубины промерзания проведены в условиях залегания техногенных грунтов и полускальных горных пород двумя методами, основанными: 1 – на термических свойствах грунтов и горных пород и некоторых климатических параметрах, 2 – на теплопроводности трехслойной среды (снежный покров, мерзлый и талый грунты) и их тепловом балансе. Среднее расхождение расчетных и некоторых наблюдаемых глубин промерзания техногенного грунта – 30 %. Коэффициент корреляции  $K_{кор}$  составил 0.86 и 0.62. По корреляционному анализу Грея средняя температура воздуха холодного периода явилась важным параметром влияния на эталонную последовательность – динамику движения оползня. Наиболее значимое влияние на глубину промерзания грунтов оказали длительность холодного периода и температура воздуха. В обеих последовательностях существенным влияющим параметром оказалось и количество жидких осадков.

### Ключевые слова:

глубина промерзания, оползень, климатические параметры, корреляционный анализ Грея

### Введение

В регионах, где преобладает холодный климат и среднемесячная температура воздуха за холодный период ниже 0 °С, происходят циклы промерзания–оттаивания в грунтах. По некоторым данным [1, 2], примерно 50 % суши в мире подвержено вышеуказанным цикли-

## Relationship between the dynamics of landslide process in the Vorkuta River valley and the main climatic parameters

A. N. Vikhot, V. A. Lyutoev

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktывkar  
vikhhot.anna@mail.ru

### Abstract

Erosion due to frozen and hydrogenic creep and flooding of the slope with surface waters are the reasons for the landslide revival in residential areas of Vorkuta. We have evaluated the interlink between landslide dynamics, seasonal frost depth and main climatic parameters affecting the above indexes as snow accumulation, mean air temperature of cold year period, number of cold days and amount of liquid precipitation for 2010–2020. Frost depths for technogenic grounds and semi-rocks have been calculated by two methods based: 1 – on the thermal properties of soils and rocks and some climatic parameters, 2 – on the heat conductance of a three-layer medium (snow cover, frozen and thawed soils) and its heat balance. The mean difference between the calculated and some observed frost depths in technogenic grounds is 30 %. The correlation coefficient  $K_{cor}$  was 0.86 and 0.62. According to the Grey correlation analysis, the mean air temperature for the cold year period is an important parameter affecting the reference sequence, i.e. landslide dynamics. Cold period length and air temperature best affected the frost depth. Liquid precipitation amount is found to be another significant parameter for both reference sequences.

### Keywords:

frost depth, landslide, climatic parameters, Grey correlation analysis

ческим процессам, одновременно с которыми изменение климатических показателей по территории происходит неравномерно. В связи с этим меняются структурная целостность, физические и механические свойства горных пород. Температура воздуха, влажность, теплопрово-

днось почвы и грунта, осадки и скорость ветра эффективно воздействуют на глубину сезонных промерзаний и оттаиваний грунта. Считается, что наиболее значимым фактором, влияющим на тепловой баланс геологической среды, является температура воздуха, в частности и на Восточно-Европейской равнине [3]. Формула Стефана – одна из первых, созданных для оценки глубины промерзания почвы и грунтов [4]. Позже различными методами многократно была доказана взаимосвязь между температурой воздуха и глубиной промерзания грунтов [5–9]. Также многолетние наблюдения за значениями глубины промерзания и оттаивания показали, что термический режим грунтов прямо пропорционально зависит от высоты снежного покрова, его плотности, теплопроводности и структуры, что оценено методами статистического анализа [3, 10–12]. В целом грунты территорий с наибольшим накоплением снега имеют более высокую температуру и промерзают на меньшую глубину. Более полувека назад В. А. Кудрявцев предложил уравнение для расчета глубины промерзания грунта, объединив попеременное отепляющее и охлаждающее действие снежного покрова на грунт в зависимости от режима снегонакопления и амплитуды годовых колебаний температуры воздуха [13]. В настоящее время на практике такие исследования широко проводятся в строительной климатологии, при проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений [14], автомобильных и железных дорог, в сельском хозяйстве [15] и экологии [16]. Дополнительно стоит отметить, что в области распространения многолетнемерзлых толщ состояние криолитозоны отмечается как неустойчивое [17, 18], и поэтому там ускорено протекание экзогенных геологических процессов и явлений, таких как криогенное выветривание, оползни, обвалы и т. д.

В районе исследований г. Воркуты (67°30' с. ш. 64°02' в. д.) особого внимания заслуживает оползневый процесс на территории жилой застройки на ул. Шахтерская набережная. По результатам проведенного анализа параметров смещения точек бровки оползневого уступа за 2013–2019 гг. центральная часть оползневого склона имеет преобладающе обвально-осыпной механизм; южную и северную части можно отнести к группе оползней скользяния с нечастыми обвалами [19]. В период 2013–2018 гг. центральная и южная части проходили активную стадию оползания, далее перешли в состояние затухания, что соответствует началу пассивного периода, или нового цикла. До 2017–2018 гг. северная часть пребывала на подготовительном этапе, по окончании которого был отмечен рост трендов с невысоким ускорением. В годы наблюдений отмечалось незначительное повышение среднегодовой температуры воздуха за счет более теплых месяцев с отрицательной температурой воздуха. Наиболее тесная взаимосвязь динамики движения оползня и климатических параметров выявлена со средним значением температуры воздуха месяцев с положительными значениями, коэффициент корреляции  $K_{кор}$  составил

0,58. По данным Государственного казенного учреждения Республики Коми «Геокриологическая служба Республики Коми» (ГКУ РК «Геокриологическая служба»), природными причинами активизации оползневого процесса являются эрозия вследствие мерзлотного и гидрогенного крипов и обводнение склона поверхностными водами.

В связи с этим цель данной работы – оценка глубины сезонного промерзания горных пород на оползневом склоне в долине р. Воркуты и определение взаимосвязи динамики движения оползня, глубины сезонного промерзания грунтов и иных основных климатических параметров, влияющих на перечисленные показатели.

### Климат и геологические условия

Город Воркута расположен в северной части Республики Коми, в южной тундре, где распространена голоценовая и голоценово-плейстоценовая криолитозона, представленная прерывистым массивно-островным распространением многолетнемерзлых пород (10–50 % покрытия) [20]. Ее подошва залегает на глубине 100 м и чуть более [21]. Климат территории – субарктический. По состоянию на 2023 г. за 76 лет среднегодовая температура воздуха составила –5.3 °С, среднегодовое количество осадков – 540 мм. Снежный покров окончательно формируется в середине октября и разрушается в конце мая. Средняя продолжительность периода со снежным покровом – 232 дня. Средняя высота покрова – 0.75 м, максимальная – 1.8 м.

Среднегодовая температура воздуха по метеостанции г. Воркуты за период исследований составила –3.88 °С, среднее значение отрицательных среднесуточных температур воздуха равно –10.99 °С, положительных – +9.16 °С, среднегодовое количество осадков – 549 мм. За период исследований в 2016 г. отмечены минимальные годовое количество осадков (424 мм) и высота снежного покрова (0.43 м) [19].

Рельеф оползневого склона – денудационный, представляющий собой эрозионный склон современной речной долины. Схема оползневого склона показана на рис. 1. Вдоль бровки оползня построен геоэлектрический разрез (рис. 2). По материалам [22], в верхней части разреза залегают техногенные образования (tH) неоднородно-

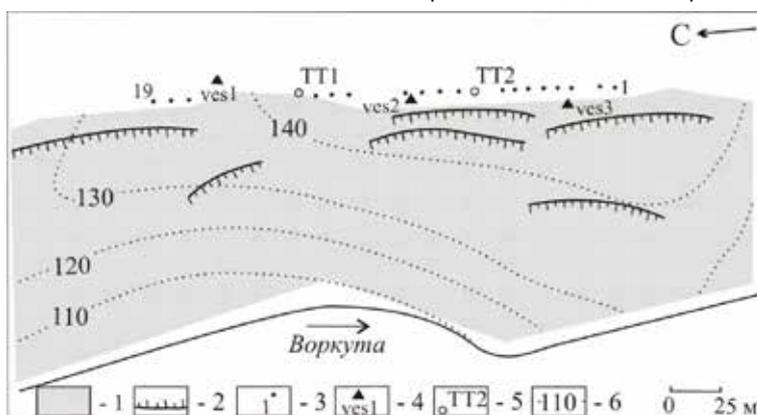


Рисунок 1. Схема района исследований: 1 – оползневый участок, 2 – бровка оползневого срыва, 3 – геодезический репер, 4 – пикет вертикального электрического зондирования, 5 – термометрическая скважина, 6 – абсолютная высота.

Figure 1. Research area scheme: 1 – landslide area, 2 – landslide margin, 3 – bench mark, 4 – picket of vertical electrical sounding, 5 – temperature-recording hole, 6 – absolute height.

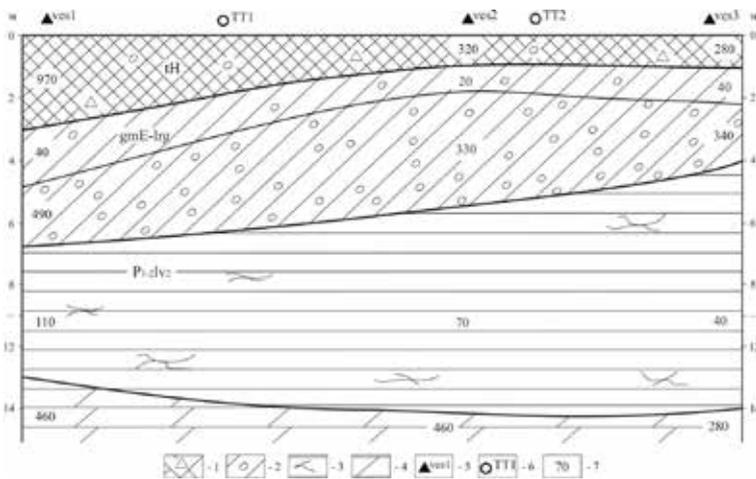


Рисунок 2. Геоэлектрический разрез у бровки оползневого срыва: 1 – насыпные грунты, 2 – суглинки с включениями гравия и гальки, 3 – трещиноватые полускальные отложения, 4 – скальные породы, 5 – пикет вертикального электрического зондирования, 6 – термометрическая скважина, 7 – удельное электрическое сопротивление, Ом·м.  
 Figure 2. Geoelectrical cross-section of the landslide margin: 1 – fill-up grounds, 2 – loams with included gravel and pebble, 3 – crumbling semi-rocky deposits, 4 – hard-rocks, 5 – picket of vertical electrical sounding, 6 – temperature-recording hole, 7 – electrical resistivity, Ohm-m.

го состава мощностью 0.4–1.5 м: щебень, дресва, галька и гравий, встречаются включения суглинка. До глубины 3.0 м состав насыпных грунтов может быть несколько иной: гравий, галька, включения песка и суглинка. Содержание крупных фракций ( $d > 2$  мм) – около 20 %. Такая неоднородность подтверждается большим диапазоном значений удельного электрического сопротивления горизонта – 280–970 Ом·м. Далее до глубины 4.0–6.8 м следуют среднечетвертичные отложения, представленные ледниково-морскими суглинками (gmE-lrg) с увеличением содержания гравия и гальки к подошве и возможными прослоями песков и супесей, среднее содержание – от 5–10 до 20–25 % [23, 24]. Ниже (до 13–14 м) залегают полускальные пермские отложения ( $P_{1-2}lv_2$ ) и представляют элювий коренных пород: переслаивание сильно выветрелых, трещиноватых, глыбо-щебенистых песчаников, алевролитов, аргиллитов, углистых аргиллитов и углей. Также они могут переслаиваться со скальными прочными и средней прочности породами. Скальный горизонт выделяется как слой удельного электрического сопротивления 275–460 Ом·м. В районе исследований находится пермский подмерзлотный водоносный комплекс терригенных отложений.

## Материалы и методы

В данном исследовании глубина промерзания грунта рассчитана двумя эмпирическими методами. Затем с помощью корреляционного анализа Грея определили основные параметры, влияющие на глубину промерзания грунтов и динамику движения оползня. Метод основан на оценке геометрического сходства между главной (эталонной) последовательностью и последовательностями параметров влияния для определения тесноты связи [25]. Эталонными последовательностями в анализе выступали глубина промерзания грунтов и динамика движения оползня.

Уравнение Стефана для определения глубины промерзания горных пород при наличии снежного покрова выглядит следующим образом:

$$h_{пр} = \sqrt{\frac{2\lambda_m t_n \tau}{Q_{\phi} + C_{ом} \frac{t_n}{2} + h_m^2}} - h_m,$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности мерзлой породы, Вт/м·°C;  $t_n$  – средняя температура воздуха, °C;  $\tau$  – продолжительность промерзания на конец месяца холодного периода, ч;  $Q_{\phi}$  – теплота фазового перехода, Вт·ч/м<sup>3</sup>;  $C_{ом}$  – объемная теплоемкость мерзлых пород, Вт·ч/м<sup>3</sup>·°C;  $h_m$  – условная мощность слоя теплоизоляции (снежного покрова), м.

Расчеты глубины промерзания осуществляли на основе задачи теплопроводности трехслойной среды (снег, мерзлые и талые породы) с фазовым переходом на границе мерзлого и талого грунтов по [26]. В расчетах принято, что температура в каждой из сред изменяется линейно. Уравнение теплового баланса, лежащее в основе расчетов, включает энергию фазового перехода, приток тепла из немерзлого грунта и отток в мерзлый грунт и атмосферу.

$$F_1 = cLV + F_2,$$

где  $F_1$  – отток тепла через замерзший грунт и снежный покров от фронта промерзания в атмосферу, Вт/м<sup>2</sup>;  $L$  – энергия фазового перехода, 335 кДж/кг;  $V$  – скорость движения фронта промерзания, см/с;  $F_2$  – отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания, Вт/м<sup>2</sup>.

Тепловой поток выражается по закону Фурье через градиент температуры и теплопроводность и может быть рассчитан:

$$F_1 = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-T_{возд}}{\frac{h_c}{\lambda_c} + \frac{h_{мг}}{\lambda_{мг}}},$$

где  $T_{возд}$  – средняя температура воздуха, °C;  $h_c$  и  $h_{мг}$  – толщина снежного покрова и глубина промерзания горной породы, м;  $\lambda_c$  и  $\lambda_{мг}$  – теплопроводность снега и мерзлого грунта, Вт/м·°C.

Отток тепла на охлаждение талого грунта перед фронтом промерзания определяется по формуле:

$$F_2 = \lambda_{тг} \frac{T_0}{10 - h_{мг}},$$

где  $\lambda_{тг}$  – теплопроводность талого грунта, Вт/м·°C;  $T_0$  – температура отложений на глубине нулевых годовых колебаний. По данному методу принято считать, что глубина нулевых годовых колебаний температуры грунтов – 10 м со значением 2 °C, на начало холодного периода толщина мерзлого грунта принималась 0.005 м.

## Результаты и их обсуждение

Необходимые основные климатические параметры, влияющие на глубину замерзания горных пород: средняя температура воздуха холодного периода, количество жидких осадков, количество холодных дней, высота

снежного покрова – были представлены метеостанцией г. Воркуты. Годовые данные 2010–2020 гг. – в табл. 1. В указанный период наблюдений отмечаются незначительные повышения средней температуры воздуха для холодного периода и средней высоты снежного покрова с небольшими флуктуациями (коэффициенты линейной регрессии положительны, коэффициенты детерминации  $R^2=0.2$  и  $0.6$  соответственно), при этом коэффициент корреляции данных параметров равен  $0.6$ . По средним значениям отрицательных температур воздуха самым теплым оказался период 2019–2020 гг., самым холодным – 2010–2011 гг. Самому теплоту периоду соответствует одна из многоснежных зим, средняя высота снежного покрова составила  $0.55$  м. 2020 год отмечен и высоким количеством жидких осадков –  $292.8$  мм. Максимальное значение –  $302$  мм в 2019 г. Самый холодный период был скуден на осадки: характеризуется относительно низким значением мощности снежного покрова ( $0.35$  м) и количеством жидких осадков ( $201.5$  мм).

#### Климатические параметры города Воркуты

#### Climatic parameters, Vorkuta city

Период	$t_{\text{ср}} \text{ воздуха, } ^\circ\text{C}$	Количество холодных дней	Количество жидких осадков, мм	$h_{\text{ср}} \text{ снежного покрова, м}$
2010–2011	-13.2	214	201.5	0.35
2011–2012	-9.5	203	280.3	0.32
2012–2013	-11.4	210	220.5	0.30
2013–2014	-11.6	240	268.3	0.45
2014–2015	-12.1	242	241.9	0.37
2015–2016	-9.2	218	231.8	0.51
2016–2017	-12.8	227	192.1	0.37
2017–2018	-11.6	232	292.4	0.44
2018–2019	-9.7	214	302.0	0.68
2019–2020	-8.8	203	292.8	0.55

По результатам анализа ежемесячных показателей климатических параметров можно сказать, что в октябре наступают условия для устойчивого сезонного промерзания верхнего слоя горных пород. Средняя температура воздуха составляет  $-3$  °C при разбросе  $-0.2...-6.7$  °C.

При расчетах глубины промерзания для повышения точности получаемых результатов учитывались данные о теплоемкости мерзлых и талых грунтов. По методу Стефана предполагалось, что скрытая теплота влаги в грунтах является единственной теплотой, которая отводится при замерзании. Тепловая энергия, удерживаемая в объемном виде, выделяемая при условии, когда температура почвы и грунтов падает до точки замерзания и ниже, не учитывалась. Расчетная схема, предложенная Фроловым и др. [26, 27], построена на основе перехода теплового потока в трехслойной среде: снежный покров, мерзлый и талый грунты. Для начальных условий толщина мерзлого слоя сверху была принята  $0.005$  м. При изменении температуры воздуха и снега в снеге варьируется содержание кристаллической, жидкой и парообразной фаз воды, поэтому в течение холодного периода плотность снега и его теплопроводность меняются. По данным ГКУ РК «Гео-

криологическая служба», плотность снега в районе исследований варьирует в диапазоне  $180-600$  кг/м<sup>3</sup>, поэтому для расчетов принята плотность  $450$  кг/м<sup>3</sup>. Ей соответствует коэффициент теплопроводности снега  $\lambda_c=0.49$  Вт/м·°C. Режим промерзания грунтов определялся для верхней части оползневого склона в районе размещения термометрических скважин № 1 и 2 (рис. 2), где в верхней части разреза до глубины  $3$  м находятся техногенные грунты, и для склоновой части, где обнажены полускальные горные породы. Результаты расчетов и их сравнение между собой и с некоторыми наблюдаемыми данными отображены на рис. 3 и 4. Среднее расхождение расчетных и наблюдаемых глубин промерзания техногенного грунта составляет  $30$  % при значительных и сильных коэффициентах корреляции  $0.67-0.92$ . Расчетные данные по схеме, предложенной Фроловым и др., несколько ниже фактически измеренных, но в целом они воспроизводят динамику процесса промерзания, как и значения, полученные по методу Стефана (рис. 3). В разные годы различия в глубине

Таблица 1

Table 1

промерзания составляли около  $50$  %. Основное промерзание грунта происходит к декабрю–январю – до  $90$  % от всего сезонного промерзания (рис. 3). Небольшой снежный покров и низкие температуры воздуха в начале холодного периода способствуют такому стремительному промерзанию. С января при установлении большей мощности снежного покрова графики динамики промерзания становятся пологими и имеют рост от  $0.02$  до  $0.3$  м/мес. Коэффициенты корреляции мощности снежного покрова и расчетных глубин промерзания, определенные по методам Стефана и Фролова и др., составили  $0.86$  и  $0.62$  соответственно.

Результаты корреляционного анализа Грея динамики движения оползня (табл. 2), глубины промерзания грунтов на оползневом склоне и климатические параметры влияния (мощность снежного покрова, средняя температура воздуха холодного периода, количество холодных дней, количество жидких осадков) представлены в табл. 3. Коэффициент корреляции Грея рассчитан по уравнению:

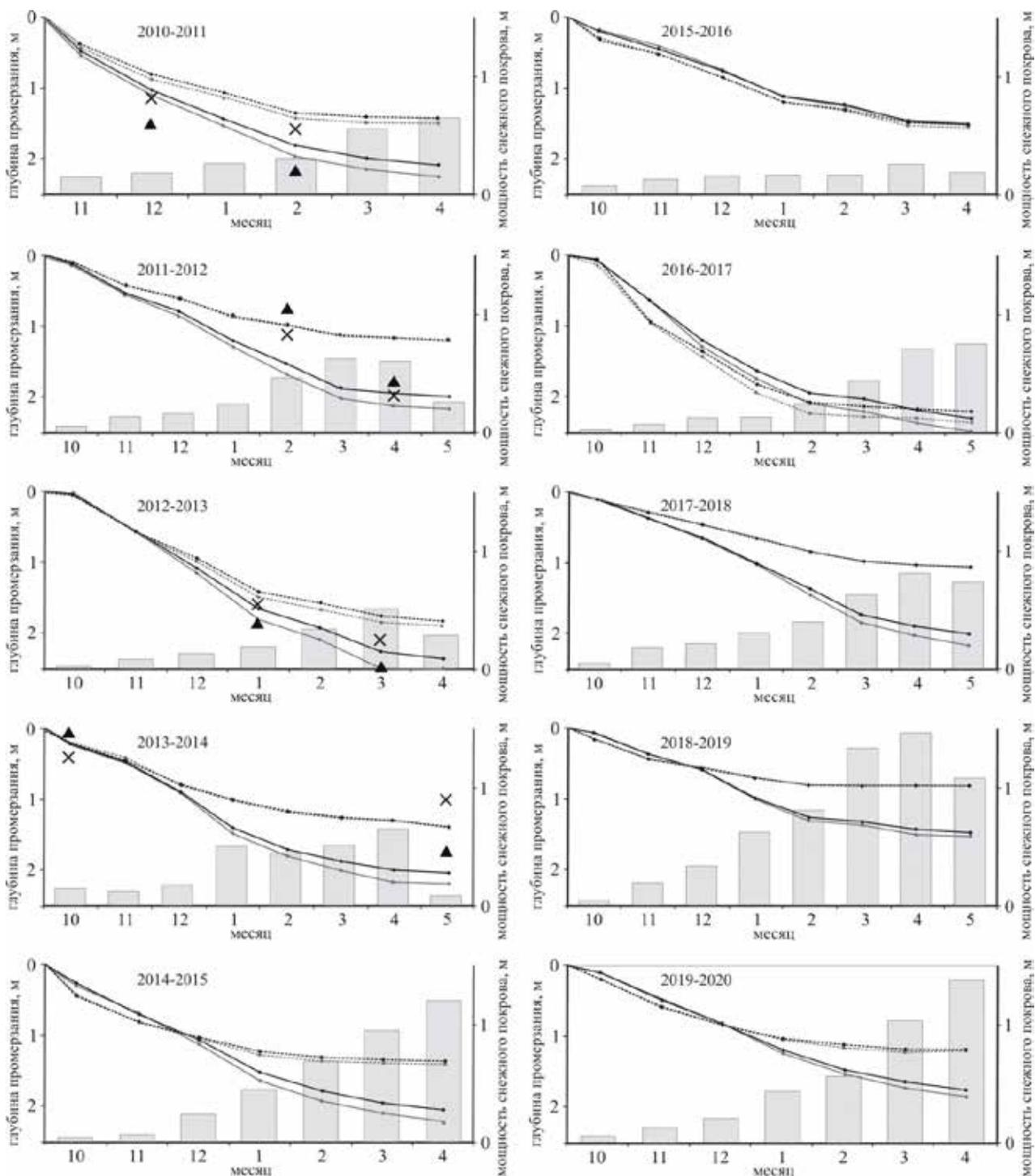
$$\xi(x_0(k), x_1(k)) = \frac{\min|x_0(k) - x_1(k)| + \rho \max|x_0(k) - x_1(k)|}{|x_0(k) - x_1(k)| + \rho \max|x_0(k) - x_1(k)|},$$

где  $x_0=(x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k))$  – главная последовательность,  $x_1=(x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(k))$  – последовательности сравнения и  $\rho$  – коэффициент разложения  $[0;1]$ , обычно принимаемый  $0.5$ .

Степень корреляции Грея определена по формуле:

$$\xi_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0i}(k).$$

Последовательности корреляции Грея выглядят следующим образом: смещение оползневых точек > средняя температура воздуха холодного периода > количество жидких осадков > мощность снежного покрова > глубина промерзания горных пород; глубина промерзания > коли-



рассчитанные по Стефану: — - полускальные, — - техногенные; по Фролову и др.: - - - - полускальные, - - - - техногенные; наблюдаемые в: X - ТТ1, ▲ - ТТ2; ■ - мощность снежного покрова

Рисунок 3. Рассчитанные и наблюдаемые глубины промерзания и мощности снежного покрова.  
Figure 3. Calculated and observed frost and snow depths.

чество холодных дней > средняя температура воздуха холодного периода > количество жидких осадков > мощность снежного покрова. Наиболее определяющее влияние на глубину промерзания грунтов оказывают длительность холодного периода и температура воздуха. При изучении динамики движения оползня по методу Грея важным параметром влияния явилась средняя температура воздуха холодного периода. В то же время в обеих последовательностях существенным влияющим параметром оказалось

количество жидких осадков, иными словами, влажность грунтов – еще один необходимый наблюдаемый параметр. Для более точного анализа в аналогичных исследованиях важно было бы измерять уровень грунтовых вод и глубину проникновения поверхностных вод.

В инженерной геологии существует параметр «индекс промерзания поверхности» – искусственная величина, которая зависит от температуры воздуха и продолжительности холодного периода. На рис. 4 рассчитанные

Таблица 2  
**Абсолютные смещения оползневых точек, мм**  
 Table 2  
**Absolute displacements of landslide points, mm**

Точка наблюдений	Год наблюдений					
	2014	2015	2016	2017	2018	2019
1	8.2	15.1	14.6	17.6	7.8	8
2	5.6	6.57	6.9	9.3	4.2	3.3
3	1.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.5
4	0.4	0.5	0.3	0.2	0.0	0.2
5	2.5	2.5	0.7	0.1	0.1	0.4
6	1.0	0.4	0.4	0.3	0.3	0.1
7	2.2	0.1	0.2	0.3	1.7	1.6
8	1.3	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2
9	0.4	0.8	1.6	1.2	2.5	0.4
10	3.2	1.3	3.4	5.2	7.25	6
11	16.5	13.3	201.6	128.0	59.7	50.2
12	21.7	11.3	199.5	139.5	46.8	56.2
13	49.3	16.7	57.2	202.8	114.3	232.9
14	6.8	9.5	251.4	241.9	3.0	9.6
15	0.7	1.0	0.4	0.1	0.9	2.6
16	0.4	0.2	4.9	4.6	0.0	0.1
17	0.4	1.0	1.7	4.1	4.7	0.0
18	0.0	0.0	1.7	1.3	0.6	2.0
19	0.0	0.4	1.1	1.4	0.3	0.1

**Результаты корреляционного анализа Грея**

**Results of the Grey correlation analysis**

Степень корреляции смещения оползневых точек				
Глубина промерзания горных пород по методу Стефана ( $Cth_{пр}$ )	Глубина промерзания горных пород по методу Фролова и др. ( $Фrh_{пр}$ )	$t_{cp}$	$h_{cp}$ снежного покрова	Количество жидких осадков
0.72	0.63	0.85	0.72	0.79
Степень корреляции глубины промерзания горных пород				
	Количество холодных дней	$t_{cp}$	$h_{cp}$ снежного покрова	Количество жидких осадков
По методу Стефана	0.95	0.89	0.73	0.86
По методу Фролова и др.	0.95	0.89	0.59	0.86



Рисунок 4. Распределение рассчитанной глубины промерзания.  
 Figure 4. Distribution of calculated frost depths.

глубины промерзания сопоставлены с индексами промерзания поверхности (табл. 4) при среднегодовых температурах. Глубина промерзания в целом имеет тенденцию

роста с увеличением индекса промерзания поверхности по обоим расчетным методам, что подтверждает последовательности корреляции Грея, полученные выше. При одинаковых индексах промерзания глубина промерзания более выветрелых пород выше, чем у техногенных грунтов. Это связано с тем, что полускальные породы обладают большей теплопроводностью, чем песчаные отложения с гравием и галькой, и более выветрелые полускальные породы имеют более высокую влагоемкость ввиду трещиноватости, чем техногенные грунты. Минимальные значения индексов промерзания наблюдались в самый теплый год и многоснежный холодный период 2019–2020 гг. Максимальные значения, соответственно, зафиксированы в период, когда среднегодовая температура воздуха была минимальной, однако мощность снежного покрова в холодный период 2013–2014 гг. имела среднее значение 0.45 м и максимальное – 0.65 м.

### Заключение

В ходе исследований была осуществлена оценка глубины сезонного промерзания горных пород на оползневом склоне в криолитозоне в долине р. Воркуты. Для этого использовались методы Стефана и предложенный Фроловым и др. Расчетные данные частично сопоставлены с наблюдаемыми и также сопоставлены с индексами промерзания поверхности. Кроме этого, с помощью корреляционного анализа Грея оценено геометрическое сходство между главной (эталонной) последовательностью динамики движения оползня, глубины сезонного промерзания грунтов и последовательностями параметров влияния: количества холодных дней в году, средней температуры воздуха холодного периода, количества жидких осадков и мощности снежного покрова. По результатам комплексного анализа можно сделать следующие выводы:

- в октябре наступают климатические условия для устойчивого сезонного промерзания верхнего слоя горных пород, тогда же начинает формироваться устойчивый снежный покров, средняя температура воздуха октября за период исследований составляет  $-3^{\circ}\text{C}$ ;
- основное промерзание грунта и горных пород происходит к концу декабря–января – до 90 % от всего сезонного промерзания;
- глубина промерзания, определенная по методу Стефана, который основан на термических свойствах грунтов и горных пород, температуре поверхности, воздуха и других климатических параметрах,

## Параметры замерзания поверхности

## Surface freezing parameters

Период	2010–2011	2011–2012	2012–2013	2013–2014	2014–2015	2015–2016	2016–2017	2017–2018	2018–2019	2019–2020
$t_{\text{ср}}$ воздуха, °С	-3.2	-3.2	-4.7	-5.9	-3.5	-1.9	-3.1	-4.2	-4.2	-1.2
Индекс промерзания воздуха	684.8	649.6	987.0	1416.0	847.0	414.2	703.7	974.4	898.8	243.6
Индекс промерзания поверхности	616.3	584.6	888.3	1274.4	762.3	372.8	633.3	877.0	808.9	219.2

имеет значения несколько выше, чем по методу, основанному на теплопроводности трехслойной среды (снежный покров, мерзлый и талый грунты) и их тепловом балансе (по Фролову и др.), однако динамика промерзания – идентичная;

– среднее расхождение расчетных и наблюдаемых глубин промерзания техногенного грунта составляет 30 %, коэффициент корреляции наблюдаемых данных в термометрических скважинах № 1 и 2 и рассчитанных по методу Стефана составляет 0.76 и 0.92 и по методу Фролова и др. – 0.67 и 0.9 соответственно;

– в наибольшей степени определяющее влияние на глубину промерзания отложений оказывают длительность холодного периода и температура воздуха, для динамики движения оползня важное значение имеет средняя температура воздуха холодного периода, что подтверждает выводы сорокалетних наблюдений о том, что на Восточно-Европейской равнине на территории России наблюдаются значимые коэффициенты корреляции температуры почвогрунтов на глубинах от 0.9 до 3.2 м с температурой воздуха, особенно эта взаимосвязь существенна в районах с островной и прерывистой мерзлотой [3];

– режим снегонакопления в данных исследованиях имеет значительную степень корреляции Грея с динамикой движения оползня и глубиной промерзания;

– немаловажным влияющим параметром оказалось и количество жидких осадков (степень корреляции глубины промерзания и смещения оползневых точек – 0.79 и 0.86 соответственно), поэтому важно измерять уровень грунтовых вод на оползневом склоне, глубину проникновения поверхностных вод и осуществлять контроль за поверхностным стоком на ул. Шахтерская набережная;

– с целью стабилизации оползневого склона на ул. Шахтерская набережная в г. Воркуте в связи с результатами проведенных исследований предлагаются рекомендации по установке теплоизоляционных экранов на глубину сезонного промерзания грунтов и обустройству дренажных колодцев в теле оползня и выше по склону в грунтах, в настоящее время не вовлеченных в оползневый процесс.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

- Hugh, A. L. Henry. Climate change and soil freezing dynamics : historical trends and projected changes / A. L.

Henry Hugh // *Climatic Change*. – 2008. – Vol. 87. – P. 421–434. – DOI 10.1007/s10584-007-9322-8.

- Tian, S. Cyclic behaviour of coarse-grained materials exposed to freeze-thaw cycles : experimental evidence and evolution model / S. Tian, T. Liang, L. Xianzhang, X. Kong, S. Li [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. – 2019. – Vol. 167. – 167:102815. DOI 10.1016/j.coldregions.2019.102815.
- Шерстюков, А. Б. Корреляция температуры почвогрунтов с температурой воздуха и высотой снежного покрова на территории России / А. Б. Шерстюков // *Криосфера Земли*. – 2008. – Т. XII, № 1. – С. 79–87.
- Stefan, J. Ueber die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere / J. Stefan // *Annalen der Physik*. – 1890. – Vol. 278. – Iss. 2. – 18:965.
- Волкова, Н. Г. Климатические характеристики промерзания почвы на территории РФ / Н. Г. Волкова // *Вестник МГСУ*. – 2011. – № 3. – С. 235–241.
- Jumikis, A. R. Thermal geotechnics / A. R. Jumikis. – New Brunswick : Rutgers University Press, 1977. – 375 p.
- Steurer, P. M. Probability distributions used in 100-year return period of air-freezing index / P. M. Steurer // *Journal of Cold Regions Engineering*. – 1996. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 25–35.
- Erlingsson, S. Correlating air freezing index and frost penetration depth – a case study for Sweden / S. Erlingsson, D. Saliko // *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*. – Mairepav9. – 2020. – Vol. 76. – P. 847–857.
- Zhou, J. Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment / J. Zhou, W. Zhao, Y. Tang // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2021. – Vol. 107 (C) : 103647. DOI 10.1016/j.tust.2020.103647.
- Заболотник, С. И. О роли снежного покрова в формировании температурного режима многолетнемерзлых пород / С. И. Заболотник // *Наука и техника в Якутии*. – 2019. – № 2 (37). – С. 3–7. – DOI: 10.24411/1728-516X-2019-10030.
- Осокин, Н. И. Коэффициент теплопроводности снега и его изменчивость / Н. И. Осокин, А. В. Сосновский, Р. А. Чернов // *Криосфера Земли*. – 2017. – Т. XXI, № 3. – С. 60–68. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68).
- Павлов, А. В. Теплоперенос в природных комплексах Севера России / А. В. Павлов // *Криосфера Земли*. – 2000. – Т. IV, № 4. – С. 22–31.

13. Кудрявцев, В. А. Температура верхних горизонтов вечномерзлой толщи в пределах СССР / В. А. Кудрявцев. – Москва : Изд-во АН СССР, 1954. – 183 с.
14. Yedek, S. A study on determination of the frost depths for building foundations in the Central Anatolia Region of Turkey / Seda Yedek, Muge Elif Orakoglu Firat, Murat Bikce // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – 14 (14) : 1941. DOI 10.1007/s12517-021-08282-x.
15. Kahimba, F. Modeling soil temperature, frost depth, and soil moisture redistribution in seasonally frozen agricultural soils / Frederick Kahimba, Ramanathan Sri Ranjan, Danny D. Mann // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2009. – Vol. 25. – Iss. 6. – P. 871–882. DOI : 10.13031/2013.29237.
16. Курочкина, В. А. Морозное пучение грунтов как фактор геоэкологического риска в условиях города Москвы / В. А. Курочкина, И. Ю. Яковлева // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. – 2020. – № 1. – С. 86–92. – DOI: 10.31857/S0869780920010081.
17. Ананичева, М. Д. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / М. Д. Ананичева, Ю. А. Анохин, М. В. Болгов и др. – Москва : Планета, 2012. – 511 с.
18. Васильев, А. А. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики / А. А. Васильев, А. Г. Гравис, А. А. Губарьков и др. // *Криосфера Земли*. – 2020. – Т. XXIV, № 2. – С. 15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
19. Вихоть, А. Н. Исследование оползневой процесса в условиях сезонномерзлых грунтов (оползневый склон долины р. Воркута) / А. Н. Вихоть // *Вестник МГСУ*. – 2024. – Т. 19, вып. 4. – С. 606–617. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617.
20. Westerveld, L. Arctic permafrost atlas / L. Westerveld, T. Kurvits, T. Schoolmester [et al.]. – Arendal : GRID-Arendal, 2023. – 175 p.
21. Оберман, Н. Г. Экогеология Республики Коми и восточной части Ненецкого автономного округа / Н. Г. Оберман, И. Г. Шеслер, А. И. Рубцов. – Сыктывкар : Пролог-Плюс, 2004. – 256 с.
22. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Издание второе. Масштаб: 1 : 200 000, серия: Полярно-Уральская. Q-41-V, VI (Воркута). Объяснительная записка / под ред. А. И. Водолазского. – Сыктывкар: ЗАО «ГТК МИРЕКО», 2005.
23. Андричева, Л. Н. Плейстоцен Европейского Северо-Востока / Л. Н. Андричева. – Екатеринбург : УрО РАН, 2002. – 323 с.
24. Андричева, Л. Н. Природная среда неоплейстоцена и голоцена на Европейском Северо-Востоке России / Л. Н. Андричева, Т. И. Марченко-Вагапова, М. Н. Буравская, Ю. В. Голубева. – Москва : ГЕОС, 2015. – 224 с.
25. Deng, J. L. Introduction to Grey system theory / J. L. Deng // *Journal of Grey System*. – 1989. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 1–24.
26. Frolov, D. M. Calculation of ground freezing depth under bare and covered with the snow cover ground surface on the site of the meteorological observatory of Lomonosov Moscow State University for winter seasons of 2011/12–2017/18 / D. M. Frolov // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. – 2019. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. 86–90. DOI 10.17816/edgcc21203.
27. Голубев, В. Н. Оценка глубины промерзания грунта на севере ЕТР на основе данных о термических условиях зимних сезонов и режиме снегонакопления / В. Н. Голубев, Г. А. Ржаницын, Д. М. Фролов // *Актуальные проблемы геокриологии: Сборник докладов расширенного заседания научного совета по криологии Земли РАН с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов*. – 2018. – Т. 2. – С. 193–199.

## References

1. Hugh, A. L. Henry. Climate change and soil freezing dynamics : historical trends and projected changes / A. L. Henry Hugh // *Climatic Change*. – 2008. – Vol. 87. – P. 421–434. – DOI 10.1007/s10584-007-9322-8.
2. Tian, S. Cyclic behaviour of coarse-grained materials exposed to freeze-thaw cycles : experimental evidence and evolution model / S. Tian, T. Liang, L. Xianzhang, X. Kong, S. Li [et al.] // *Cold Regions Science and Technology*. – 2019. – Vol. 167. – P. 167:102815. DOI 10.1016/j.coldregions.2019.102815.
3. Sherstyukov, A. B. Korrelyatsiya temperatury pochvo-gruntov s temperaturoy vozdukhа i vysotoy snezhnogo pokrova na territorii Rossii [Correlation of soil temperature with air temperature and snow cover depth in Russia] / A. B. Sherstyukov // *Kriosfera Zemli [The Earth's Cryosphere]*. – 2008. – Vol. XII. – № 1. – P. 79–87.
4. Stefan, J. Ueber die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere / J. Stefan // *Annalen der Physik*. – 1890. – Vol. 278. – Iss. 2. – P. 18:965.
5. Volkova, N. G. Klimaticheskiye kharakteristiki promerzaniya zemli na territorii RF [Climatic characteristics of soil freezing on the territory of the Russian Federation] / N. G. Volkova // *Vestnik MGSU [Bulletin of the Moscow State University]*. – 2011. – № 3. – P. 235–241.
6. Jumikis, A. R. *Thermal Geotechnics* / A. R. Jumikis. – New Brunswick : Rutgers University Press, 1977. – 375 p.
7. Steurer, P. M. Probability distributions used in 100-year return period of air-freezing index / P. M. Steurer // *Journal of Cold Regions Engineering*. – 1996. – Vol. 10. – Iss. 1. – P. 25–35.
8. Erlingsson, S. Correlating air freezing index and frost penetration depth – a case study for Sweden / S. Erlingsson, D. Saliko // *Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements*. – Mairepav9. – 2020. – Vol. 76. – P. 847–857.
9. Zhou, J. Practical prediction method on frost heave of soft clay in artificial ground freezing with field experiment / J. Zhou, W. Zhao, Y. Tang // *Tunnelling and Underground Space Technology*. – 2021. – Vol. 107 (C) : 103647. DOI 10.1016/j.tust.2020.103647.
10. Zabolotnik, S. I. O roli snezhnogo pokrova v formirovanii temperaturnogo rezhima mnogoletnikh nemerzlykh po-

- rod [On the role of snow cover in the formation of the temperature regime of permafrost] / S. I. Zabolotnik // *Nauka i tekhnika v Yakutii* [Science and technology in Yakutia]. – 2019. – № 2 (37). – P. 3–7. – DOI: 10.24411/1728-516X-2019-10030.
11. Osokin, N. I. Koeffitsiyent teploprovodnosti snega i ego izmenchivost' [Effective thermal conductivity of snow and its variations] / N. I. Osokin, A. V. Sosnovskiy, R. A. Chernov // *Kriosfera Zemli* [The Earth's Cryosphere]. – 2017. – Vol. XXI. – № 3. – P. 60–68. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(60-68).
  12. Pavlov, A. V. Teploperenos v kompleksakh Severa Rossii [Heat-transfer in landscape complexes of Northern Russia] / A. V. Pavlov // *Kriosfera Zemli* [The Earth's Cryosphere]. – 2000. – Vol. IV. – № 4. – P. 22–31.
  13. Kudryavtsev, V. A. Temperatura verhnih gorizontov vechnomerzloy tolshchiny v predelakh SSSR [Temperature of upper permafrost horizons within the USSR] / V. A. Kudryavtsev. – Moscow : Publishing House of the USSR AS, 1954. – 183 p.
  14. Yedek, S. A study on determination of the frost depths for building foundations in the Central Anatolia Region of Turkey / Seda Yedek, Muge Elif Orakoglu Firat, Murat Bikce // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2021. – 14 (14): 1941. DOI : 10.1007/s12517-021-08282-x.
  15. Kahimba, F. Modeling soil temperature, frost depth, and soil moisture redistribution in seasonally frozen agricultural soils / Frederick Kahimba, Ramanathan Sri Ranjan, Danny D. Mann // *Applied Engineering in Agriculture*. – 2009. – Vol. 25. – Iss. 6. – P. 871–882. DOI : 10.13031/2013.29237.
  16. Kurochkina, V. A. Moroznoye pucheniye gruntov kak faktor geoekologicheskogo riska v usloviyakh goroda Moskvy [Frost heave soils as a geocological risk factor in the conditions of Moscow] / V. A. Kurochkina, I. Y. Yakovleva // *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geocology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology]. – 2020. – № 1. – P. 86–92. – DOI: 10.31857/S0869780920010081.
  17. Ananicheva, M. D. Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem [Assessment methods of the climate change effects for physical and biological systems] / M. D. Ananicheva, Yu. A. Anokhin, M. V. Bolgov [et al.]. – Moscow : Planet, 2012. – 511 p.
  18. Vasilyev, A. A. Degradatsiya merzloty : rezul'taty mnogoletnego geokriologicheskogo monitoringa v zapadnom sektore Rossiyskoy Arktiki [Permafrost degradation : results of the long-term geocryological monitoring in the Western Sector of Russian Arctic] / A. A. Vasil'yev, A. G. Gravis, A. A. Gubarkov [et al.] // *Kriosfera Zemli* [The Earth's Cryosphere]. – 2020. – Vol. XXIV. – № 2. – P. 15–30. – DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30).
  19. Vikhot, A. N. Issledovaniye opolznevoy protsessa v usloviyakh sezonnomerzlykh gruntov (opolznevy sklon doliny r. Vorkuty) [Study on the landslide process in conditions of seasonally-frozen grounds (landslide slope of the Vorkuta River valley)] / A. N. Vikhot // *Vestnik MGSU* [Bulletin of the Moscow State University]. – 2024. – Vol. 19. – № 4. – P. 606–617. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.606-617.
  20. Westerveld, L. Arctic permafrost atlas / L. Westerveld, T. Kurvits, T. Schoolmester [et al.]. – Arendal : GRID-Arendal, 2023. – 175 p.
  21. Oberman, N. G. Ekogeologiya Respubliki Komi i vostochnoy chasti Nenetskogo Avtonomnogo okruga [Ecogeology of the Komi Republic and the eastern part of Nenets Autonomous Okrug] / N. G. Oberman, I. G. Shesler, A. I. Rubtsov. – Syktyvkar : Prolog Polyus, 2004. – 256 p.
  22. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Izdaniye vtoroye. Masshtab : 1:200 000, seriya : Polyarno-Uralskaya. Q-41-V, VI (Vorkuta). Objasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Second edition. Scale 1:200 000, the Polar-Ural series. Q-41-V, VI (Vorkuta). Explanatory note] / ed. by A. I. Vodolazskiy. – Syktyvkar : ZAO MIREKO State Company, 2005.
  23. Andreicheva, L. N. Pleystotsen Yevropeyskogo Severo-Vostoka [Pleistocene in the European North-East] / L. N. Andreicheva. – Ekaterinburg : UB RAS, 2002. – 323 p.
  24. Andreicheva, L. N. Prirodnaya sreda neopleystotsena i golotsena na Yevropeyskom Severo-Vostoke Rossii [Neopleistocene and Holocene natural environment in the European North-East of Russia] / L. N. Andreicheva, T. I. Marchenko-Vagapova, M. N. Buravskaya, Yu. V. Golubeva. – Moscow : GEOS, 2015. – 224 p.
  25. Deng, J. L. Introduction to Grey system theory / J. L. Deng // *Journal of Grey System*. – 1989. – Vol. 1. – Iss. 1. – P. 1–24.
  26. Frolov, D. M. Calculation of ground freezing depth under bare and snow-covered ground surface on the site of the meteorological observatory of the Lomonosov Moscow State University for winter seasons of 2011/12–2017/18 / D. M. Frolov // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. – 2019. – Vol. 10. – Iss. 2. – P. 86–90. DOI : 10.17816/edgcc21203.
  27. Golubev, V. N. Otsenka glubiny promerzaniya grunta na severe YETR na osnove dannykh o termicheskikh usloviyakh zimnikh sezonov i rezhime snegonakopleniya [Evaluation of ground-freezing depth in the north of ETR using the data on thermal conditions of winter seasons and snow accumulation regime] / V. N. Golubev, G. A. Rzhantzin, D. M. Frolov // *Aktualnye problemy geokriologii* [Actual Problems of Geocryology] : Collection of Reports of the Extended Meeting of the Scientific Council on the Earth's Cryology RAS with the participation of Russian and foreign scientists, engineers and specialists]. – 2018. – Vol. 2. – P. 193–199.

### **Благодарность (госзадание)**

Работа выполнена в рамках темы НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента».

Авторы выражают благодарность Государственному казенному учреждению Республики Коми «Геокриологическая служба Республики Коми» за предоставленные данные.

### **Acknowledgements (state task)**

The work was carried out within the framework of the state task of the Institute of Geology Komi SC UB "Deep structure, geodynamic evolution, geosphere interaction, magmatism, metamorphism and isotopic geochronology of the Timan-North Ural lithospheric segment".

The authors are grateful to the State Treasured Institution of the Komi Republic "Geocryological Service of the Komi Republic" for providing the data.

### **Информация об авторах:**

**Вихоть Анна Николаевна** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 57469531700 (167000, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: vikhot.anna@mail.ru).

**Лютоев Владимир Алексеевич** – кандидат геолого-минералогических наук.

### **About the authors:**

**Anna N. Vikhot** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: vikhot.anna@mail.ru).

**Vladimir A. Lyutov** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy).

### **Для цитирования:**

Вихоть, А. Н. Взаимосвязь динамики оползневой процесса в долине реки Воркуты и основных климатических параметров / А. Н. Вихоть, В. А. Лютоев // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 106–115.

### **For citation:**

Vikhot, A. N. Vzaimosvyaz dinamiki opolznevoogo processa v doline r. Vorkuty i osnovnyh klimaticheskikh parametrov [Relationship between the dynamics of landslide process in the Vorkuta River valley and the main climatic parameters] / A. N. Vikhot, V. A. Lyutov // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 106–115.

Дата поступления статьи: 19.03.2024

Прошла рецензирование: 08.04.2024

Принято решение о публикации: 17.05.2024

Received: 19.03.2024

Reviewed: 08.04.2024

Accepted: 17.05.2024

## Предголоценовый таймырский мамонт Петя: минералого-изотопно-геохимические свойства костей, мягких тканей, кожи, волос и палеоэкологические реконструкции

В. И. Силаев\*, А. С. Шуйский\*, И. В. Смолева\*,  
С. Н. Шанина\*, Е. А. Васильев\*\*,  
Д. В. Киселёва\*\*\*, А. Ф. Хазов\*, Б. А. Макеев\*,  
А. Е. Сухарев\*, А. К. Фокина\*\*\*

\* Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар

\*\* Санкт-Петербургский горный университет,  
г. Санкт-Петербург

\*\*\* Институт геологии и геохимии  
имени академика А. Н. Заварицкого УрО РАН,  
г. Екатеринбург  
silaev@geo.komisc.ru

### Аннотация

Обсуждаются впервые полученные результаты комплексных минералогических, спектроскопических, хроматографических, изотопно-геохимических исследований новых остатков таймырского мамонта, включающих кости, костный коллаген, волосы, кожу и мягкие – мышечные и жировые – ткани. Сделаны выводы о биологическом возрасте, палеоклиматических условиях существования, пищевом рационе животного и о формах и степени фоссилизации его ископаемых остатков.

### Ключевые слова:

таймырский мамонт Петя, кости, костный коллаген, мягкие ткани, кожа, волосы, минералогические, спектроскопические, хроматографические, изотопно-геохимические свойства, палеоэкологические реконструкции

### Введение

До настоящего времени в исследованиях остатков мамонтовой фауны сохраняется традиционное преобладание результатов радиоуглеродного датирования и сугубо органолептической информации с акцентом на решение тафономических, морфолого-анатомических, остеометрических, зоономенклатурных и т. п. задач [1–8]. Тем не менее последние 15–20 лет в палеонтологическую практику стали внедряться химические и изотопные исследования, существенно повлиявшие на развитие представлений

## Pre-Holocene Taymyr mammoth Petya: mineralogical-isotope-geochemical properties of bones, soft tissues, skin, hairs and paleoecologic reconstructions

V. I. Silaev\*, A. S. Shuyskiy\*, I. V. Smoleva\*,  
S. N. Shanina\*, E. A. Vasiliev\*\*,  
D. V. Kiseleva\*\*\*, A. F. Khazov\*, B. A. Makeev\*,  
A. E. Sukharev\*, A. K. Fokina\*\*\*

\* Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar

\*\* Saint-Petersburg Mining University,  
Saint-Petersburg

\*\*\* Institute of Geology and Geochemistry named  
after academician A. N. Zavaritskiy of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Ekaterinburg  
silaev@geo.komisc.ru

### Abstract

The paper highlights the results of complex mineralogical, spectroscopic, chromatographic, isotope-geochemical studies of the remains of the Taimyr mammoth, including bones, bone collagen, hairs, skin and soft – muscle and fatty – tissues, obtained for the first time. The authors have drawn conclusions about the animal's biological age, paleoclimatic conditions of existence, diet, as well as about the forms and degree of fossilization of its fossil remains.

### Keywords:

Taymyr mammoth Petya, bones, bone collagen, soft tissues, skin, hairs, mineralogical, spectroscopic, chromatographic, isotope-geochemical properties, paleoecologic reconstructions

о доисторической биосфере [9–18]. А уже в текущем десятилетии появились и примеры экспериментальных исследований костного детрита мамонтов с комплексным применением весьма информативных минералого-изотопно-геохимических методов [19–26]. Однако при всем этом в современной практике изучения остатков мамонтов остается большой пробел из-за отсутствия полноценных исследований мягких тканей, часто присутствующих на скелетах, не говоря уже о значительном фонде мало

реализованных в научном смысле находок мумифицированных туш [10, 18, 27–32]. Существование до настоящего времени такого пробела представляется весьма удивительным, поскольку еще в самом начале XX в. именно российским зоологом Е. В. Пфиценмайером (рис. 1) было сделано первое в мировой истории научное описание мягких тканей мамонта [33], усиленное впоследствии результатами гистологических и микрохимических анализов [34].

В 2019 г. на р. Гусиной (Западный Таймыр) начальником геологической партии ВСЕГЕИ Петром Андреевичем Громовым был найден сохранившийся на 80 % (без бивней, с расколотым черепом и без зубов) скелет мамонта с фрагментами мягких тканей и волос на участке ребер (рис. 2). Скелет располагался у современного уреза воды, залегая на субстрате терригенных отложений казанцевской морской трансгрессии [35] среди более молодых аллювиальных осадков. Морские отложения в этом районе датируются 120–68 тыс. лет, что соответствует межледниковью МИС 5, предшествующему Зырянскому (Ермаковскому) оледенению. Калиброванный радиоуглеродный возраст



Рисунок 1. Березовский мамонт, обнаруженный на притоке р. Колымы. Май 1901 г. 1 – Отто Герц, энтомолог Зоологического музея в г. Санкт-Петербурге, руководитель экспедиции; 2 – Евгений Васильевич Пфиценмайер, палеозоолог.

Figure 1. The Berezovka mammoth discovered on a tributary of the Kolyma River. May 1901. 1 – Otto Herz, entomologist of the Zoological Museum in Saint-Petersburg, leader of the expedition; 2 – Evgeniy Vasilievich Pfitsenmayer, paleozoologist.

костных остатков составил  $12\ 870 \pm 110$  лет<sup>1</sup>. Имя Петьа мамонту дали в честь первооткрывателя его останков.

## Объекты и методы

Непосредственным объектом минералого-геохимических исследований послужили переданные нам геологом одной из партий ВСЕГЕИ Дмитрием Николаевичем Костиным образцы: 1) вмещающих и перекрывающих скелет мамонта Пети осадков (грунта); 2) костей, волос, кожи (ороговевшей ткани) и мягких тканей, определенных нами как мышечные и жировые. В ходе исследований применялся комплекс современных аналитических методов, хорошо зарекомендовавший себя в приложении ко многим палеонтологическим и археологическим объектам. В комплекс вошли: оптическая микроскопия (компьютеризированный комплекс OLYMPUS BX51); аналитическая сканирующая электронная микроскопия (JSM-6400 Jeol; TESCAN VEGA3 LMN); термический анализ (DTG-60A/60 AH, Shimadzu); рентгеновская дифрактометрия (XRD-6000, Shimadzu); рентгенофлуоресцентный анализ (XRD-1800, Shimadzu); определение нанопористости по кинетике адсорбции/десорбции азота (Nova 1200e, Quantachrome Instruments); анализ содержания микроэлементов методом ИСП-МС (NexION 300S Perkin Elmer); хромато-масс-спектрометрическое определение аминокислотного состава в органических веществах (GC-17A); инфракрасная спектроскопия биоапатита (ФТ-2 Инфралюм) и органических веществ (VERTEX-70 с микроскопом HYPERION 1000); масс-спектрометрический анализ изотопного состава серы, С, О в биоапатите и С, N в костном коллагене (Delta V. Advantage с аналитическим процессором Gas-Bench II (сера) и Thermo Fisher Scientific).

ИСП-МС анализы на микроэлементы выполнены в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН в рамках госбюджетной темы № 123011800012-9. Спектры ИКС для органических веществ были получены в Санкт-Петербургском горном университете. Все остальные аналитические работы осуществлены в ЦКП

<sup>1</sup> Чуть древнее голоценового мамонта Таймырского (11 500 лет), найденного в 1948 г.

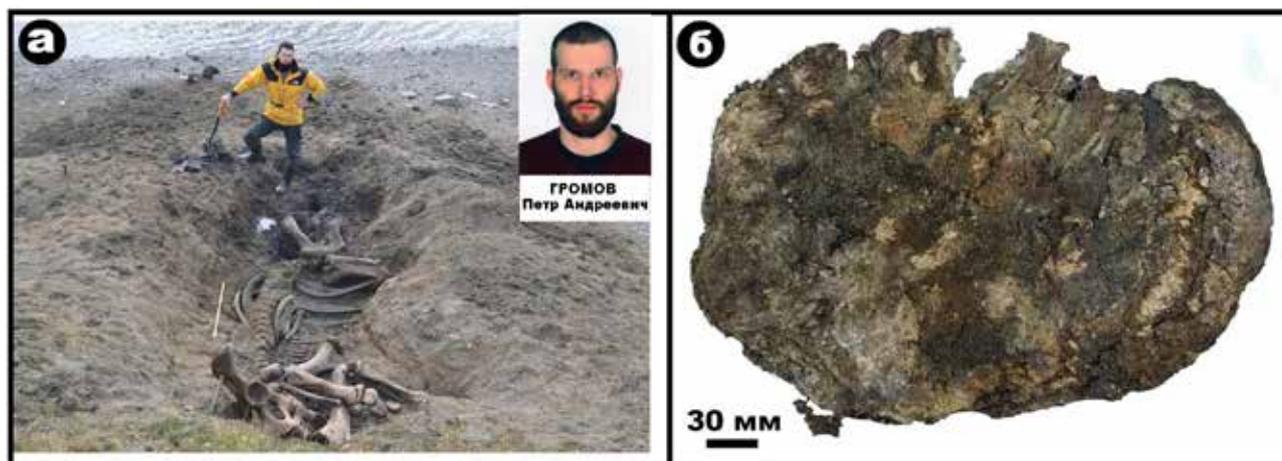


Рисунок 2. Скелет (а) и типичный фрагмент мягких тканей (б) мамонта Пети. У канавы стоит Д. Н. Костин.  
Figure 2. Skeleton (a) and a soft tissue fragment (б) of the mammoth Petya. D. N. Kostin stands by the ditch.

«Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН в рамках госбюджетной темы № 1021062211108-5-1.5.2 «Фундаментальные проблемы минералогии и минералобразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий».

Для сравнения использовались данные, полученные ранее в процессе исследований костных остатков мамонта Шнейдера<sup>2</sup>.

### Грунт, смытый с костно-тканевых остатков

Сохранившийся на скелетизированных остатках мамонта грунт характеризуется галечно-песчаным гранулометрическим составом (содержание фракций в вес. %): гравийно-галечный материал (+2 мм) – 23.9; песок грубозернистый (-2+1 мм) – 11.81; песок крупнозернистый (-1+0.5 мм) – 2.75; песок среднезернистый (-0.5+0.25 мм) – 30.65; песок мелкозернистый (-0.25+0.1 мм) – 22.81; песок тонкозернистый и алеврит (-0.1 мм) – 8.71 (рис. 3). Судя по гранулометрии, налипший на костные остатки грунт вполне соответствует речным осадкам.

По химическому и нормативно-минеральному составу (табл. 1) рассматриваемый грунт тоже отвечает месту нахождения скелета, варьируясь между современными речными осадками и тиллами (рис. 4).

### Костно-волосо-коже-тканевые остатки мамонта

В качестве непосредственных объектов исследований выступали фрагменты костного скелета (ребра и позвонки) и сохранившиеся на скелете волосы, кожа и мягкие ткани, подразделенные по внешнему виду на мышечную и жировую.

Исследованные *кости* сравнительно прочные, имеют светло-бурую окраску (рис. 5). Под микроскопом (рис. 6) они обнаруживают хорошую сохранность первичного микростроения, большей частью губчатый тип костной ткани с типичной для ребер и позвонков трабекулярной структурой. На участках с более плотным типом ткани появляются остеон-структуры с гаверсовской системой каналов. Диаметр остеонов достигает 200 мкм. В режиме скрещенных николей наблюдается характерная для костей такого рода волокнистость, костный апатит имеет характерные для него интерференционные окраски, не обнаруживая признаков коллофанизации. В полостях костной ткани наблюдаются включения терригенных минералов, среди которых преобладает кварц.

Судя по валовому химическому составу (табл. 2), содержание иллювирированной в кости исследуемого мамонта минеральной примеси колеблется в пределах 5–20 %.

<sup>2</sup> Находка Г. В. Шнейдера на р. Траутфеттер (Центральный Таймыр): крупный фрагмент конечности и обломки бивня. Радиоуглеродный возраст остатков – 13 490±240 лет назад.



Рисунок 3. Гранулометрический состав аллювиальных осадков, вмещающих и перекрывающих скелет мамонта: 1–6 – гранулометрические фракции: 1 – гравийно-галечная; 2 – грубозернистого песка; 3 – крупнозернистого песка; 4 – среднезернистого песка; 5 – мелкозернистого песка; 6 – тонкозернистого песка и алеврита.

Figure 3. Granulometric composition (texture) of alluvial sediments surrounding and overlying the mammoth's skeleton: 1–6 – granulometric (texture) fractions: 1 – gravel-pebble; 2 – coarse sand; 3 – coarse sand; 4 – medium-grained sand; 5 – fine-grained sand; 6 – fine-grained sand and silt.



Рисунок 4. Нормативно-минеральный состав грунта, смытого с костей мамонта Пети (синие квадраты), и иллювирированной в кости терригенной примеси (синие кружки). Красные точки – состав терригенной примеси в костных остатках мамонта Шнейдера (МШБ – бивень, МШН – нога); черные звезды – нормативно-минеральный состав терригенной примеси в костных остатках мамонтовой фауны на территории Печорского Приуралья; черные квадраты – средний состав литотипов.

Figure 4. Standard-mineral composition of the soil ground washed from the bones of the mammoth Petya (blue squares) and terrigenous admixture illuviated into its bones (blue circles). Red dots – composition of the terrigenous admixture in the bone remains of the Schneider mammoth (МШБ – tusk, МШН – leg); black stars – standard-mineral composition of the terrigenous admixture in the bone remains of the mammoth fauna in the Pechora Cis-Urals; black squares – average composition of lithotypes.

При этом она по нормативно-минеральному составу существенно отличается от выше охарактеризованных грунтов. В костях содержится значительно больше филлосиликатов, особенно хлоритов (рис. 4). На основании последнего можно сделать вывод о том, что место нахождения скелета мамонта Пети не является местом первичного его захоронения, для которого был свойственен гораздо более глинистый состав грунтов. Предполагаемое место первичного захоронения туши мамонта располагалось, вероятно, гипсометрически выше, например на надпойменной террасе. Следует отметить, что подобную ситуацию уже предполагали в отношении первой находки скелета мамонта на Таймыре – на левом притоке р. Шренк [27].

Важной микроструктурной характеристикой костей как органоминерального композита является их ультрапористость в нанометровом диапазоне. Проведенные исследования показали, что кости мамонта по состоянию

Таблица 1  
Химический (мас. %) и нормативно-минеральный (мол. %) составы грунта, смытого с костей мамонта

Table 1  
Chemical (wt. %) and standard-mineral (mol. %) compositions of ground washed from the mammoth's bones

Компоненты и нормативные минералы	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO <sub>2</sub>	67.73	71.54	76.04	73.36	68.56	64.67	65.5	66.11
TiO <sub>2</sub>	0.61	0.42	0.31	0.31	0.35	0.5	0.42	н. о.
ZrO <sub>2</sub>	0.06	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
RbO <sub>2</sub>	н. о.	0.01	н. о.					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.19	13.51	12.08	13.84	15.85	17.9	17.58	19.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.71	3.31	2.9	3.01	3.74	5.17	5.52	0.23
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	н. о.
CuO	0.06	0.02	0.01	н. о.				
ZnO	0.01	н. о.	н. о.	«	«	0.01	0.01	«
MnO	0.09	0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.07	«
MgO	2.71	2.38	1.95	2.01	2.45	3.82	3.94	0.15
CaO	3.61	2.67	2.08	2.56	2.84	2.02	1.67	5.11
SrO	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03
Na <sub>2</sub> O	1.93	1.65	1.5	1.8	1.98	1.87	2.55	4.92
K <sub>2</sub> O	2.51	2.36	2.10	2.27	2.69	3.01	1.88	2.85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.4	0.32	0.19	0.17	0.17	0.24	0.24	0.6
SO <sub>3</sub>	1.32	1.43	0.69	0.53	1.2	0.62	0.54	0.04
Кварц	30.69	39.04	48.25	45.77	45.29	20.53	32.34	10.02
Альбит	32.92	26.46	23.2	23.78	18.78	25.75	31.01	64.7
Слюда	20.94	21.55	17.92	19.73	22.66	25.44	16.33	23.28
Хлориты	12.8	10.38	9.26	9.55	11.39	17.74	19.15	0.71
Рутил	0.43	0.3	0.22	0.22	0.25	0.36	0.31	н. о.
Апатит	0.83	0.68	0.41	0.37	0.36	0.52	0.53	1.25
Пирит	1.39	1.52	0.74	0.58	1.27	0.66	0.33	0.04

Примечание. Здесь и в табл. 2: результаты РФА, приведенные к 100 %; н. о. – не обнаружено. Гранулометрические фракции: 1– тонкозернистого песка и алеврита; 2–5 – песков, соответственно мелкозернистого, среднезернистого, крупнозернистого и грубозернистого; 6 – гравия и гальки; 7, 8 – образцы галек, соответственно темных и светлых по окраске.

Note. Here and in Table 2: XRF results reduced to 100 %; н. о. – not determined. Granulometric fractions: 1 - very fine-grained sand and siltstone; 2-5 - fine-grained, medium-grained, coarse-grained and very coarse-grained sands, respectively; 6 - gravel and pebbles; 7, 8 - dark- and light-colored samples of pebbles, respectively.

нанопористости хорошо согласуются со слабоизмененными костями плейстоценовой мамонтовой фауны, отличаться лишь меньшим условным числом пор (рис. 7), соответствующим показателям современных костей. Последнее может свидетельствовать о незначительной в целом степени деградации наноструктуры костных остатков исследованного мамонта.

*Остевые волосы* исследуемого мамонта характеризуются относительно хорошей сохранностью и темным цветом (рис. 8). Последнее в рамках сезонных колебаний соответствует, скорее всего, их летней генерации<sup>3</sup>. По толщине исследованные волосы отчетливо подразделяются на относительно тонкие (150–250 мкм) и толстые (350–500 мкм). Поверхность волосин микроскульптирована, что может иметь как прижизненное, так и посмертное происхождение.

<sup>3</sup> По данным генетиков, ответственность за цвет волос у мамонтов несут доминирующий ген NC1R и рецессивный ген ME1R, обеспечивающие соответственно темную (обычно летнюю) и светлую (обычно зимнюю) окраски.



Рисунок 5. Внешний вид исследованных костных фрагментов скелета.

Figure 5. Appearance of the studied bone fragments of the skeleton.

Кожа представляет собой поверхностный, ороговевший и наиболее темный слой, залегающий на мягких тканях. Последние нами подразделены на *мышечную* – буроватую и более мягкую, чем кожа, и *жировую* – светло-серую до белой и очень мягкую, как сливочное масло (рис. 9). Кроме того, в качестве еще одного варианта органического вещества нами из костей исследуемого мамонта был выделен *коллаген*. Выход последнего при деминерализации костей составил 13–21 %. Коллаген характеризуется хорошо сохранившейся фибриллярной текстурой и буроватым цветом (рис. 10, а), что вообще характерно для неоплейстоценовых ископаемых костей. Следует, впрочем, отметить, что коллаген, выделенный из костных остатков примерно одновозрастного мамонта Шнейдера, отличается гораздо более светлой окраской (рис. 10, б). Возможно, это объясняется большей плотностью костей последнего – бивня и конечностей.

Молекулярный состав органического вещества в остатках мамонта Пети определялся особой модификацией ИК-спектроскопического метода, диагностика пептидных связей проводилась по [36, 37]. Согласно полученным данным (рис. 11–13), линии ИК-поглощения в исследуемых органических объектах могут быть подразделены в направлении от длинноволновой (600 см<sup>-1</sup>) области к коротковолновой (4000 см<sup>-1</sup>) на следующие восемь групп: 1) 3500–2900 см<sup>-1</sup> – валентные колебания групп –NH (амиды А); 2) 2350–2186 см<sup>-1</sup> – валентные колебания групп –NH в костном коллагене (амиды А); 3) 1690–1640 см<sup>-1</sup> – валентные колебания групп –CO (амиды-I); 4) 1600–1540 см<sup>-1</sup> – деформационные колебания NH-групп и валентные колебания CN-групп (амиды-II); 5) 1500–1450 см<sup>-1</sup> – валентные колебания групп CCN и деформационные колебания метильных групп CH<sub>3</sub>; 6) 1400–1230 см<sup>-1</sup> – деформационные колебания групп NH<sub>2</sub> (амиды-III); 7) 1200–930 см<sup>-1</sup> – валентные колебания групп CNOH; 8) 900–600 см<sup>-1</sup> – внеплоскостные вверные колебания групп NH. Сравнение орга-



Рисунок 6. Микроструктура костей мамонта под оптическим микроскопом в режимах параллельных и скрещенных николей. Стрелками показано заполнение микрополостей минеральными зернами.  
Figure 6. Microstructure of the mammoth's bones revealed with an optical microscope in parallel and crossed nicols. The arrows indicate the filling of microcavities with mineral grains.

нических веществ в исследованных образцах по ИК-спектрам приводит к следующему заключению.

Костный *коллаген* характеризуется наиболее простым спектром ИК-поглощения, образованным двумя полосами близкой интенсивности, в которые объединились соответственно линии первой и второй групп (амиды А). *Волосы* отличаются более сложными ИК-спектрами, в которых интенсивности линий в группах уменьшаются в последовательности:  $1=4 > 3 > 6 > 8$ , т. е. в направлении от линий поглощения на пептидных связях в амидах А и амидах-II к линиям в амидах-I и далее в амидах-III. *Кожа* характеризуется еще более сложными ИК-спектрами, в которых наблюдаются линии шести групп и интенсивности снижаются в последовательности:  $1 > 3 > 4 > 6 > 8 > 7$ , т. е. в направлении от линий амидов А к линиям амидов-I, амидов-II, амидов-III и далее к линиям поглощения на химических связях NH и C=O. В ИК-спектрах *мышечной* ткани реализуются линии всех групп, причем с интенсивностями, снижающимися в идеальной последовательности:  $1 > 3 > 4 > 5 > 6 > 7 > 8$ , т. е. в направлении от амидов А к амидам-I, амидам-II, химическим связям в C=O и C-N, амидам-III, химическим связям в C=O и NH. При этом наблюдается расщепление первой группы линий на две подгруппы с волновыми числами 3340-3345 и 2850-2925  $\text{cm}^{-1}$ . *Жировые* ткани обнаруживают несколько менее сложные, хотя и довольно упорядоченные по интенсивностям линий, спектры

Таблица 2  
Химический (мас. %) и нормативно-минеральный (мол. %) составы костей мамонта Пети

Table 2  
Chemical (wt. %) and standard-mineral (mol. %) compositions of the mammoth Petya's bones

Компоненты	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	5.86	4.34	5.71	1.47	1.26	5.08
TiO <sub>2</sub>	0.08	н. о.	0.1	н. о.	н. о.	0.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.89	2.0	2.79	0.69	0.61	2.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.43	4.8	4.85	4.26	3.64	5.5
ZnO	0.05	0.05	0.05	0.03	0.04	0.05
MnO	0.75	0.34	0.91	0.4	0.3	0.51
MgO	1.5	1.22	1.3	0.85	0.83	1.12
CaO	49.1	50.0	50.0	53.09	54.02	49.31
SrO	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06
Na <sub>2</sub> O	0.61	1.21	0.66	0.57	0.57	0.68

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7
K <sub>2</sub> O	0.27	0.25	0.27	0.11	0.11	0.29
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	32.99	35.3	32.86	38.08	38.17	34.38
SO <sub>3</sub>	0.39	0.42	0.43	0.39	0.39	0.5
Кварц	21.31	0.95	н. о.	н. о.	н. о.	17.76
Альбит	33.21	н. о.	31.91	61.0	«	н. о.
Слюда	9.61	16.85	11.95	10.68	16.21	20.33
Хлориты	35.54	82.2	55.77	28.32	83.79	61.2
Рутил	0.53	н. о.	0.37	н. о.	н. о.	0.71
Апатит	80.82	87.42	85.84	93.98	94.06	82.11
Ca/P <sub>ар</sub> в биоапатите	1.89	1.8	1.93	1.77	1.79	1.82

Примечание. 1-6 – гранулометрические фракции: тонкозернистых песков и алевритов (1); песков мелкозернистых (2), среднезернистых (3), крупнозернистых (4) и грубозернистых (5); гравия и галек (6).

Note. 1-6 - granulometric fractions: very fine-grained sands and siltstones (1); fine-grained (2), medium-grained (3), coarse-grained (4) and very coarse-grained (5) sands; gravel and pebbles (6).

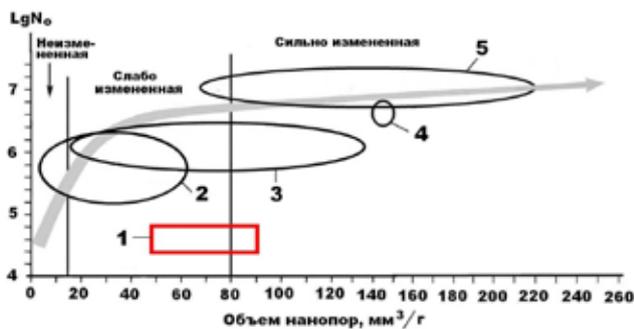


Рисунок 7. Нанопористость костей мамонта Пети (1) на фоне аналогичных данных, полученных нами для мамонтовой фауны (шерстистый мамонт, шерстистый носорог, северные олени, древние лошади) с Печорского Приуралья (2) и Омского Прииртышья (3), для плейстоценовых лошадей со стоянки Заозерье в Пермской области (4) и плейстоценовых млекопитающих со стоянки Ушбулак в Восточном Казахстане (5). Заливкой показан генеральный тренд деградации нанопористости ископаемых костей в ходе их фоссилизации.

Figure 7. Nanoporosity of the bones of the mammoth Petya (1) against the similar data we obtained for the mammoth fauna (woolly mammoth, woolly rhinoceros, reindeer, ancient horses) of the Pechora Cis-Urals (2) and the Omsk Irtysh Land (3), for the Pleistocene horses from the Zaozerye site in the Perm Region (4) and the Pleistocene mammals from the Ushbulak site in Eastern Kazakhstan (5). The arrow shows the general trend of nanoporosity degradation of fossil bones during fossilization.



Рисунок 8. Внешний вид исследованных остевых волос мамонта.  
Figure 8. Appearance of the examined mammoth's guard hairs.

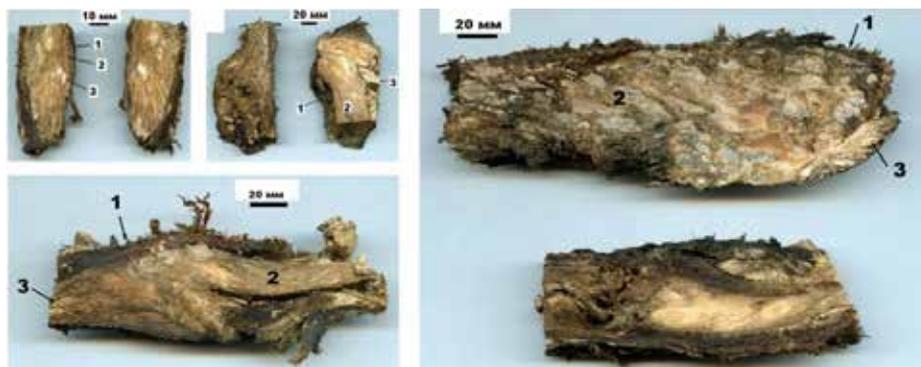


Рисунок 9. Внешний вид кожи (1) и мягких тканей – мышечной (2) и жировой (3), сохранившихся на скелете.  
Figure 9. Appearance of skin (1) and soft tissues – muscle (2) and fatty (3), preserved on the skeleton.

ИК-поглощения:  $1=4 > 5 > 8 > 7$  – со снижением интенсивностей в направлении от амидов А к амидам-II, химическим связям в  $CCN$  и  $CH_2$ , химическим связям в  $NH$  и  $CNOH$ . Таким образом, отчетливо выявляется нетождественность молекулярного состава исследованных вариантов органических материалов исследуемого мамонта, что свидетельствует о сравнительно хорошей сохранности не только его костей, но органических тканей.

Степень измененности *коллагена* в ископаемых костях определяется термическим методом [38, 39]. На полученных нами кривых нагревания в диапазоне 20–600 °С зарегистрированы все три характерных для таких костей термических эффекта (рис. 14): 1) эндотермический с экстремумом при 70–85 °С, обусловленный низкотемпературной дегидратацией (удалением абсорбированной воды) кости; 2) экзотермический В1 с экстремумом при 310–335 °С, отражающий выгорание липидо-белкового органического вещества; 3) экзотермический В2 с экстремумом при 400–440 °С, иногда расщепляющийся на два подпика, – выгорание более устойчивого к нагреванию преимущественно белкового вещества. Как известно, на кривых нагревания костей современных млекопитающих по интенсивности сильно преобладает высокотемпературный пик В2. В рассматриваемом же случае доминирующим пиком является В1, что отражается колебанием отношения интенсивностей В1/В2 в диапазоне от 2.5 до 7.5. Полученные данные говорят о преобладании в коллагене костей мамонта Пети относительно низкомолекулярного, существенно липидного органического вещества, что можно объяснить как результатом фоссилизации, так и исходной особенностью костного коллагена мамонтов.

#### Микроэлементы

В составе костных, волосяных и тканевых остатков исследованного мамонта обнаружено более 50 микроэлементов (табл. 3), в том числе 12 *элементов-эссенциалов* (жизненно-необходимых), имеющих биологическое происхождение, – Li, Be, As, Se, Rb, Mo, Ag, Cd, Pb, Bi, Th, Zn; 17 *физиогенно-активных*, которые могут иметь как биологическое, так и эпигенетическое происхождение, – Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Ga, Sr, Y, Zr, Sn, Sb, Cs, Ba, Hf, U; 22 *элемента-абионта*, обусловленных фоссилизацией, – B, Sc, Ge, Nb, Te, Ln (14), Ta, W, Tl. По суммарному содержанию микроэлементов исследованные объекты резко разделились на две группы: 1) кости и мышечная ткань с аномально высоким валовым

содержанием микроэлементов в пределах 5600–6600 г/т; 2) волосы, кожа и жировая ткань с валовым содержанием микроэлементов от 305 до 485 г/т.

Отношение групповых содержаний микроэлементов биогенного и абиогенного происхождения (Э/АБ) во всех проанализированных объектах превышает 1 (преобладание элементов-эссенциалов), снижаясь в последовательности волосы > кости > кожа > жировая ткань > мышечная

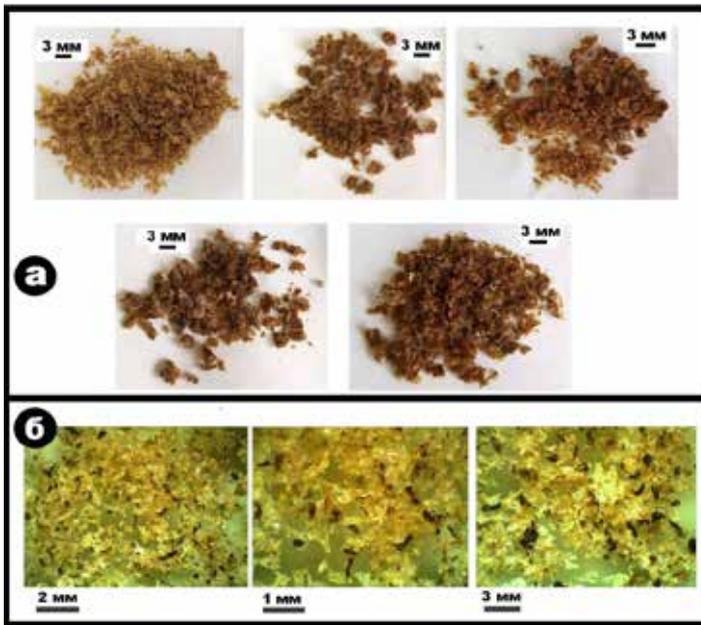


Рисунок 10. Внешний вид костного коллагена мамонта Пети (а) и мамонта Шнейдера (б).  
Figure 10. Appearance of bone collagen of the mammoth Petya (a) and the Schneider mammoth (б).

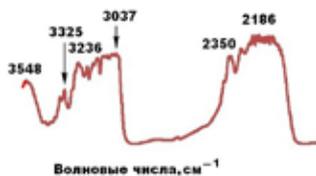


Рисунок 11. Типичный спектр ИК-поглощения на пептидных связях в коллагене, выделенном из кости мамонта Пети.  
Figure 11. Typical IR absorption spectrum of peptide bonds in collagen isolated from bone of the mammoth Petya.

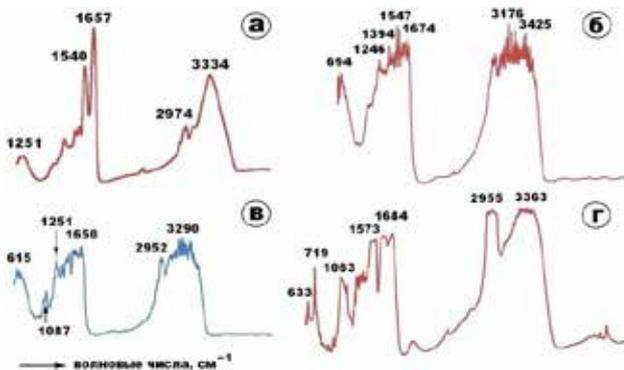


Рисунок 12. Спектры ИК-поглощения на пептидных связях в волосах (а, б) и коже (в, г) мамонта Пети.  
Figure 12. IR absorption spectra of peptide bonds in hairs (a, б) and skin (в, г) of the mammoth Petya.

ткань. Отношение содержания важнейшего эссенциального микроэлемента **цинка** к физиогенно-активной **меди**, повышенная концентрация которой обычно отражает или факт прижизненного микрохимического отравления, или интенсивность фоссилизации, тоже варьируется, сокращаясь в последовательности кости > волосы > жировая ткань > мышечная ткань > кожа. Значения указанных выше отношений (табл. 3) свидетельствуют об относительно низкой степени фоссилизационного изменения костей и тканей мамонта Пети, но при этом нетождественной. Судя

по отношениям Э/АБ, кости и волосы сохранились несколько лучше, чем кожа и мягкие ткани.

Важно отметить, что на фоне остатков мамонта Пети кости близкого по геологическому возрасту мамонта Шнейдера оказались гораздо менее обогащенными микроэлементами: *кость ноги* – сумма микроэлементов 615.15 г/т, Э/АБ=150.04, Zn/Cu=131.6; *бивень* – сумма микроэлементов 851.501 г/т, Э/АБ=70.79, Zn/Cu=6.26.

Особенности относительного обогащения костно-тканевых остатков мамонта Пети микроэлементами иллюстрируются на генеральной диаграмме (рис. 15). Из диаграммы следует, что по этому свойству упомянутые остатки подразделяются на две контрастные группы: 1) волосы, кожа, жировая ткань, относительно бедные микроэлементами; 2) кости и мышечная ткань, аномально обогащенные микроэлементами. При этом первая группа остатков сопоставима с костными остатками мамонта Шнейдера, а вторая значительно преобладает по сумме микроэлементов даже над костными остатками ранне-среднеплейстоценовой мамонтовой фауны

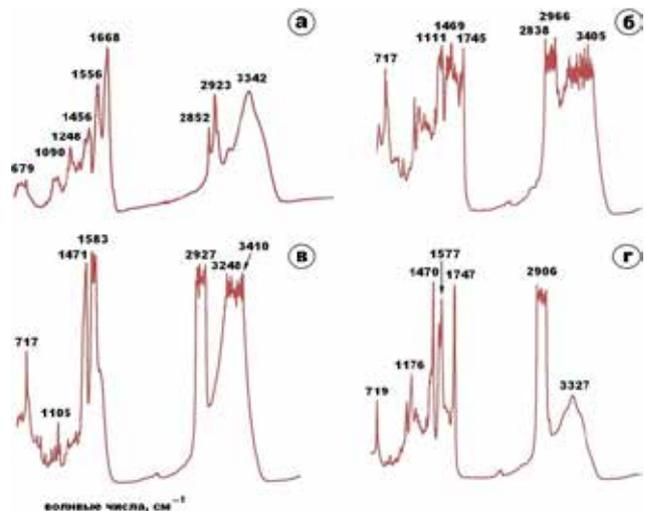


Рисунок 13. Спектры ИК-поглощения на пептидных связях в мышечной (а, б) и жировой (в, г) тканях мамонта Пети.  
Figure 13. IR absorption spectra of peptide bonds in muscle (a, б) and fatty (в, г) tissues of the mammoth Petya.

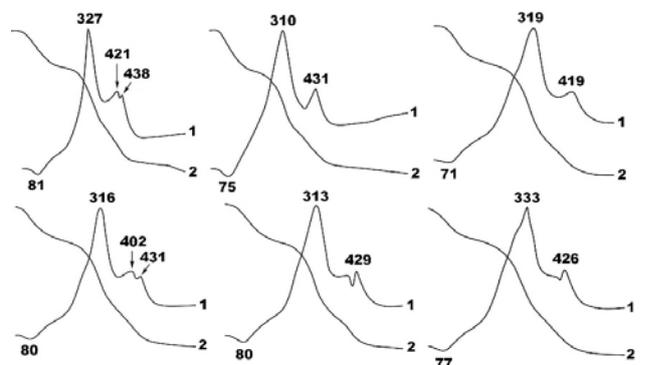


Рисунок 14. Результаты термического анализа костей мамонта Пети, кривые: 1 – нагревания, 2 – потери веса.  
Figure 14. Thermal analysis results of bones of the mammoth Petya, curves: 1 – heating, 2 – weight loss.

## Trace elements in the remains of the mammoth Petya and the important biogeochemical parameters

Микроэлементы	Содержания (г/т) и соотношения в объектах исследований				
	Кости	Мышечная ткань	Жировая ткань	Кожа	Волосы
Эссенциальные, Э (12)	227.423±20.659	171.472±104.058	5.731±1.897	15.848±9.015	92.328±86.001
Физиогенно-активные, ФА (17)	5359.29±1399.121	6343.496±745.074	473.63±235.447	329.449±162.291	199.743±140.499
Абиотические, АБ (22)	34.906±12.977	144.973±90.616	4.223±1.236	7.287±6.179	12.937±9.965
Среднее валовое содержание	5621.619	5740.871	483.584	352.584	319.615
Э/АБ	6.52	1.18	1.36	2.17	7.14
Zn/Cu	5.16	1.05	1.38	0.53	1.59

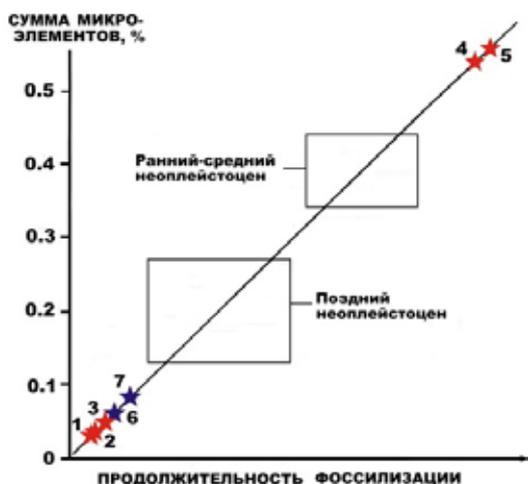


Рисунок 15. Суммарное содержание микроэлементов в костно-тканевых остатках таймырских мамонтов – Пети (1–5) и Шнейдера (6, 7). 1– волосы, 2 – кожа, 3 – жировая ткань, 4 – кости, 5 – мышечная ткань, 6 – кость ноги, 7 – бивень. Рамками показаны данные, полученные по костным остаткам плейстоценовой мамонтовой фауны Прииртышского региона (коллекция А. А. Бондарева).

Figure 15. Total content of microelements in bone and tissue remains of the Taymyr mammoths – Petya (1–5) and the Schneider mammoth (6, 7). 1 – hairs, 2 – skin, 3 – fatty tissue, 4 – bones, 5 – muscle tissue, 6 – leg bone, 7 – tusk. The frames show the data obtained on bone remains of the Pleistocene mammoth fauna of the Irtysh Region (collection of A. A. Bondareva).

из местонахождений в Западной Сибири. Выявленный парадокс объясняется тем, что аномальное обогащение микроэлементами костей и мышечной ткани мамонта Пети обеспечено только двумя элементами – марганцем (3500–4000 г/т) и стронцием (750–1350 г/т). По сумме остальных микроэлементов кости и мышечная ткань вполне сопоставимы с остатками предголоценовых животных. Таким образом, отклонение костей и мышечной ткани мамонта Пети по валовой концентрации микроэлементов объясняется в основном аномальным их обогащением марганцем и стронцием, что может иметь локальную причину.

#### Костный биоапатит

На рентгеновских дифрактограммах исследованных костных образцов зарегистрирована серия уширенных пиков (рис. 16), характерных для биоапатита (Å, в скобках индексы соответствующих плоскостей): 3.46–3.44 [002]; 2.82–2.79 [121]; 2.74–2.72 [300]; 2.64–2.63 [202]; 1.953–1.941 [222]; 1.850–1.838 [123]; 1.726–1.723 [004]. Отражение 2.27–2.26 может отвечать фазовой примеси кальцита. Рассчи-

танные для биоапатита параметры элементарной ячейки оказались вполне сопоставимыми с параметрами карбонатапатита В-типа (нм):  $a_0 = 0.9315 - 0.9373$ ;  $c_0 = 0.6916 - 0.6913$ . Кристалличность этого биоминерала в нашем случае находится на достаточно низком уровне, что обусловлено относительно молодым геологическим возрастом костей. Вхождение углерода в его структуру доказывается спектрами ИК-поглощения, в которых проявились полосы анионов  $[PO_4]^{3-}$ , замещающих их анионов  $[CO_3]^{2-}$  и анионов  $[SO_3]^{2-}$ , замещающих группы (ОН)<sup>-</sup> (рис. 17). То есть биоапатит в костях исследуемого мамонта может быть отнесен не только к В-, но и АВ-типу. Судя по значению апатитового модуля –  $Ca/P_{ат} = 1.83 \pm 0.06$ , этот биоапатит может быть отнесен к незначительно и умеренно измененному в условиях фоссилизации.

#### Элементный и аминокислотный составы органических остатков

Полученные данные об элементном составе костного коллагена, кожи, волос и жировой ткани (табл. 4) более или менее соответствуют стандартным данным для современных млекопитающих. В случае мышечной ткани наши данные в три раза уступают стандартным, что, возможно, объясняется смешанным белково-жировым составом мышечной ткани исследуемого мамонта. Исходя из полученных результатов, значения атомных отношений C/N в изучаемых органических веществах составляют в среднем для коллагена – 3.21, волос – 3.65, кожи – 3.56, что тоже лежит вблизи стандартных величин. Для мышечной ткани это отношение в среднем составило 18.22, что указывает на значительную примесь в этой ткани жиров. В целом полученные данные свидетельствуют о весьма умеренной степени измененности органических компонентов в останках мамонта Пети.

Особый интерес представляют выявленные в органических веществах примеси неорганических элементов: Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, P, S, Cl. Как известно, эти элементы всегда присутствуют в тканях млекопитающих, входя в состав металлоорганических соединений. Но при патологических изменениях происходит распад металло-содержащих белково-липидных составляющих, в результате чего концентрация металлов в органических тканях возрастает [40–43]. Анализ показал, что суммарное содержание металлов в коже и мягких тканях мамонта Пети не превышает 1 мас. %, в костном коллагене состав-

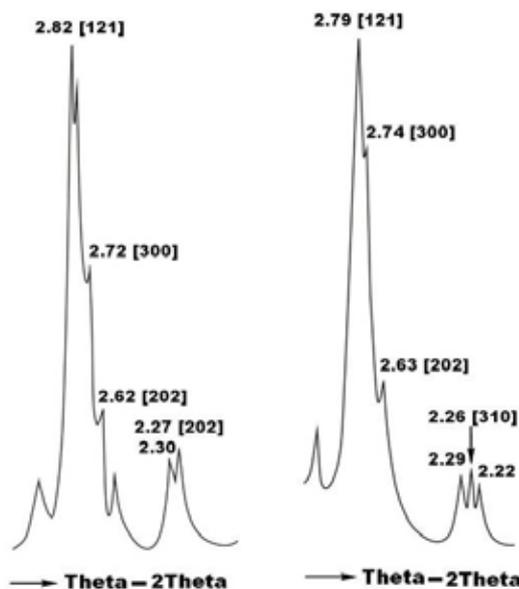


Рисунок 16. Типичные рентгеновские дифрактограммы, полученные от биоапатита в костных остатках мамонта Петя.  
Figure 16. Typical X-ray diffraction patterns obtained from bioapatite in bone remains of the mammoth Petya.

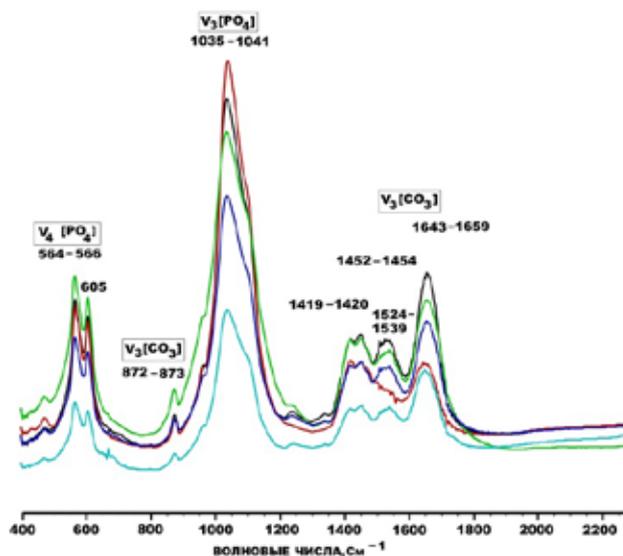


Рисунок 17. Спектры ИК-поглощения в биоапатите костных остатков мамонта Петя.  
Figure 17. IR absorption spectra in bioapatite in bone remains of the mammoth Petya.

ляет в среднем 2.75 мас. % и только в волосах достигает 9.5 мас. %. Отсюда следует, что мамонт Петя не имел существенных внутренних патологий и в этом смысле погиб вполне здоровым животным.

В составе костного коллагена, кожи, жировой ткани и волос обнаружены 14 аминокислот (АК; табл. 5), представляющих обе серии (незаменимые и заменимые) и шесть групп – алифатические (А), ароматические (АР), основные (О), кислые (К), гидроксильные (Г), имино (И). В исследованных образцах отсутствует серусодержащая аминокислота – метионин, что, возможно, связано с ее неустойчивостью при фоссилизации органических веществ [44].

Общее содержание АК колеблется в пределах 55–750 мг/г, снижаясь в последовательности костный коллаген > кожа > волосы > мышечная ткань > жировая ткань.

Полученные данные показали, что большинство выявленных аминокислот присутствует в виде L-форм, D-формы установлены только для аланина (в костном коллагене, коже и волосах) и аспарагиновой кислоты (в волосах). Как известно, появление D-форм аминокислот обусловлено рацемизацией – самопроизвольным неферментативным превращением первичной L-формы в D-форму. Такое превращение при жизни происходит очень медленно, но ускоряется после смерти животного и поэтому может служить важным критерием как биологического возраста, так и степени фоссилизации ископаемого биоорганического вещества в геологических объектах [45–47]. В рассматриваемом случае величина весовой пропорции D/L в упомянутых выше аминокислотах колеблется в пределах 0.01–0.04, что характеризует мамонта Петю как молодое животное, а его костно-органические остатки как хорошо сохранившиеся [48]. Однако следует учитывать и тот факт, что D-формы аланина и аспарагиновой кислоты могут также являться маркерами жизнедеятельности микроорганизмов.

По распределению групп и отдельных аминокислот исследованные органические вещества выглядят следующим образом.

**Коллаген:** глицин (А) > пролин (И) > аланин (А) > глутаминовая кислота (К) > гидроксипролин (И) > лизин (О) > серин (Г) > аспарагиновая кислота (К) > лейцин (А) > фенилаланин (АР) > тиразин (АР) > треонин (Г) > валин (А) > изолейцин (А). Отношение суммарных содержаний незаменимых и заменимых аминокислот (НЗ/З) составляет 0.23.

**Мышцы:** глицин > пролин > аланин > гидроксипролин > глутаминовая кислота > серин > лизин > лейцин > аспарагиновая кислота > фенилаланин > тиразин > валин > треонин > изолейцин. НЗ/З=0.27.

**Жир:** глицин > пролин > аланин > гидроксипролин > глутаминовая кислота > лизин > серин > фенилаланин > аспарагиновая кислота > лейцин > треонин > валин (нет тирозина и изолейцина). НЗ/З=0.23.

**Кожа:** глицин > пролин > аланин > гидроксипролин > глутаминовая кислота > серин > аспарагиновая кислота > лейцин > тиразин > валин > лизин > треонин > фенилаланин > изолейцин. НЗ/З=0.17.

**Волосы:** глутаминовая кислота > серин > лейцин > треонин > пролин > аспарагиновая кислота > валин > аланин > глицин > лизин > изолейцин > фенилаланин > тиразин (нет гидроксипролина). НЗ/З=0.66.

Из приведенных последовательностей следует, что во всех проанализированных нами органических остатках, кроме волос, преобладают алифатические аминокислоты, на втором месте – кислые. В волосах на первое место переходят кислые аминокислоты. По пропорции между незаменимыми и заменимыми аминокислотами большая часть органических веществ в остатках мамонта Петя заметно отличается от средних данных по живому и ископаемому органическому веществу (НЗ/З=0.5–0.56).

Высокие содержания аминокислот в костном органическом веществе, коже и волосах свидетельствуют об их белковой природе и хорошей сохранности [26]. Коллагеновый состав органического матрикса в костях подтвержда-

## Элементный состав органических компонентов мамонта Пети (мас. %)

## Elemental composition of organic components of the mammoth Petya (wt. %)

Статистические данные	C	N	O	Si	Al	Fe	Mg	Ca	Na	K	P	S	Cl
Костный коллаген													
Среднее	42.72	16.64	36.25	1.26	0.56	0.41	0.05	0	0.03	0.03	0.06	0.12	0.23
СКО	9.62	7.22	16.51	1.92	0.88	0.8	1.1		0.07	0.09	0.15	0.14	0.45
Волосы													
Среднее	44.66	15.31	30.52	0.81	0.32	3.11	0.19	0.24	0	0	0.02	4.83	0
СКО	4.66	1.59	2.87	0.72	0.31	4.0	0.12	0.48			0.04	1.62	
Кожа													
Среднее	61.55	21.61	16.04	0.01	0	0.21	0.06	0.22	0	0	0.25	0.09	0
СКО	6.98	4.03	5.22	0.02		0.58	0.11	0.62			0.03	0.23	
Жировая ткань													
Среднее	77.98	0	21.27	0.07	0	0	0.47	0	0	0	0	0.2	0
СКО	2.19		2.06	0.19		0.41	0.22						
Мышечная ткань													
34	75.05	5.35	19.24	0	0	0	0.19	0	0	0	0	0.17	0

ется повышенными содержаниями глицина, аланина, пролина и гидроксипролина. В коже основным сохранившимся белком также является коллаген. Присутствие эластина, еще одного из наиболее распространенных белков кожи, характеризующегося повышенными содержаниями валина и аланина и пониженными – гидроксипролина, не установлено.

АК-состав волос с преобладанием кислых, основных аминокислот и лейцина соответствует кератину – фибриллярному белку, доминирующему в роговых слоях. К сожалению, использованный в нашей работе метод газохроматографического анализа не позволяет идентифицировать такие серусодержащие аминокислоты, как цистин и цистеин, высокие значения которых могли бы указать на присутствие кератина.

В мышечной и жировой тканях содержание аминокислот значительно ниже, а их белковый состав также представлен коллагеном – доминирование глицина, аланина, пролина, гидроксипролина. Относительно низкое содержание аминокислот в собственно мышечной ткани может быть объяснено двумя причинами. Во-первых, тем, что среди белков соединительной ткани (мышц) микрофибриллярные белки (актин, миозин и др.), составляющие в мышцах более 80 %, значительно легче разрушаются, чем белки сарколеммы (коллаген, эластин, липопротейды), содержащиеся в белках в очень низких количествах. Во-вторых, это может быть обусловлено примесью в мышцах мамонтов жирового материала. Жировая ткань теоретически не может содержать аминокислот, поскольку она сложена небелковыми компонентами. Поэтому обнаружение нами в жировых образцах аминокислот может свидетельствовать о примеси мышечного материала. В общем все указывает на белково-жировое смешение в мягких тканях мамонта.

#### Изотопные индикаторы палеоэкологических условий обитания и рациона питания мамонта

Изотопным исследованиям были подвергнуты костный биоапатит ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ) и органическое вещество – костный коллаген, волосы, кожа, мышечная и жировая ткани ( $\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$ ,  $\text{C}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{AIR}}$ ).

В случае биоапатита (рис. 18) изотопный состав углерода и кислорода варьируется в пределах соответственно  $-15\text{...}-13$  и  $15\text{--}21$  ‰, закономерно встраиваясь в отчетливый тренд сопряженного изотопного облегчения углерода и кислорода в костном биоапатите мамонтов в направлении с юго-запада (Западная Европа) на северо-восток (таймырское побережье Северного Ледовитого океана). Обнаруженный факт представляется весьма ценным, поскольку он имеет вполне рациональное объяснение. Как известно [14, 15], изотопный состав углерода и кислорода в карбонатной компоненте биоапатита определяется климатом, составом атмосферы и поверхностных вод. Чем ниже климатическая температура и степень освещенности, тем меньше в атмосфере и, соответственно, в поверхностных водах концентрация  $\text{CO}_2$ , и, следовательно, углерод и кислород в костном биоапатите проживающих в таких условиях животных становятся изотопно более легкими. Следовательно, выявленный тренд изотопного облегчения карбонатного углерода и кислорода в костном биоапатите мамонтов в направлении с юга-запада на северо-восток является вполне закономерным, прямо указывая на климатическую природу.

Картина изотопной неоднородности органических веществ в остатках мамонтов выглядит гораздо сложнее (рис. 19). В этом случае изотопный коэффициент углерода в костном коллагене колеблется в пределах от  $-20$  до  $-24$  ‰, а азота – в диапазоне  $4\text{--}12$  ‰. Данные по костному коллагену мамонтов Пети и Шнейдера хорошо вписываются в эти рамки, составляя:  $\delta^{13}\text{C} = -23\text{...}-21$  ‰,  $\delta^{15}\text{N} = 6.5\text{--}7.5$  ‰. Волосы и ткани мамонта Петра демонстрируют более изотопно-легкий углерод – в пределах  $-23\text{...}-29$  ‰, что

Таблица 5 Аминокислотный состав костного коллагена и тканей мамонта Пети, мг/г (%)

Table 5 Amino acid composition of bone collagen and tissues of the mammoth Petya, mg/g (%)

АК	Костный коллаген	Мышцы	Жир	Кожа	Волосы
Глицин	172.42 (23.07)	29.42 (25.24)	11.8 (21.49)	190.47 (26.66)	29.86 (4.79)
D-Аланин	1.27 (0.17)	н. о.	н. о.	3.08 (0.43)	0.84 (0.13)
L-Аланин	71.5 (9.57)	13.32 (11.43)	7.94 (14.46)	78.33 (10.96)	39.01 (6.25)
L-Валин	18.84 (2.52)	3.9 (3.35)	1.41 (2.57)	19.3 (2.7)	44.9 (7.2)
L-Лейцин	31.44 (4.21)	5.13 (4.4)	1.98 (3.61)	26.14 (3.66)	67.82 (10.87)
L-Изолейцин	8.68 (1.16)	1.98 (1.7)	0	9.24 (1.29)	27.09 (4.34)
Алифатические	304.15 (40.7)	53.75 (46.12)	23.13 (42.13)	326.56 (45.7)	209.52 (33.58)
L-Фенилаланин	20.66 (2.76)	4.82 (4.14)	2.45 (4.46)	15.22 (2.13)	18.16 (2.91)
L-Тирозин	20.14 (2.69)	н. о.	н. о.	22.37 (3.13)	6.25 (1)
Ароматические	40.8 (5.45)	4.82 (4.14)	2.45 (4.46)	37.59 (5.26)	24.41 (3.91)
L-Лизин	42.91 (5.74)	5.57 (4.78)	2.93 (5.34)	18.63 (2.61)	28.12 (4.51)
Основные	42.91 (5.74)	5.57 (4.78)	2.93 (5.34)	18.63 (2.61)	28.12 (4.51)
L-Глутаминовая кислота	68.37 (9.15)	8.44 (7.24)	5.43 (9.89)	60.8 (8.51)	103.95 (16.67)
D-Аспарагиновая кислота	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.	1.46 (0.23)
L-Аспарагиновая кислота	39.97 (5.35)	5.04 (4.32)	2.74 (4.99)	35.53 (4.97)	49.89 (8)
Кислые	108.34 (14.05)	13.48 (11.56)	8.17 (14.88)	96.33 (13.48)	155.3 (24.9)
L-Серин	42.55 (5.69)	5.77 (4.95)	2.09 (3.81)	36.88 (5.16)	87.16 (13.98)
L-Треонин	19.3 (2.58)	3.2 (2.75)	1.31 (2.39)	17.57 (2.46)	62.43 (10.01)
Гидроксильные	61.85 (8.27)	8.97 (7.7)	3.4 (6.2)	54.45 (7.62)	149.59 (23.99)
L-Пролин	120.95 (16.18)	19.71 (16.91)	9.04 (16.47)	109.36 (15.31)	56.73 (9.11)
Гидроксипролин	68.3 (8.66)	10.24 (8.79)	5.78 (10.52)	71.46 (10.02)	н.о.
Имино	189.25 (24.84)	29.95 (25.7)	14.82 (26.99)	180.82 (25.33)	56.73 (9.11)
ИТОГО	747.3	116.54	54.9	714.38	623.67
D/ L Аланин	0.01	н. о.	н. о.	0.04	0.02

Примечание. н. о. – не обнаружено.  
Note: н. о. – not determined.

в части растительной пищи соответствует потреблению растений преимущественно C3-типа, и гораздо более широкий разброс по изотопному составу азота – от 0.3 до 12 ‰, выстраиваясь в следующую последовательность (‰): кожа ( $\delta^{13}\text{C} = -25 \dots -23$ ;  $\delta^{15}\text{N} = 6.5 - 7$ ) → волосы ( $-25 \dots -23.5$ ;  $3 - 4$ ) → мышцы ( $-29 \dots -26.5$ ;  $7.5 - 12$ ) → жир ( $-29.2 \dots -28.5$ ;  $0.3 - 5.2$ ). Полученные данные позволяют сделать следующие выводы.

В части костного коллагена вариации изотопного состава азота отражают, прежде всего, большие колебания в пищевом рационе. Считается, что для мамонтов, проживавших в особенно некомфортных условиях, например, на территориях современной Западной Европы, севера Восточной Сибири и Аляски, была характерна копрофагия, обуславливающая изотопное утяжеление азота – от 8 ‰ [11]. В более комфортных условиях обитания, например, на территориях Печорского Приуралья и Прикаспийской низменности мамонты употребляли естественную для себя растительную пищу, что приводило к изотопному облегчению азота. Именно этим и можно объяснить наблюдающуюся на рис. 19 изотопную неоднородность костного коллагена мамонтов. В такой трактовке мамонта Петю можно отнести ко второй группе мамонтов, питавшихся преимущественно растительной пищей.

В этой связи есть еще одна интересная гипотеза, трактующая колебания изотопного состава азота с позиций аллохтонности-автохтонности мамонтов [17]. В рамках

этой гипотезы мамонты-мигранты, испытывающие дефицит качественной пищи, характеризуются изотопией азота в пределах 5–9 ‰, а оседлые мамонты, обеспеченные естественной кормовой базой, – в пределах 3–5.5 ‰. С таких позиций таймырские мамонты Петя и Шнейдера могут быть отнесены, скорее, к мигрантам.

Кожа по изотопному составу углерода и азота близка к костному коллагену, а волосы – к коллагену по изотопии углерода, но гораздо изотопно-легче по азоту. Очевидно, что последнее согласуется именно с летней генерацией этих волос, изотопный состав которых определялся растительной пищей. В части мышечных и жировых тканей вопрос трактовки изотопных характеристик не столь прост. В целом ткани гораздо легче коллагена кожи и волос по изотопному составу углерода, но при этом сильно варьируются по изотопному составу азота – от

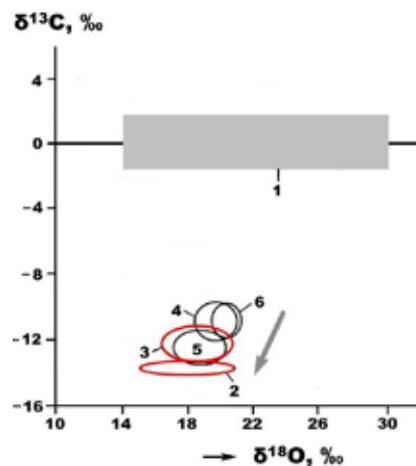


Рисунок 18. Изотопные характеристики морских осадочных карбонатолитов (1) и костного биоапатита мамонтовой фауны (2–6): 2 – мамонт Петя, 3 – мамонт Шнейдера, 4 – мамонтовая фауна с Печорского Приуралья, 5 – мамонтовая фауна со Среднего Прииртышья (коллекция А. А. Бондарева), 6 – мамонтовая фауна с Западной Европы [49]. Стрелкой показан тренд сопряженного изотопного облегчения углерода и кислорода в костном биоапатите мамонтов в направлении с юго-запада (Западная Европа) на северо-запад (таймырское побережье Северного Ледовитого океана).  
Figure 18. Isotopic characteristics of marine sedimentary carbonatolites (1) and bone bioapatite of the mammoth fauna (2–6): 2 – mammoth Petya, 3 – Schneider mammoth, 4 – mammoth fauna from the Pechora Cis-Urals, 5 – mammoth fauna from the Middle Irtysh Region (collection of A. A. Bondarev), 6 – mammoth fauna from Western Europe [49]. The arrow shows the trend of conjugate isotopic lightening of carbon and oxygen in bone bioapatite of mammoths in the direction from the south-west (Western Europe) to the north-west (Taymyr coast of the Arctic Ocean).

весьма изотопно-легкой жировой ткани до весьма изотопно-тяжелой мышечной.

К изложенному выше остается добавить данные по изотопии органической серы. Проведенный анализ показал, что в костном коллагене, волосах и тканях мамонта Пети значение  $\delta^{34}\text{S}_{\text{СОТ}}$  варьируется в относительно узких пределах – от  $-2.5$  до  $1\text{‰}$ , что вполне вписывается в интервал для хорошо сохранившихся остатков мамонтовой фауны [17].

В целом полученные по исследованным нами органическим остаткам изотопные данные свидетельствуют о том, что мамонт Пети погиб в конце лета и, скорее всего, как жертва людей-охотников.

Таким образом, в результате комплексного исследования костей и тканей впервые обнаружена большая изотопная неоднородность органического вещества мамонтов, свидетельствующая, во-первых, о многолетних и сезонных колебаниях климата, а во-вторых, о большой способности мамонтов к адаптации, что, в частности, отражается в естественных для них сезонных сменах рационов питания. Так, в случае мамонта Пети тяжелый изотопный состав азота в костном коллагене, формирующийся на

протяжении всей жизни мамонта, соответствует смешанному растительно-«копрофагическому» рациону питания, а вот более изотопно-легкий азот в волосах летней генерации указывает на преимущественно растительную диету. Получается, что в условиях предголоценового Таймыра существовал климатический контраст – зимы были длинными, холодными и в части кормовой базы относительно некомфортными, а лето – коротким, но достаточно теплым, чтобы появлялась обильная растительность. Известные палеоклиматические реконструкции вполне подтверждают такой вывод. Согласно последним средние зимние палеотемпературы в конце неоплейстоцена на Таймыре составляли  $-26\text{...}-29\text{ °C}$ , а средние температуры в середине-конце лета достигали  $6\text{ °C}$  [50]. В связи с приведенными выше оценками следует отметить следующий факт. Волосы мамонта, проживавшего на о-ве Большой Ляховский в самом конце Молого-Шекснинского межледниковья в условиях очень холодного климата, показали для азота  $\delta^{15}\text{N}=8.6\pm 0.16\text{‰}$  [13]. Это более чем в два раза изотопно-тяжелее, чем в волосах мамонта Пети, и вполне соответствует сугубо «копрофагическому» рациону питания.

## Заключение

С использованием широкого комплекса оптических, электронно-микроскопических, термических, рентгеноструктурных, ИК-спектроскопических, масс-спектрометрических, хроматографических, изотопно-спектроскопических методов исследованы остатки мамонта, обнаруженные в 2019 г. на территории Западного Таймыра геологами ВСЕГЕИ, включающие кости скелета и сохранившиеся на них мягкие мышечные и жировые ткани, кожу и волосы. Калиброванный радиоуглеродный возраст остатков составил  $12\,870\pm 110$  лет.

Вмещающие скелет гравийно-песчаные осадки по химическому и нормативно-минеральному составу варьируются между речными осадками и тиллами. Кости под микроскопом обнаруживают хорошую сохранность первичной микроструктуры. По состоянию нанопористости они ближе всего согласуются со слабоизмененными костями плейстоценовой мамонтовой фауны, отличаясь лишь меньшим условным числом пор, близким к показателям современных костей. Остевые волосы исследуемого мамонта характеризуются относительно хорошей сохранностью и темным цветом, что в рамках сезонных колебаний соответствует летней их генерации. Поверхность волосин микроскульптурирована, что может иметь как прижизненное, так и посмертное происхождение. Кожа представляет собой поверхностный, ороговевший и наиболее темный слой, залегающий на мягких тканях: мышечной – буроватой и более мягкой, чем кожа, и жировой – светло-серой до белой и очень мягкой. Выделенный из костей коллаген (выход составил  $13\text{--}21\%$ ) характеризуется хорошо сохранившейся фибриллярной текстурой и буроватым цветом.

По данным ИК-спектроскопии молекулярный состав органического вещества в остатках мамонта характери-



Рисунок 19. Изотопные характеристики органических веществ в остатках плейстоценовых животных. 1–14 – костный коллаген: 1 – мамонтовая фауна с Западной Европы [49]; 2 – монгоченский мамонт [18]; 3 – мамонт с острова Большой Ляховский; волосы [13]; 4 – мамонты Якутии [13]; 5 – мамонт со стоянок Межиричи, 6 – Бужанка-2, 7 – Юдиново, 8 – Елисеевичи в Прикаспийской низменности [17]; 9 – мамонты из Калининградской области [7]; 10 – мамонтовая фауна с Печорского Приуралья [20]; 11 – мамонтовая фауна со Среднего Прииртышья (коллекция А. А. Бондарева); 12 – мамонтенок Люба [30]; 13 – оймаконский мамонт [30]; 14 – таймырский мамонт Шнейдера. 15–19 – остатки мамонта Пети: 15 – костный коллаген, 16 – волосы, 17 – кожа, 18 – мышечная и 19 – жировая ткани.

Figure 19. Isotopic characteristics of organic substances in remains of Pleistocene animals. 1–14 – bone collagen: 1 – mammoth fauna from Western Europe [49]; 2 – Mongochen mammoth [18]; 3 – mammoth from the Bolshoi Lyakhovsky Island; hairs [13]; 4 – mammoths of Yakutia [13]; 5 – mammoth from the sites of Mezhirichi, 6 – Buzhanka-2, 7 – Yudinovo, 8 – Eliseevichi in the Caspian Lowland [17]; 9 – mammoths from the Kaliningrad Region [7]; 10 – mammoth fauna from the Pechora Cis-Urals [20]; 11 – mammoth fauna from the Middle Irtysh Region (collection of A. A. Bondarev); 12 – baby mammoth Lyuba [30]; 13 – Oymyakon mammoth [30]; 14 – Schneider mammoth from Taymyr. 15–19 – remains of the mammoth Petya: 15 – bone collagen, 16 – hairs, 17 – skin, 18 – muscle and 19 – fatty tissues.

зуется сложной комбинацией пептидных связей в разнообразных амидах, по сочетаниям которых костный коллаген, волосы, кожа и мягкие ткани заметно различаются, что свидетельствует о сравнительно хорошей сохранности органических компонентов в исследованных остатках.

На полученных нами кривых нагревания в диапазоне 20–600 °С зарегистрированы все три характерных для таких костей термических эффекта: 1) эндотермический с экстремумом при 70–85 °С, обусловленный низкотемпературной дегидратацией (абсорбированная вода) кости; 2) экзотермический В1 с экстремумом при 310–335 °С, отражающий выгорание липидо-белкового органического вещества; 3) экзотермический В2 с экстремумом при 400–440 °С, иногда расщепляющийся на два подпика, – выгорание более устойчивого к нагреванию белкового вещества. Характер выгорания органического вещества свидетельствует о преобладании в нем относительно низкомолекулярного, существенного липидного компонента, что можно объяснить как результатом фоссилизации, так и исходной особенностью костного коллагена мамонтов.

В составе костных, волосных и тканевых остатков исследованного мамонта обнаружено более 50 микроэлементов, по суммарному содержанию которых остатки подразделяются на две группы: 1) кости и мышечная ткань с аномально высоким валовым содержанием микроэлементов в пределах 5600–6600 г/т (обусловлено аномальными содержаниями Mn и Sr); 2) волосы, кожа и жировая ткань с валовым содержанием микроэлементов от 305 до 485 г/т. Отношения групповых содержаний микроэлементов биогенного и абиогенного происхождения свидетельствуют об относительно низкой степени фоссилизации костей и тканей мамонта.

Кристалличность биоапата находится на умеренно-низком уровне, что характерно для мало измененных ископаемых костей. Вхождение углерода в его структуру доказывается спектрами ИК-поглощения, в которых проявились полосы как анионов  $[\text{PO}_4]^{3-}$ , так и замещающих их и гидроксил-ионы анионов  $[\text{CO}_3]^{2-}$ . Из этого следует, что биоапатит в костях исследованного мамонта относится к В- и АВ-типам.

Полученные данные об элементном составе костного коллагена, кожи, волос и жировой ткани соответствуют стандартным для современных млекопитающих. В случае мышечной ткани наши данные в три раза уступают стандартным, что, возможно, объясняется смешанным белково-жировым ее составом. Результаты анализа аминокислотного состава органических веществ показали хорошую сохранность коллагена в костных остатках и ороговевшей коже мамонта, а также кератина в волосах. В мягких тканях содержится значительно меньше белковых компонентов, которые согласно аминокислотному составу в основном представлены коллагеном.

Изотопным исследованиям были подвергнуты костный биоапатит ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ ) и органическое вещество – костный коллаген, волосы, кожа, мышечная и жировая ткани ( $\delta^{34}\text{S}$ ,  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ ,  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}}$ ). В случае биоапата изотопный состав углерода и кислорода варьируется в пределах

соответственно –15...–13 и 15–21 ‰, закономерно встраиваясь в отчетливый тренд сопряженного изотопного облегчения углерода и кислорода в костном биоапате мамонтов в направлении с юго-запада (Западная Европа) на северо-восток (таймырское побережье Северного Ледовитого океана). Такой тренд прямо указывает на климатическую природу формирования изотопного состава карбонатной компоненты в костном биоапате мамонтов.

Изотопные коэффициенты углерода и азота в костном коллагене колеблются в пределах:  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -23...-21$  и  $\delta^{15}\text{N}_{\text{Air}} = 6.5-7.5$  ‰. Волосы, кожа и ткани мамонта Петра демонстрируют более изотопно-легкий углерод – в пределах –23...–29 ‰ и гораздо более широкий разброс по изотопному составу азота – 0.3–12 ‰, выстраиваясь в следующую последовательность (‰): кожа ( $\delta^{13}\text{C} = -25...-23$ ;  $\delta^{15}\text{N} = 6.5-7$ ) → волосы (–25...–23.5; 3–4) → мышцы (–29...–26.5; 7.5–12) → жир (–29.2...–28.5; 0.3–5.2). В части костного коллагена вариации изотопного состава азота отражают большие колебания в пищевом рационе мамонтов. В случае мамонта Пети можно полагать, что он питался преимущественно растительной пищей. Кожа по изотопному составу углерода и азота близка к костному коллагену, а волосы – к коллагену по изотопии углерода, но гораздо более изотопно-легкие по азоту. Очевидно, что последнее согласуется именно с летней генерацией этих волос, изотопный состав которых определялся растительной диетой. Мышечные и жировые ткани гораздо легче коллагена, кожи и волос по изотопному составу углерода, но при этом сильно варьируются по изотопному составу азота – от весьма изотопно-легкой жировой ткани до весьма изотопно-тяжелых мышц.

По изотопии органической серы значения в костном коллагене, волосах и тканях мамонта Пети варьируются в относительно узких пределах – от –3.5 до 2 ‰, что вполне вписывается в интервал для хорошо сохранившихся остатков мамонтовой фауны.

В целом в результате проведенных исследований впервые обнаружена большая изотопная неоднородность органического вещества мамонтов, отражающая, с одной стороны, сезонные и многолетние колебания климата, а с другой, большую способность мамонтов к адаптации. Изотопный состав азота в костном коллагене, формировавшийся на протяжении всей жизни мамонта Пети, и волосах летней генерации свидетельствует о смешанном растительно-копрофагическом рационе его питания в зимнее время и преимущественно растительном – в летнее. В частности, относительно изотопно-легкий азот в волосах летней генерации указывает на качественную растительную диету. Судя по результатам проведенных исследований, мамонт Петя погиб молодым, в конце лета.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Косинцев, П. А. Крупные млекопитающие неоплейстоцена широтного отрезка Нижнего Иртыша / П. А. Косинцев, Н. Е. Бобковская // Четвертичная палеозоо-

- логия на Урале. – Екатеринбург : Изд-во Уральского университета, 2003. – С. 223–232.
2. Улитко, А. И. Остатки шерстистых носорогов в музеях гг. Кирова и Сыктывкара / А. И. Улитко, Д. В. Пonomarev // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2007. – № 5. – С. 13–16.
  3. Lister, A. M. The West Runton mammoth (*Mammuthus trogontherii*) and its evolutionary significance / A. M. Lister, A. J. Stuart // *Quaternary International*. – 2010. – V. 228 (1–2). – P. 254–264.
  4. Kirillova, I. V. Kastykhtakh mammoth from Taimyr (Russia) / I. V. Kirillova, F. K. Shidlowski, V. V. Titov // *Quaternary International*. – 2012. – V. 276–277. – P. 269–277.
  5. Kosinzev, P. A. Living environments and diet of the Mgochen mammoth, Gydan Peninsula / P. A. Kosinzev, E. G. Lapteva, O. M. Korona, O. G. Zanina // *Quaternary International*. – 2012. – V. 276–277. – P. 253–268.
  6. Шпанский, А. В. Четвертичные млекопитающие из местонахождения Кожамжар (Павлодарская область, Казахстан) / А. В. Шпанский, С. А. Ильина, В. Н. Алиясова // Вестник Пермского ун-та. – 2015. – № 39. – С. 254–264.
  7. Кузьмин, Я. А. Первые радиоуглеродные даты по костям мамонтов (*Mammuthus primigenius*) в Калининградской области (Россия) / Я. А. Кузьмин, Й. ван дер Плихт, Н. В. Мартинович, Г. В. Гришанов // Евразия в кайнозое: стратиграфия, палеоэкология, культуры. – Иркутск, 2016. – Вып. 5. – С. 38–43.
  8. Oliveira, E. V. A new late Pleistocene ichnological site with mammal footprints from Brazil / E. V. Oliveira, P. S. Belo, G. L. Fambrini, A. N. Sial, A. K. B. Silva, A. M. F. Barretto // *J. of South Amer. Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 94. – P. 1–6.
  9. Price, T. D. Multi-element studies of diagenesis in prehistoric bone / T. D. Price // *The chemistry of diagenesis in prehistoric human bone*. Cambridge : Cambridge Univer. Press. – 1989. – P. 126–154.
  10. Price, T. D. Diagenesis in prehistoric bone : Problems and solutions / T. D. Price, J. Blitz, J. Burton, J. A. Ezzo // *J. Archaeol. Sci.* – 1992. – V. 19. – P. 513–529.
  11. Bocherens, H. Palaeoenvironmental and palaeodietary implications of isotopic biogeochemistry of late interglacial Neandertal and mammal bones in Scladina Cave (Belgium) / H. Bocherens, D. Billion, M. Paton-Mathis, D. Bonyean, M. Tonssaint [et al.] // *J. of Archaeol. Sci.* – 1999. – V. 26 (6). – P. 599–607.
  12. Николаев, В. И. Изотопный состав углерода пищи и костных остатков плейстоценовых мамонтов / В. И. Николаев, С. Давинзо, Л. В. Кузнецова, П. Якунин // Изотопно-геохимические и палеогеографические исследования на севере России. – Москва : Ин-т географии РАН, 2004. – С. 21–40.
  13. Николаев, В. И. Комплексные изотопные исследования мамонтов Якутии / В. И. Николаев, М. Барбиери, С. Даванзо, Т. В. Кузнецова, А. Донжинелли, Л. Д. Сулержицкий, П. Якумин // Квартер-2005: Материалы IV Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода. – Сыктывкар : Геопринт, 2005. – С. 297–298.
  14. Якумин, П. Изотопный состав азота пищи плейстоценовых мамонтов / П. Якумин, К. Деванзо, В. И. Николаев, Л. Д. Сулержицкий // Стабильные изотопы в палеоэкологических исследованиях. – Москва, 2006. – С. 70–85.
  15. Iacumin, P. Spatial and temporal variations in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ratios of mammoth hairs : Palaeodiet and Palaeoclimate implications / P. Iacumin, C. Devanzo, V. Nikolaev // *Chemical Geology*. – 2006. – № 231. – P. 16–25.
  16. Bocherens, H. L'alimentation et l'environnement (micro-usure et isotopes) des mammoths et elephants du Pleistocene / H. Bocherens, D. Drucker, F. Rivals // *Memoires de mammoths*. Musee national de Prehistoire-Les Eyzies-de-Tayas. – 2018. – P. 35–39.
  17. Drucker, D. G. Collagen stable isotopes provide insights into the end of the mammoth Steppe in the central East European plains during the Epigravettian / D. G. Drucker, R. E. Stevens, M. Germonpre, M. V. Sablin, S. Pean [et al.] // *Quaternary Research*. – 2018. – № 3. – P. 1–13.
  18. Мазепа, В. С. Изотопный состав углерода и азота шерсти мончегонского мамонта / В. С. Мазепа, Н. Г. Смирнов, Т. А. Веливецкая, С. И. Кияшко, А. В. Игнатъев [и др.] // Динамика экосистем: Материалы II Российской научной конференции. – Екатеринбург, 2010. – С. 123–125.
  19. Roroz, A. Diagenetic history of woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) skeletal remains from the archaeological site Cracow Spadzista Street (b), Southern Poland / A. Roroz, Z. Sawlowicz, P. Wojtal // *Polaios*. – 2012. – V. 27. – P. 541–549.
  20. Silaev, V. I. Mineralogical-geochemical characteristics of the bone detritus of Pleistocene mammals as a source of paleontological information / V. I. Silaev, D. V. Ponomarev, D. V. Kiseleva, I. V. Smoleva, Yu. V. Simakova [et al.] // *Paleontological J.* – 2017. – V. 51. – № 13. – P. 1395–1421.
  21. Zolotarev, V. M. Investigation of mammoth tusk from the Paleolithic sites of the European part of Russia by the IR reflection spectroscopy / V. M. Zolotarev, G. A. Khlopachev // *Global J. Archaeology, Anthropology*. – 2018. – № 7. – P. 82–85.
  22. Силаев, В. И. Опыт использования минералого-геохимических свойств костных остатков для реконструкции среды обитания на палеолитической стоянке Заозерье (Средний Урал) / В. И. Силаев, С. Н. Шанина, И. В. Смолева, Д. В. Киселёва, Н. В. Чередниченко [и др.] // ПАЖМИ. – 2019. – № 2. – С. 35–77.
  23. Силаев, В. И. Минералого-геохимические особенности пещерной фоссилизации ископаемых костей на примере пещеры Иманай (Южный Урал) / В. И. Силаев, М. Н. Паршукова, Д. О. Гимранов, В. Н. Филиппов, Д. В. Киселёва [и др.] // Вестник Пермского университета. Геология. – 2020. – Т. 19, № 4. – С. 323–358.
  24. Силаев, В. И. Костные остатки млекопитающих с палеолитической стоянки Ушбулак (Северо-Восточный Казахстан): археологический контекст, минералого-геохимические свойства и палеоэкологические реконструкции / В. И. Силаев, А. А. Анойкин, Г. Д. Павленок, А. Ф. Хазов, В. Н. Филиппов [и др.] // Вестник геонаук. – 2022. – № 4. – С. 3–37.

25. Павлова, В. В. Исследования структуры бивня мамонта методом ИК спектроскопии / В. В. Павлова, Е. С. Петухова, Т. А. Исакова, Е. С. Колесова, А. А. Чириков [и др.] // Оптика и спектроскопия. – 2022. – Т. 130, вып. 3. – С. 369–375.
26. Силаев, В. И. Плейстоценовый морж на р. Печоре: минералого-геохимические данные и палеоэкологические реконструкции / В. И. Силаев, И. В. Смолева, В. Н. Филиппов, С. Н. Шанина, А. Ф. Хазов [и др.] // Известия Коми НЦ УрО РАН. Серия «Науки о Земле». – 2023. – № 2. – С. 56–66.
27. Попов, А. И. Таймырский мамонт и проблема сохранения остатков мамонтовой фауны в четвертичных отложениях Сибири / А. И. Попов // Ледниковый период на территории Европейской части СССР и Сибири. – Москва : – Изд-во МГУ, 1959. – С. 259–275.
28. Косинцев, П. А. Находка остатков трупа мамонта (*Mammuthus primigenius* (Blum.)) на Гыданском полуострове (Западная Сибирь) / П. А. Косинцев // Материалы IV Международной мамонтовой конференции. – Якутск, 2007. – С. 88.
29. Fisher, D. C. Anatomy, death, and preservation of a woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) calf, Yamal Peninsula, northwest Siberia / D. C. Fisher, A. N. Tikhonov, P. A. Kosinzev, A. N. Rountrey, B. Buignes [et al.] // Quaternary International. – 2012. – V. 255. – P. 94–105.
30. Rountrey, A. N. Early tooth development, gestation, and season of birth in mammoths / A. N. Rountrey, D. S. Fisher, A. N. Tikhonov, P. A. Kosintsev, P. A. Lasarev [et al.] // Quaternary International. – 2012. – V. 255. – P. 196–205.
31. Mashchenko, E. N. The Zhenya Mammoth (*Mammuthus primigenius* (Blum.)) : Taphonomy, geology, age, morphology and ancient DNA of a 48.000 year old frozen mummy from western Taimyr, Russia / E. N. Mashchenko, O. R. Potapova, A. Vershinina, B. Shapiro, I. D. Streletskaia [et al.] // Quaternary International. – 2017. – V. 445. – P. 104–134.
32. Шпанский, А. В. О мамонтах и их спутниках. Палеоэкология мамонтовой фауны / А. В. Шпанский. – Москва : Изд-во «Фитон XXI», 2021. – 152 с.
33. Пфиценмайер, Е. В. В Сибирь за мамонтом. Очерки из путешествия в Северо-Восточную Сибирь / Е. В. Пфиценмайер. – Москва–Ленинград : Госиздателство, 1928. – 184 с.
34. Бялыницкий-Бируля, Ф. А. Гистологические и микрохимические наблюдения над тканями Березовского мамонта / Ф. А. Бялыницкий-Бируля // Научные результаты экспедиции, снаряженной Императорской Академией наук для раскопки мамонта, найденного на реке Березовке в 1901 году. – Санкт-Петербург, 1903. – Т. 2.
35. Гусев, Е. А. Отложения казанцевской трансгрессии (МИС 5) Енисейского севера / Е. А. Гусев, А. Н. Молодьков, Н. Ю. Аникина, С. А. Бондаренко, Л. Г. Деревянко [и др.] // Геология и геофизика. – 2016. – № 4. – С. 743–757.
36. Наканиси, К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений. Практическое руководство / К. Наканиси. – Москва : Мир, 1965. – 216 с.
37. Беллами, Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул / Л. Беллами. – Ленинград–Москва : Мир, 1971. – 318 с.
38. Смирнов, В. И. Физико-химические характеристики ископаемых костных остатков млекопитающих и проблема оценки их относительного возраста / В. И. Смирнов, С. Л. Вотяков, Н. О. Садыкова, Д. В. Киселёва, Ю. В. Щапова // Термический и масс-спектрометрический элементный анализ. – Екатеринбург : «Гошицкий», 2009. – 118 с.
39. Садыкова, Н. О. Термические свойства и элементный состав костных остатков млекопитающих как показатели степени фоссилизации / Н. О. Садыкова, Н. Г. Смирнов, С. Л. Вотяков, Д. В. Киселёва // Динамика экосистем в голоцене: Материалы Второй Российской научной конференции. – Екатеринбург–Челябинск : Рифей, 2010. – С. 182–186.
40. Ламанова, Л. М. Оксиды железа, хрома, титана в кровеносной системе человека / Л. М. Ламанова // Структура и разнообразие минерального мира: Материалы Минералогического семинара. – Сыктывкар : Геопринт, 2008. – С. 82–85.
41. Ламанова, Л. М. Отложение оксидов кремния в кардиоваскулярной системе / Л. М. Ламанова // Материалы Российского совещания. – Сыктывкар : Геопринт, 2009. – С. 175–177.
42. Ламанова Л. М. Образование минералов в жировой ткани человека / Л. М. Ламанова // Органическая минералогия: Материалы III Российского совещания с международным участием. – Сыктывкар : Геопринт, 2009. – С. 178, 179.
43. Рихванов, Л. П. Химический элементный состав органов и тканей человека и его экологическое значение / Л. П. Рихванов, Н. В. Барановская, Т. Н. Игнатова, А. Ф. Судыко, Г. П. Сандиминова [и др.] // Геохимия. – 2011. – № 7. – С. 779–784.
44. Шанина, С. Н. Аминокислоты в шунгитах Карелии / С. Н. Шанина, Е. А. Голубев // Геохимия. – 2010. – № 9. – С. 972–987.
45. Анищенко, Л. А. Аминокислоты как возможные индикаторы условий накопления и консервации органического вещества / Л. А. Анищенко, С. Н. Шанина // Органическая минералогия: Материалы Российского совещания. – Сыктывкар : Геопринт, 2009. – С. 71–74.
46. Котельникова, Е. Н. Особенности проявления изомерии, хиральности, четности и упаковки молекул в кристаллической структуре природных органических веществ / Е. Н. Котельникова // Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения -2014). – Сыктывкар : Геопринт, 2014. – С. 201–208.
47. Каткова, В. И. Хиральные соединения в уrolитах / В. И. Каткова, С. Н. Шанина // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2019. – № 4. – С. 38–41.
48. Yoice, D. J. Chronology and new research on the Schaefer mammoth (*Mammuthus primigenius*) site, Kenosha County, Wisconsin, USA / D. J. Yoice // Quaternary International. – 2006. – № 142. – P. 44–57.

49. Bocherens, H. Isotopic biogeochemistry and the palaeoecology of the mammoth steppe fauna / H. Bocherens // *Advances in Mammoth Research (Proceeding of the Second International Mammoth Conference, Rotterdam, May 16–20 1999)*. Deinesea. – 2003. – P. 57–76.
50. Васильчук, Ю. К. Новые данные о популяции мамонтов в позднплейстоценовой криолитозоне Евразии / Ю. К. Васильчук, А. К. Васильчук, О. Лонг, Э. Дж. Т. Джалл, Л. Л. Сулержицкий // *Доклады РАН*. – 2000. – Т. 370, № 6. – С. 815–818.

## References

- Kosintsev, P. A. Krupnye mlekopitayushchiye neopleystotsena shirotnogo otrezka Nizhnego Irtysya [Large mammals of the Neo-Pleistocene of the latitudinal segment of the Lower Irtys River] / P. A. Kosintsev, N. E. Bobkovskaya // *Chetvertichnaya paleozoologiya na Urale [Quaternary Paleozoology in the Ural Region]*. – Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2003. – P. 223–232.
- Ulitko, A. I. Ostatki sherstistyykh nosorogov v muzeyakh gg. Kirova i Syktyvkar [Remains of woolly rhinoceroses in museums of Kirov and Syktyvkar] / A. I. Ulitko, D. V. Ponomarev // *Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*. – 2007. – № 5. – P. 13–16.
- Lister, A. M. The West Runton mammoth (*Mammuthus trogontherii*) and its evolutionary significance / A. M. Lister, A. J. Stuart // *Quaternary International*. – 2010. – V. 228 (1–2). – P. 254–264.
- Kirillova, I. V. Kastykhtakh mammoth from Taimyr (Russia) / I. V. Kirillova, F. K. Shidlowski, V. V. Titov // *Quaternary International*. – 2012. – V. 276–277. – P. 269–277.
- Kosinzev, P. A. Living environments and diet of the Mgochen mammoth, Gydan Peninsula / P. A. Kosinzev, E. G. Lapteva, O. M. Korona, O. G. Zanina // *Quaternary International*. – 2012. – V. 276–277. – P. 253–268.
- Shpanskiy, A. V. Chetvertichnyye mlekopitayushchiye iz mestonakhozhdeniya Kozhamzhar (Pavlodarskaya oblast', Kazakhstan) [Quaternary mammals from the Kozhamzhar locality (Pavlodar Region, Kazakhstan)] / A. V. Shpanskiy, S. A. Il'ina, V. N. Aliyasova // *Bulletin of the Perm University*. – 2015. – № 39. – P. 254–264.
- Kuzmin, Ya. A. Pervyye radiouglerodnyye daty po kostyam mamontov (*Mammuthus primigenius*) v Kaliningradskoy oblasti (Rossia) [The first radiocarbon dates on the bones of mammoths (*Mammuthus primigenius*) in the Kaliningrad Region (Russia)] / Ya. A. Kuzmin, Y. van der Plikht, N. V. Martinovich, G. V. Grishanov // *Yevraziya v kaynozoye : stratigrafiya, paleoekologiya, kul'tury [Eurasia in the Cenozoic : stratigraphy, paleoecology, cultures]*. – Irkutsk, 2016. – Issue 5. – P. 38–43.
- Oliveira, E. V. A new late Pleistocene ichnological site with mammal footprints from Brazil / E. V. Oliveira, P. S. Belo, G. L. Fambrini, A. N. Sial, A. K. B. Silva [et al.] // *J. of South Amer. Earth Sciences*. – 2019. – V. 94. – P. 1–6.
- Price, T. D. Multi-element studies of diagenesis in prehistoric bone / T. D. Price // *The chemistry of diagenesis in prehistoric human bone*. Cambridge : Cambridge Univer. Press. – 1989. – P. 126–154.
- Price, T. D. Diagenesis in prehistoric bone : Problems and solutions / T. D. Price, J. Blitz, J. Burton, J. A. Ezzo // *J. Archaeol. Sci.* – 1992. – V. 19. – P. 513–529.
- Bocherens, H. Palaeoenvironmental and palaeodietary implications of isotopic biogeochemistry of late interglacial Neandertal and mammal bones in Scladina Cave (Belgium) / H. Bocherens, D. Billion, M. Paton-Mathis, D. Bonyean, M. Tonssaint [et al.] // *J. of Archaeol. Sci.* – 1999. – V. 26 (6). – P. 599–607.
- Nikolaev, V. I. Izotopnyy sostav ugleroda pishchi i kostnykh ostatkov pleystotsenovykh mamontov [Isotope composition of carbon in food and bone remains of Pleistocene mammoths] / V. I. Nikolaev, S. Davanzo, L. V. Kuznetsova, P. Yakunin // *Izotopno-geokhimicheskiye i paleogeograficheskiye issledovaniya na severe Rossii [Isotope-geochemical and paleogeographic studies in the North of Russia]*. – Moscow : Institute of Geography RAS, 2004. – P. 21–40.
- Nikolaev, V. I. Kompleksnyye izotopnyye issledovaniya mamontov Yakutii [Complex isotope studies of mammoths of Yakutia] / V. I. Nikolaev, M. Barbieri, S. Davanzo, T. V. Kuznetsova, A. Donzhinelli [et al.] // *Kvarter-2005 : Materials of the IV All-Russian Meeting on the Quaternary Period*. – Syktyvkar : Geoprint, 2005. – P. 297, 298.
- Yakumin, P. Izotopnyy sostav azota pishchi pleystotsenovykh mamontov [Isotopic composition of nitrogen in the food of Pleistocene mammoths] / P. Yakumin, K. Devanzo, V. I. Nikolaev, L. D. Sulerzhitsky // *Stabil'nyye izotopy v paleoekologicheskikh issledovaniyakh [Stable Isotopes in Paleoecological Studies]*. – Moscow, 2006. – P. 70–85.
- Iacumin, P. Spatial and temporal variations in the  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  ratios of mammoth hairs : Palaeodiet and Palaeoclimate implications / P. Iacumin, C. Devanzo, V. Nikolaev // *Chemical Geology*. – 2006. – № 231. – P. 16–25.
- Bocherens, H. L'alimentation et l'environnement (micro-usure et isotopes) des mammoths et elephants du Pleistocene / H. Bocherens, D. Drucker, F. Rivals // *Memoires de mammoths. Musee national de Prehistoire-Les Eyzies-de-Tayas*. – 2018. – P. 35–39.
- Drucker, D. G. Collagen stable isotopes provide insights into the end of the mammoth Steppe in the central East European plains during the Epigravettian / D. G. Drucker, R. E. Stevens, M. Germonpre, M. V. Sablin, S. Pean [et al.] // *Quaternary Research*. – 2018. – № 3. – P. 1–13.
- Mazepa, V. S. Izotopnyy sostav ugleroda i azota shersti monchegonskogo mamonta [Isotope composition of carbon and nitrogen in the wool of the Monchegon mammoth] / V. S. Mazepa, N. G. Smirnov, T. A. Velivetskaya, S. I. Kiyashko, A. V. Ignatiev [et al.] // *Dinamika ekosistem [Dynamics of ecosystems] : Proceedings of the II Russian Scientific Conference*. – Ekaterinburg, 2010. – P. 123–125.
- Roroz, A. Diagenetic history of woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) skeletal remains from the archaeological site Cracow Spadzista Street (b), Southern Poland

- / A. Roroz, Z. Sawlowicz, P. Wojtal // *Polaios*. – 2012. – V. 27. – P. 541–549.
20. Silaev, V. I. Mineralogical-geochemical characteristics of the bone detritus of Pleistocene mammals as a source of paleontological information / V. I. Silaev, D. V. Ponomarev, D. V. Kiseleva, I. V. Smoleva, Yu. V. Simakova [et al.] // *Paleontological J.* – 2017. – V. 51. – № 13. – P. 1395–1421.
  21. Zolotarev, V. M. Investigation of mammoth tusk from the Paleolithic sites of the European part of Russia by the IR reflection spectroscopy / V. M. Zolotarev, G. A. Khlopachev // *Global J. Archaeology, Anthropology*. – 2018. – № 7. – P. 82–85.
  22. Silaev, V. I. Opyt ispol'zovaniya mineralogo-geokhimicheskikh svoystv kostnykh ostatkov dlya rekonstruktsii sredy obitaniya na paleoliticheskoy stoyanke Zaozer'ye (Sredniy Ural) [Experience of using the mineralogical and geochemical properties of bone remains to reconstruct the habitat at the Paleolithic site of Zaozerye (Middle Urals)] / V. I. Silaev, S. N. Shanina, I. V. Smoleva, D. V. Kiseleva, N. V. Cherednichenko [et al.] // *PAZHMI*. – 2019. – № 2. – P. 35–77.
  23. Silaev, V. I. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti peshchernoj fossilizatsii iskopayemykh kostey na primere peshchery Imanay (Yuzhnyy Ural) [Mineralogical and geochemical features of cave fossilization of fossil bones using the example of the Imanai cave (Southern Urals)] / V. I. Silaev, M. N. Parshukova, D. O. Gimranov, V. N. Filippov, D. V. Kiseleva [et al.] // *Bulletin of the Perm University. Geology*. – 2020. – Vol. 19. – № 4. – P. 323–358.
  24. Silaev, V. I. Kostnyye ostatki mlekopitayushchikh s paleoliticheskoy stoyanki Ushbulak (Severo-Vostochnyy Kazakhstan) : arkheologicheskii kontekst, mineralogo-geokhimicheskiye svoystva i paleoekologicheskkiye rekonstruktsii [Bone remains of mammals from the Paleolithic site of Ushbulak (North-Eastern Kazakhstan) : archaeological context, mineralogical and geochemical properties and paleoecological reconstructions] / V. I. Silaev, A. A. Anoykin, G. D. Pavlenok, A. F. Khazov, V. N. Filippov [et al.] // *Bulletin of Geosciences*. – 2022. – № 4. – P. 3–37.
  25. Pavlova, V. V. Issledovaniya struktury bivnya mamonta metodom IK spektroskopii [Study of the structure of a mammoth tusk using IR spectroscopy] / V. V. Pavlova, E. S. Petukhova, T. A. Isakova, E. S. Kolesova, A. A. Chirikov [et al.] // *Optika i spektroskopiya [Optics and Spectroscopy]*. – 2022. – Vol. 130. – Issue 3. – P. 369–375.
  26. Silaev, V. I. Pleystotsenovyy morzh na r. Pechore : mineralogo-geokhimicheskiye dannyye i paleoekologicheskkiye rekonstruktsii [Pleistocene walrus on the Pechora River : mineralogical and geochemical data and paleoecological reconstructions] / V. I. Silaev, I. V. Smoleva, V. N. Filippov, S. N. Shanina, A. F. Khazov [et al.] // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences"*. – 2023. – № 2. – P. 56–66.
  27. Popov, A. I. Taymyrskiy mamont i problema sokhraneniya ostatkov mamontovoy fauny v chetvertichnykh otlozheniyakh Sibiri [Taimyr mammoth and the problem of preserving the remains of mammoth fauna in Quaternary deposits of Siberia] / A. I. Popov // *Lednikovyy period na territorii Yevropeyskoy chasti SSSR i Sibiri [Ice Age on the Territory of the European Part of the USSR and Siberia]*. – Moscow : Moscow State University Publishing House, 1959. – P. 259–275.
  28. Kosintsev, P. A. Nakhodka ostatkov trupa mamonta (*Mammuthus primigenius* (Blum.)) na Gydanskom poluostrove (Zapadnaya Sibir') [Finding the remains of a mammoth corpse (*Mammuthus primigenius* (Blum.)) on the Gydan Peninsula (Western Siberia)] / P. A. Kosintsev // *Materials of the IV International Mammoth Conference*. – Yakutsk, 2007. – P. 88.
  29. Fisher, D. C. Anatomy, death, and preservation of a woolly mammoth (*Mammuthus primigenius*) calf, Yamal Peninsula, northwest Siberia / D. C. Fisher, A. N. Tikhonov, P. A. Kosintsev, A. N. Rountrey, B. Buignes [et al.] // *Quaternary International*. – 2012. – V. 255. – P. 94–105.
  30. Rountrey, A. N. Early tooth development, gestation, and season of birth in mammoths / A. N. Rountrey, D. S. Fisher, A. N. Tikhonov, P. A. Kosintsev, P. A. Lasarev [et al.] // *Quaternary International*. – 2012. – V. 255. – P. 196–205.
  31. Mashchenko, E. N. The Zhenya Mammoth (*Mammuthus primigenius* (Blum.)) : Taphonomy, geology, age, morphology and ancient DNA of a 48.000 year old frozen mummy from western Taimyr, Russia / E. N. Mashchenko, O. R. Potapova, A. Vershinina, B. Shapiro, I. D. Streletskaya [et al.] // *Quaternary International*. – 2017. – V. 445. – P. 104–134.
  32. Shpansky, A. V. O mamontakh i ikh sputnikakh. Paleoekologiya mamontovoy fauny [About mammoths and their companions. Paleoecology of mammoth fauna] / A. V. Shpansky. – Moscow : Fiton XXI Publishing House, 2021. – 152 p.
  33. Pfizenmayer, E. V. V. Sibir' za mamontom. Ocherki iz puteshestviya v Severo-Vostochnuyu Sibir' [To Siberia for the mammoth. Essays from a trip to North-Eastern Siberia] / E. V. Pfizenmayer. – Moscow-Leningrad : State Publishing House. – 1928. – 184 p.
  34. Byalynitsky-Birulya, F. A. Gistologicheskie i mikrokhimicheskie nablyudeniya nad tkanyami Berezovskogo mamonta [Histological and microchemical observations of the tissues of the Berezovkamammoth] / F. A. Byalynitsky-Birulya // *Nauchnyye rezul'taty ekspeditsii, snaryazhennoy Imperatorskoy Akademiyey nauk dlya raskopki mamonta, naydannogo na reke Berezovke v 1901 godu [Scientific results of the expedition equipped by the Imperial Academy of Sciences to excavate a mammoth found on the Berezovka River in 1901]*. – Saint-Petersburg, 1903. – Vol. 2.
  35. Gusev, E. A. Otlozheniya kazantsevskoy transgressii (MIS 5) Yeniseyskogo severa [Sediments of the Kazantsev transgression (MIS 5) of the Yenisei North] / E. A. Gusev, A. N. Molodkov, N. Yu. Anikina, S. A. Bondarenko, L. G. Derevyanko [et al.] // *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*. – 2016. – № 4. – P. 743–757.
  36. Nakanishi, K. Infrakrasnyye spektry i stroyeniye organicheskikh soyedineniy. Prakticheskoe rukovodstvo [Infrared spectra and structure of organic compounds. Practi-

- cal Guide] / K. Nakanishi. – Moscow : Mir, 1965. – 216 p.
37. Bellamy, L. Novyye dannyye po IR-spektram slozhnykh molekul [New data on the IR spectra of complex molecules] / L. Bellamy. – Leningrad–Moscow, Mir. – 1971. – 318 p.
  38. Smirnov, V. I. Fiziko-khimicheskiye kharakteristiki iskopayemykh kostnykh ostatkov mlekopitayushchikh i problema otsenki ikh otноситel'nogo vozrasta [Physico-chemical characteristics of fossil bone remains of mammals and the problem of estimating their relative age] / V. I. Smirnov, S. L. Votyakov, N. O. Sadykova, D. V. Kiseleva, Yu. V. Shchapova // Termicheskiy i mass-spektrometricheskiy elementnyy analiz [Thermal and Mass Spectrometric Elemental Analysis]. – Ekaterinburg : "Goshchitsky", 2009. – 118 p.
  39. Sadykova, N. O. Termicheskie svoystva i elementnyy sostav kostnykh ostatkov mlekopitayushchikh kak pokazateli stepeni fossilizatsii [Thermal properties and elemental composition of bone remains of mammals as indicators of the degree of fossilization] / N. O. Sadykova, N. G. Smirnov, S. L. Votyakov, D. V. Kiseleva // Dinamika ekosistem v golotsene [Dynamics of Ecosystems in the Holocene] : Materials of the Second Russian Scientific Conference. – Ekaterinburg–Chelyabinsk : Rifey, 2010. – P. 182–186.
  40. Lamanova, L. M. Oksidy zheleza, khroma, titana v krovenosnoy sisteme cheloveka [Oxides of iron, chromium, titanium in the human circulatory system] / L. M. Lamanova // Struktura i raznoobraziye mineral'nogo mira [Structure and Diversity of the Mineral World] : Materials of the Mineralogical Seminar. – Syktyvkar : Geoprint, 2008. – P. 82–85.
  41. Lamanova, L. M. Otlozheniye oksidov kremniya v kardiovaskulyarnoy sisteme [Deposition of silicon oxides in the cardiovascular system] / L. M. Lamanova // Materials of the Russian Meeting. – Syktyvkar : Geoprint, 2009. – P. 175–177.
  42. Lamanova, L. M. Obrazovaniye mineralov v zhirovoy tkani cheloveka [Formation of minerals in human adipose tissue] / L. M. Lamanova // Organicheskaya mineralogiya [Organic Mineralogy] : Materials of the III Russian Meeting with International Participation]. – Syktyvkar : Geoprint, 2009. – P. 178, 179.
  43. Rikhvanov, L. P. Khimicheskiy elementnyy sostav organov i tkaney cheloveka i yego ekologicheskoye znachenie [Chemical elemental composition of human organs and tissues and its environmental significance] / L. P. Rikhvanov, N. V. Baraznovskaya, T. N. Ignatova, A. F. Sudyko, G. P. Sandimirova [et al.] // Geokhimiya [Geochemistry]. – 2011. – № 7. – P. 779–784.
  44. Shanina, S. N. Aminokisloty v shungitakh Karelii [Amino acids in shungites of Karelia] / S. N. Shanina, E. A. Golubev // Geokhimiya [Geochemistry]. – 2010. – № 9. – P. 972–987.
  45. Anishchenko, L. A. Aminokisloty kak vozmozhnyye indikatory usloviy nakopleniya i konservatsii organicheskogo veshchestva [Amino acids as possible indicators of the conditions of accumulation and conservation of organic matter] / L. A. Anishchenko, S. N. Shanina // Organicheskaya mineralogiya [Organic Mineralogy] : Materials of the Russian Meeting. – Syktyvkar : Geoprint, 2009. – P. 71–74.
  46. Kotelnikova, E. N. Osobennosti proyavleniya izomerii, khiral'nosti, chetnosti i upakovki molekul v kristallicheskoy strukture prirodnykh organicheskikh veshchestv [Features of the manifestation of isomerism, chirality, parity and packing of molecules in the crystal structure of natural organic substances] / E. N. Kotelnikova // Sovremennyye problemy teoreticheskoy, eksperimental'noy i prikladnoy mineralogii (Yushkinskiye chteniya - 2014) [Modern Issues of Theoretical, Experimental and Applied Mineralogy (Yushkin Readings - 2014)]. – Syktyvkar : Geoprint, 2014. – P. 201–208.
  47. Katkova, V. I. Khiral'nye soedineniya v urolitakh [Chiral compounds in uroliths] / V. I. Katkova, S. N. Shanina // Bulletin of the Institute of Geology of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2019. – № 4. – P. 38–41.
  48. Joyce, D. J. Chronology and new research on the Schaefer mammoth (*Mammuthus primigenius*) site, Kenosha County, Wisconsin, USA / D. J. Joyce // Quaternary International. – 2006. – № 142. – P. 44–57.
  49. Bocherens, H. Isotopic biogeochemistry and the palaeoecology of the mammoth steppe fauna / H. Bocherens // Advances in Mammoth Research (Proceeding of the Second International Mammoth Conference, Rotterdam, May 16–20 1999). Deinesea. – 2003. – P. 57–76.
  50. Vasilchuk, Yu. K. Novyye dannyye o populyatsii mamontov v pozdnepleysttsenovoy kriolitozone Yevrazii [New data on the mammoth population in the Late Pleistocene cryolithozone of Eurasia] / Yu. K. Vasilchuk, A. K. Vasilchuk, O. Long, E. J. T. Jall, L. L. Sulerzhitsky // Reports RAS. – 2000. – Vol. 370. – № 6. – P. 815–818.

#### Благодарность (госзадание)

Авторы благодарят сотрудника ВСЕГЕИ Д. Н. Костина и главного геолога Норильского филиала ВСЕГЕИ Г. В. Шнейдера за предоставленную для исследования уникальную коллекцию костных и костно-волосо-кожно-тканевых остатков таймырских мамонтов из новых местонахождений.

#### Acknowledgements (state task)

The authors would like to thank the staff member of the A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI) D. N. Kostin and Chief Geologist of the VSEGEI Norilsk Branch G. V. Shneider for a unique collection of bone and bone-hair-skin-tissue remains of Taymyr mammoths from new locations given to us for research.

#### Информация об авторах:

**Силаев Валерий Иванович** – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus ID: 7003764179, <https://orcid.org/0000-0002-4653-5233> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [silaev@geo.komisc.ru](mailto:silaev@geo.komisc.ru)).

**Шуйский Александр Сергеевич** – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 5721240694, <https://orcid.org/0000-0002-6928-9354> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [self88@yandex.ru](mailto:self88@yandex.ru)).

**Смолева Ирина Владимировна** – ведущий инженер-химик группы изотопной геохимии Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [smolewa@geo.komisc.ru](mailto:smolewa@geo.komisc.ru)).

**Шанина Светлана Николаевна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus ID: 6603449438, <https://orcid.org/0000-0002-9889-8968> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [shanina@geo.komisc.ru](mailto:shanina@geo.komisc.ru)).

**Васильев Евгений Алексеевич** – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ЛИВС ЦКП, Санкт-Петербургский горный университет; Scopus ID: 57188645545, <https://orcid.org/0000-0003-2216-0956> (199106, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2; [simphy12@mail.ru](mailto:simphy12@mail.ru)).

**Киселёва Дарья Владимировна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук; <https://orcid.org/0000-0002-8682-1541> (620110, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. академика Вонсовского, д. 15; e-mail: [podarenka@mail.ru](mailto:podarenka@mail.ru)).

**Хазов Антон Федорович** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus ID: 10044533600, <https://orcid.org/0000-0003-4048-8509> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [akhazov@geo.komisc.ru](mailto:akhazov@geo.komisc.ru)).

**Макеев Борис Александрович** – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus ID: 26664800600, <https://orcid.org/0000-0001-6001-8278> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [makboris@mail.ru](mailto:makboris@mail.ru)).

**Сухарев Александр Евгеньевич** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus ID: 7005044695, <https://orcid.org/0000-0003-1732-0134> (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: [sukharev@geo.komisc.ru](mailto:sukharev@geo.komisc.ru)).

**Фокина Анастасия Константиновна** – инженер-исследователь Института геологии и геохимии им. академика А. Н. Заварицкого Уральского отделения Российской академии наук; <https://orcid.org/0009-0002-9667-0799> (620110, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. академика Вонсовского, д. 15, e-mail: [fokina.a.k@yandex.ru](mailto:fokina.a.k@yandex.ru)).

#### About the authors:

**Valery I. Silaev** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Chief Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS; Scopus ID: 7003764179, <https://orcid.org/0000-0002-4653-5233> (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [silaev@geo.komisc.ru](mailto:silaev@geo.komisc.ru)).

**Alexander S. Shuyskiy** – Junior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS; Scopus Author ID: 5721240694, <https://orcid.org/0000-0002-6928-9354> (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [self88@yandex.ru](mailto:self88@yandex.ru)).

**Irina V. Smoleva** – Leading Chemist Engineer of the Isotope Geochemistry Group at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: [smolewa@geo.komisc.ru](mailto:smolewa@geo.komisc.ru)).

**Svetlana N. Shanina** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS; Scopus ID: 6603449438, <https://orcid.org/0000-0002-9889-8968> (Institute of

Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: shanina@geo.komisc.ru).

**Evgeny A. Vasiliev** – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the Saint-Petersburg Mining University; Scopus ID: 57188645545, <https://orcid.org/0000-0003-2216-0956> (21st Line, Vasilievsky Island, Saint-Petersburg, Russian Federation, 199106; e-mail: simphy12@mail.ru).

**Darya V. Kiseleva** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritskiy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0000-0002-8682-1541> (15 Academician Vonsovskiy st., Ekaterinburg, Russian Federation, 620110, e-mail: podarenka@mail.ru).

**Anton F. Khazov** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS; Scopus ID: 10044533600, <https://orcid.org/0000-0003-4048-8509> (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: akhazov@geo.komisc.ru).

**Boris A. Makeev** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS; Scopus ID: 26664800600, <https://orcid.org/0000-0001-6001-8278> (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: makboris@mail.ru).

**Alexander E. Sukharev** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS; Scopus ID: 7005044695, <https://orcid.org/0000-0003-1732-0134> (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: sukharev@geo.komisc.ru).

**Anastasia K. Fokina** – Research Engineer at the Institute of Geology and Geochemistry named after academician A. N. Zavaritskiy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; <https://orcid.org/0009-0002-9667-0799> (15 Academician Vonsovskiy st., Ekaterinburg, Russian Federation, 620110, e-mail: fokina.a.k@yandex.ru).

#### Для цитирования:

Силаев, В. И. Предголоценовый таймырский мамонт Петя: минералого-изотопно-геохимические свойства костей, мягких тканей, кожи, волос и палеоэкологические реконструкции / В. И. Силаев, А. С. Шуйский, И. В. Смалева, С. Н. Шанина, Е. А. Васильев, Д. В. Киселёва, А. Ф. Хазов, Б. А. Makeev, А. Е. Сухарев, А. К. Фокина // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 116–135.

#### For citation:

Silaev, V. I. Predgolocenovyj tajmyrskij mamont Petya: mineralogo-izotopno-geohimicheskie svoystva kostej, myagkih tkanej, kozhi, volos i paleoekologicheskie rekonstrukcii [Pre-Holocene Taymyr mammoth Petya: mineralogical-isotope-geochemical properties of bones, soft tissues, skin, hairs and paleoecologic reconstructions] / V. I. Silaev, A. S. Shuyskiy, I. V. Smoleva, S. N. Shanina, E. A. Vasiliev, D. V. Kiseleva, A. F. Khazov, B. A. Makeev, A. E. Sukharev, A. K. Fokina // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 116–135.

Дата поступления рукописи: 18.12.2023

Прошла рецензирование: 27.12.2023

Принято решение о публикации: 27.03.2024

Received: 18.12.2023

Reviewed: 27.12.2023

Accepted: 27.03.2024

## Характеристика холелитов кристаллического строения

Е. В. Машина

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
mashina@geo.komisc.ru

### Аннотация

В статье приведены результаты исследований особенностей состава и структуры холелитов кристаллического строения. Подтверждено, что холестерин является основным веществом кристаллических холелитов. В исследованных образцах выявлены включения минералов, представленных классами: карбонатов, оксидов, хлоридов, сульфатов, силикатов и фосфатов. В работе впервые отмечено, что высокоуглеродистые образования холестерина, сформированные в организме человека, по морфологическим особенностям кристаллов и физико-химическим характеристикам (поведение при нагревании, элементный состав) можно отнести к аналогам природных кристаллических смол. Обсуждаются предполагаемые механизмы формирования холелитов с различной структурной организацией (сфероидальных, дендритных, оолитовых, шестоватых агрегатов).

### Ключевые слова:

холелиты, холестерин, органическое вещество, структура

### Введение

Широкое распространение холестеринового холелитиаза является актуальной причиной его интенсивного изучения во всем мире. Как правило, большая часть работ посвящена изучению факторов, способствующих холелитиазу [1–10]. Холестерин является основным веществом холелитов кристаллического строения, образующихся в организме человека. Минеральная составляющая холелитов представлена карбонатом кальция и фосфатом кальция, среди примесей – соединения железа, цинка, хрома, меди, бария, марганца и др. [11–14].

Холестерин входит в группу липидов. Эта обширная разнородная группа природных соединений, общим свойством которых являются способность к растворению в неполярных органических растворителях (хлороформе, бензоле, эфире и др.) и почти полная нерастворимость в водной среде. В целом липиды построены по единому принципу и состоят из трех фрагментов: гидрофильного (полярная головка), гидрофобного (неполярный хвост) и связующего звеньев. К липидам относятся, в том числе, жирные кислоты, терпены и воски. Терпены относятся

## Characteristics of gallstones with crystal structure

E. V. Mashina

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar  
mashina@geo.komisc.ru

### Abstract

The article presents the study results of the composition and structure of gallstones with crystal structure. Cholesterol has been confirmed to be the main constituent of crystal gallstones. The studied samples have been identified for inclusions of minerals represented by the following classes as carbonates, oxides, chlorides, sulfates, silicates, and phosphates. The work first mentions the fact that high-carbon cholesterol formations, formed in the human body, by the morphological characteristics of crystals and physicochemical characteristics (behavior when heated, elemental composition) can be classified as analogues of natural crystal resins. The proposed formation mechanisms of gallstones with different structural organizations (spherulite, dendritic, oolitic, columnar aggregates) are discussed.

### Keywords:

gallstones, cholesterol, organic matter, structure

к липидам растений. Известно, что производными терпеновых углеводов являются кристаллические смолы – флагстафит, ксилоретин, фихтелит, гартит, динит, рефикит, гартин, симонеллит и шеерерит [15–18]. Перечисленные смолы изучены слабо, так же как и химизм процессов их образования. Для них характерны бесцветные, белые, пластинчатые и игольчатые кристаллы. Согласно элементному анализу, содержания углерода и водорода в смолах составляют 78–86 и 10–12 % соответственно, атомное отношение Н/С – 1.6–1.8. В них также может присутствовать кислород – до 10 %. При нагревании от 34 до 200 °С кристаллические смолы плавятся, причем более высокие температуры характерны для кислородсодержащих. Основой производных терпенов, например, фихтелита, динита и гартита, являются три циклогексановых шестичленных кольца, как в структуре холестерина.

Ранее Н. П. Юшкиным [19] отмечалось, что, несмотря на разницу в составе, мир биоминералов и минеральный мир литосферы строятся по одним и тем же структурным законам. С минералогической точки зрения механиз-

мы формирования холелитов закодированы в особенностях не только состава, но и структуры. В комплексе они предоставляют необходимые сведения для анализа патогенеза холелитов. На сегодняшний день строение холестериновых камней изучено слабо, без детального исследования структурной организации кристаллических агрегатов.

Целью настоящей работы являются изучение состава, структурных особенностей кристаллических холелитов и проведение сравнительного анализа изученных образцов с природными кристаллическими образованиями. На основании полученных результатов исследования обсуждаются вероятные механизмы формирования углеродистых холестериновых агрегатов.

## Объекты и методы

Объектами исследования послужили холелиты жителей Республики Коми (Российская Федерация). Образцы окрашены в различные оттенки – от белого до бежевого цвета, имеют овально-округлую форму (рис. 1, 2). В ходе исследования применялись следующие методы: рентгенофазовый (Shimadzu XRD-6000), ИК-спектроскопия поглощения (ИнфраЛюм ФТ-02), термический (TGA/DSC 3+), химический (EA-1110). Строение холелитов изучено по шлифам с помощью поляризационного микроскопа

(МИН-8) и в сколах с использованием аналитического сканирующего электронного микроскопа VEGA3 TESCAN с энергодисперсионной приставкой X-Max. Всего проанализировано порядка ста образцов. Аналитические исследования выполнены в ЦКП «Геонаука» Института геологии Коми НЦ УрО РАН.

Рентгеновскую съемку осуществляли при  $Cu_{K\alpha}$ , 40 kV, 30 mA с шагом сканирования  $0.02^\circ$ , при скорости съемки 0.5 гр/мин. Для изучения холелитов с помощью ИК-фурье спектроскопии был выбран средний диапазон в области от 4000 до 400  $cm^{-1}$  с шагом 4  $cm^{-1}$ . Данный диапазон часто применяется для биологических исследований и является классическим для идентификации состава желчных камней. Экспериментальная работа по термическому поведению образцов проводилась в воздушной среде при нагревании до 800 °C со скоростью 10 °C/мин.

## Результаты и их обсуждение

Исследования методом рентгенофазового анализа показали, что холелиты сложены моногидратом холестерина  $C_{27}H_{46}O \cdot H_2O$ . Основные полосы на рентгенограмме  $d = 34, 5.9, 4.7, 3.8$  (рис. 3, а). Помимо холестерина, в некоторых холелитах могут присутствовать включения различных кристаллических модификаций карбоната кальция: кальцит, ватерит и арагонит. При этом встречаемость вате-

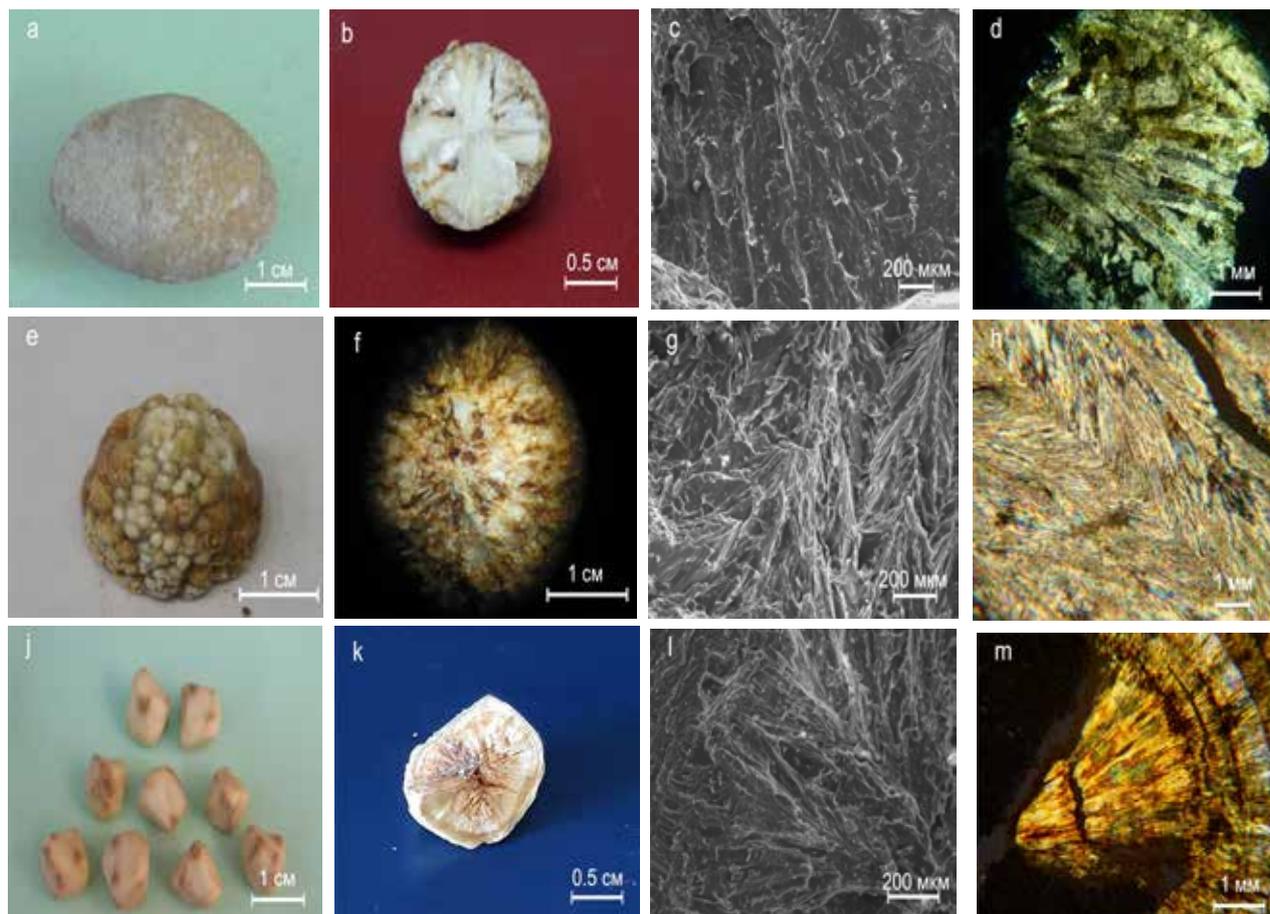


Рисунок 1. Холестериновые холелиты. Внешний вид: а – обр. 49, е – обр. 9, j – обр. 1; сколы образцов: б – обр. 49, ф – обр. 9, к – обр. 1; морфология поверхности (СЭМ): с – обр. 49, г – обр. 9, л – обр. 1; фотографии шлифов (никколи +): д – обр. 49, h – обр. 9, m – обр. 1.  
Figure 1. Cholesterol gallstones. Appearance: a – sample 49, e – sample 9, j – sample 1; chips of samples: b – sample 49, f – sample 9, k – sample 1; surface morphology (SEM): c – sample 49, g – sample 9, l – sample 1; photos of thin sections (nicols +): d – sample 49, h – sample 9, m – sample 1.

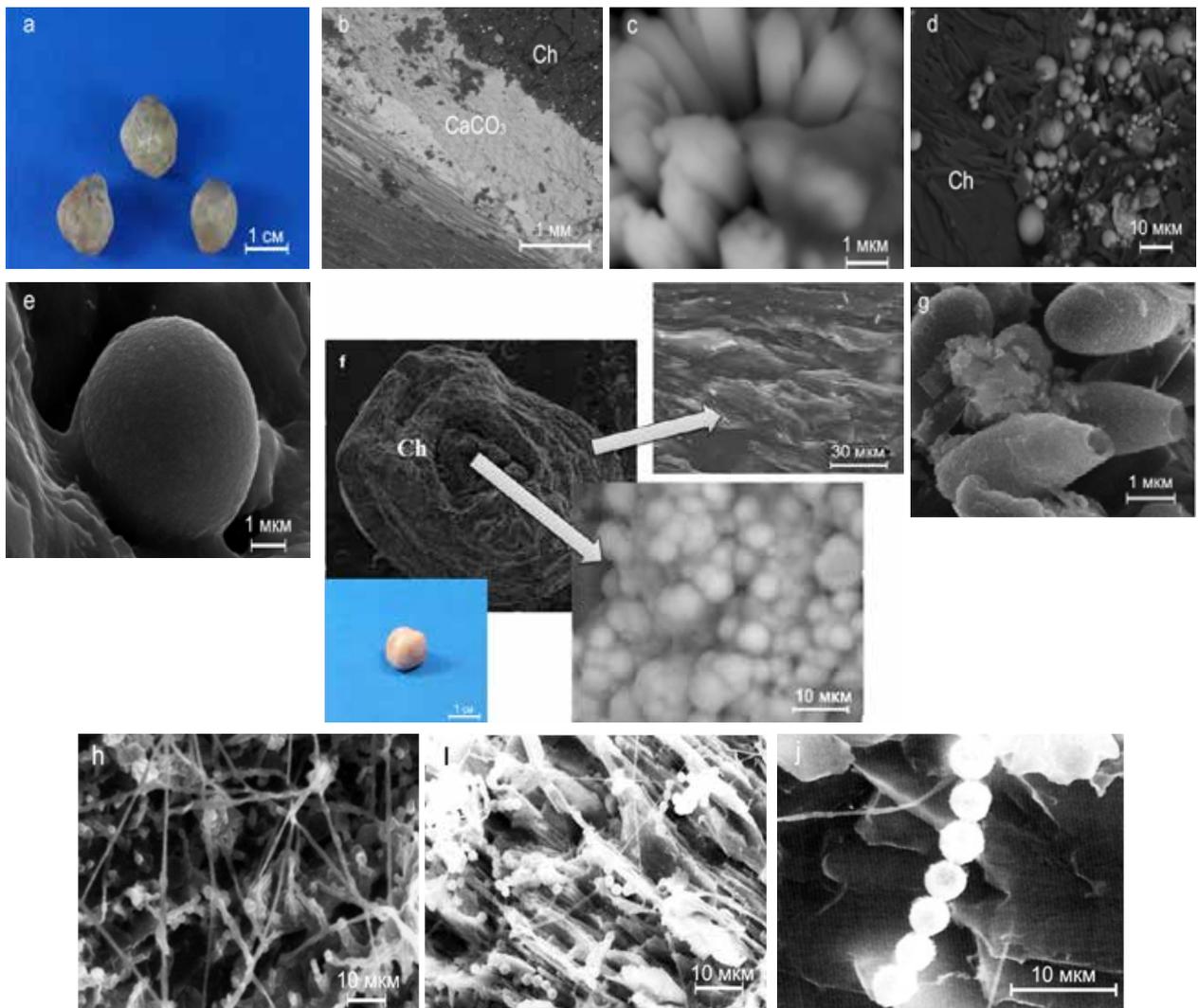


Рисунок 2. Холелиты с минеральной компонентой: а – внешний вид образцов с карбонатом кальция (обр. 32); СЭМ: б – скол, наслоения карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) на кристаллический холестерин (обр. 32); с – морфология арагонита (обр. 32); д, е – морфология ватерита (обр. 53); ф – внешний вид и скол образца с фосфатом кальция (обр. 51); г – яйца гельминтов (обр. 51); h – нитчатая грибковая микрофлора (обр. 43); i – дрожжевая грибковая микрофлора (обр. 2), j – увеличенный фрагмент (i). Ch – холестерин.  
 Figure 2. Gallstones with a mineral component: a – samples with calcium carbonate (sample 32); SEM: b – chip, layers of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) onto crystalline cholesterol (sample 32); c – morphology of aragonite (sample 32); d, e – morphology of vaterite (sample 53); f – appearance and chip of a sample with calcium phosphate (sample 51); g – helminth eggs (sample 51); h – filamentous fungal microflora (sample 43); i – yeast fungal microflora (sample 2), j – enlarged fragment (i). Ch – cholesterol.

рита относительно других полиморфных модификаций в образцах составляет до 80 % случаев (рис. 3, б). Одновременно три полиморфные модификации карбоната кальция в холелитах были зафиксированы только в 10 % случаях. Параметры элементарной ячейки для минералов составляют: ватерита  $a_0=7.13-7.14 \text{ \AA}$ ,  $c_0=16.84-16.98 \text{ \AA}$ , арагонита  $a_0=4.95-4.96 \text{ \AA}$ ,  $b_0=7.95 \text{ \AA}$ ,  $c_0=5.73-5.74 \text{ \AA}$ , кальцита  $a_0=4.97-4.98 \text{ \AA}$ ,  $c_0=16.99-17.05 \text{ \AA}$ . Для всех полиморфных модификаций карбоната кальция значения параметров элементарной ячейки и объем ячейки  $\text{Å}$  несколько меньше теоретических (эталон), что, вероятно, может быть связано с входением примесей в структуру.

Данные ИК-спектроскопии дополняют рентгенофазовый анализ и подтверждают, что основным веществом, слагающим образцы, является холестерин. Доказательство его присутствия – наличие полос – четкой и очень интенсивной при  $1056 \text{ см}^{-1}$  и двоянной с ней менее интенсивной при  $1022 \text{ см}^{-1}$ , принадлежащих колебаниям

углеродного скелета C-C, а также менее интенсивных соседствующих полос при  $840, 800 \text{ см}^{-1}$ , относящихся к деформационным колебаниям групп C-H (рис. 4, а). В некоторых образцах помимо холестерина присутствует фосфат кальция, на это указывает четкий дублет при  $604, 593 \text{ см}^{-1}$ , относящийся к деформационным колебаниям группы  $[\text{PO}_4]$  (рис. 4, б).

Результаты термического анализа показали, что для образцов наблюдаются схожие термограммы. На кривых ДТА видна серия трех эндозффектов –  $20...100 \text{ °C}$ ,  $120...250 \text{ °C}$ ,  $320...370 \text{ °C}$  и одного экзозффекта –  $430...520 \text{ °C}$  (рис. 5). Интервал до  $100 \text{ °C}$  отвечает низкотемпературной дегидратации, т. е. потере воды. Во втором и третьем интервалах наблюдаются плавление и кипение образца с максимальной потерей массы в среднем до 80 %. Экзозффект связан с выгоранием органической составляющей. Термоокислительная деструкция органического вещества завершается при температуре  $530...540 \text{ °C}$ . Наблюдаемые

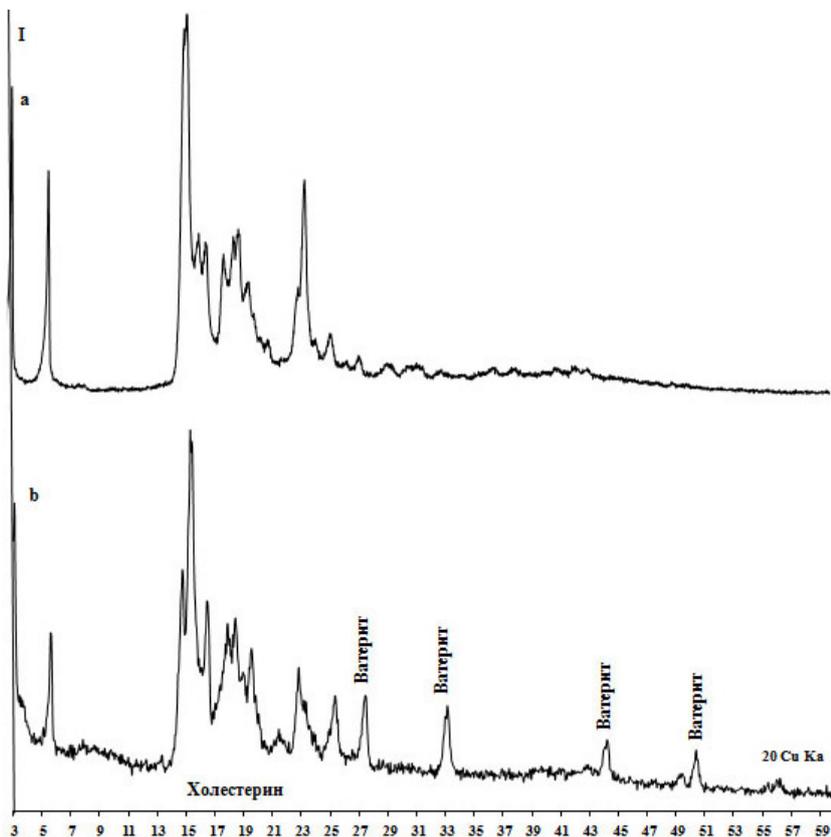


Рисунок 3. Рентгеновские дифрактограммы холестеринных холелитов без минеральной составляющей – обр. 49 (а) и с минеральной составляющей – обр. 53 (b).  
Figure 3. X-ray diffraction patterns of cholesterol gallstones without mineral component – sample 49 (a) and with mineral component – sample 53 (b).

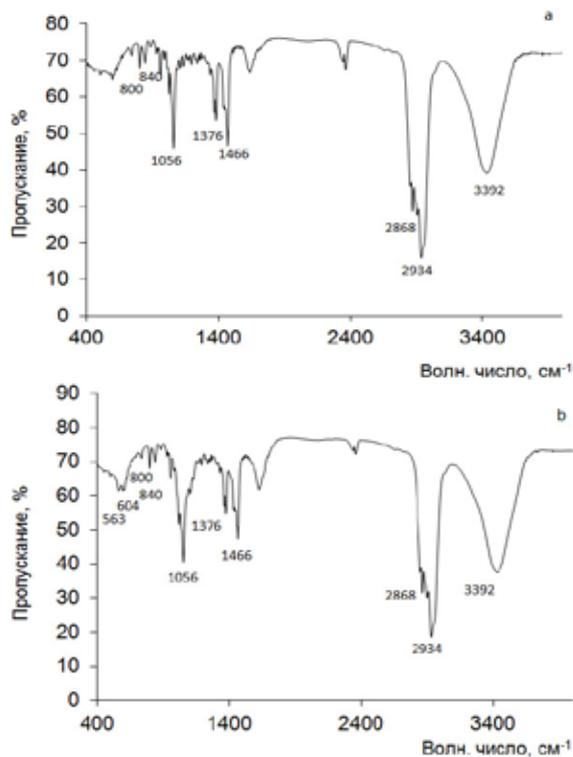


Рисунок 4. ИК-спектры холелитов: а – холестеринный (обр. 49), б – холестеринный с фосфатом кальция (обр. 51).  
Figure 4. IR spectra of gallstones: a – cholesterol (sample 49), b – cholesterol with calcium phosphate (sample 51).

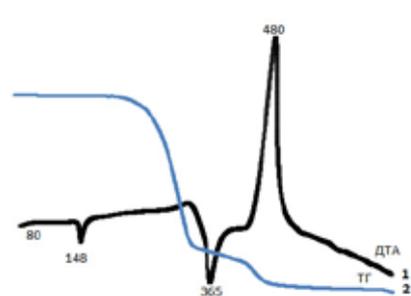


Рисунок 5. Данные термографического анализа холестеринного камня (обр. 49): 1 – нагревание (t, °C), 2 – потеря веса.  
Figure 5. The thermogravimetric analysis data of cholesterol stone (sample 49): 1 – heating (t, °C), 2 – weight loss.

С помощью сканирующего электронного микроскопа и методом микрозондового анализа подробно исследованы морфология и состав образцов, содержащих минеральную компоненту. Изучение образцов, содержащих карбонатную группу, показало, что арагонит и кальцит наблюдаются в виде корки на кристаллическом холестерине (рис. 2, а–с). Состав минералов подтверждается послойным исследованием образцов рентгеноструктурным анализом. Установлено, что распределение ватерита в объеме холелитов – ближе к средним и периферийным частям образцов. Наблюдается неравномерное распределение минерала в объеме холестеринных холелитов. В отдельных участках он образует скопления в виде присыпки (рис. 2, d). Для ватерита характерна округлая форма с шероховатой поверхностью (рис. 2, e). В его составе

ступени потери массы образцов и температурные интервалы характерны для процесса термодеструкции холестерина. В ходе нагрева степень выгорания образцов составила в среднем 90 %.

В результате проведенного химического анализа установлено, что содержания углерода и водорода для холестеринных камней составляют 80–83 % и 11–12 % соответственно. Атомное соотношение Н/С колеблется в пределах 1.65–1.8.

Исследования структурно-текстурных особенностей холелитов показали, что они представлены радиально-поликристаллическими агрегатами трех типов. В холелитах первого типа холестерин на сколе и в шлифах имеет пластинчатые кристаллы (рис. 1, а–d). Во втором типе образцов холестерин образует дендритную структуру, представляющую собой отходящие радиально удлиненные оси, от которых идут короткие ветви (рис. 1, е–h). В третьем типе игольчатые кристаллы холестерина образуют сферолиты (рис. 1, j–m). В отдельный тип можно выделить образцы, имеющие зональное строение с минеральной составляющей в центре (рис. 2, f).

обнаружены примеси Mg (0.72–1.54 мас. %), присутствие которого, вероятно, обуславливает небольшие отклонения параметров элементарной ячейки, установленных нами рентгеноструктурным анализом.

Установлено, что фосфатные частицы локализованы в центральной части холелитов в виде образований глобулярной формы размером до 10 мкм (рис. 2, f). Микрозондовым анализом в частицах фосфата кальция определены примеси Mg (0.68–0.93 мас. %). Атомное соотношение Ca/P не соответствует стандартному значению гидроксилатапата (1.67) и составляет 1.63–1.54. Отклонения от стандартного значения обусловлены, по-видимому, замещением  $\text{Ca}^{2+}$  на  $\text{Mg}^{2+}$ . Тем самым фосфат кальция в холелитах является Ca-дефицитным нестехиометрическим гидроксилатапатом. В структуре фосфатсодержащих холестериновых холелитов выявлена различная микрофлора, которую по характерным размерам и морфологическим признакам можно отнести к грибковой микрофлоре, а также яйцам гельминтов (рис. 2, g–j). Грибковая микрофлора была представлена в виде нитевидных гифов и округлых форм, которые можно интерпретировать как дрожжевые клетки. Для яиц гельминтов характерным является присутствие крышечки в виде бороздки, опоясывающей один из полюсов яйца. В образцах наблюдались как закрытые, так и открытые крышечки.

В холестериновых камнях микрозондовым анализом установлены микровключения минерального состава, аналоги природным: галит ( $\text{NaCl}$ ), барит ( $\text{BaSO}_4$ ), альбит ( $\text{Na[AlSi}_3\text{O}_8]$ ), сильвин ( $\text{KCl}$ ), доломит ( $\text{CaMg}_2$ ), гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Помимо микроминеральных включений в образцах были зафиксированы различные включения, по-видимому, представляющие собой металлорганические комплексы: Fe-Zn-Si-Mn-Ti-Cu; Fe-Mn; Ti-Si-Mg-Ca-Pb-Cr; Ti-Pb-Si-Mg-Cr-Ca-Al; Fe-Ca-Si-Al-Zn-Ti; Pb-Ti-Cr-Ca-Mg-Si; Ti-Si-Ca-Mg-Al; Si-Mg-Ti-Ca-Al; Si-Ti-Ca-Mg-Zn-Al; Ca-Si-Al-Fe-Sr-Mg; Ca-Fe-Al-Si-Mg-Mn; Cu-Fe-Zn-Cr-Ni-Pb-Mn-Ca.

В ходе настоящего исследования подтверждено, что холестерин является основным слагающим структурным элементом кристаллических холелитов. По морфологии изученные холестериновые холелиты имеют сходства с природными образованиями – сферолитами, оолитами, дендритами, шестоватыми агрегатами. Схожесть с природными образованиями позволяет предполагать сходный механизм роста холестериновых кристаллических холелитов.

**Механизм роста агрегатов с пластинчатым обликом кристаллов.** Рост холелитов с пластинчато-радиальным строением можно сравнить с ростом шестоватых агрегатов по закону геометрического отбора (рис. 6, а). Согласно данному закону, сначала образуются одиночные кристаллы, разрастаясь, они соприкасаются друг с другом, и далее путем геометрического отбора продолжают расти только те кристаллы, рост которых ориентирован в сторону свободного пространства, или расположенные в наиболее выгодном положении. Таким способом в природе растут, например, кварц ( $\text{SiO}_2$ ), кальцит ( $\text{CaCO}_3$ ), барит ( $\text{BaSO}_4$ ), вивианит ( $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ) и многие другие. Можно полагать, что процесс формирования агрегатов

с пластинчатыми кристаллами и сростками холестерина начинается с зарождения кристаллических зародышей. Зародившиеся кристаллы растут согласно общим законам, т. е. в результате присоединения к растущей поверхности холестериновых частиц, поступающих к ней благодаря наличию диффузионного пограничного слоя. В области диффузионного слоя раствор всегда несколько пересыщен. В процессе роста кристаллов между ними возникает тесное взаимодействие и происходит геометрический отбор, вследствие которого разрастаются кристаллы, расположенные радиально относительно центра холелитов. Тем самым холелиты растут по закону геометрического отбора, в результате развития индивидов и их коллективизации в одном агрегате.

**Механизм формирования дендритов.** Дендриты представляют собой достаточно сложные образования, значительно отличающиеся от геометрически идеализированной формы кристаллов, у которых вещество заполняет не все пространство. Формирование дендритов известно для природных неорганических минералов окислов марганца (например, пиролюзит –  $\text{MnO}_2$ ), самородного серебра, а также самородной серы, имеющей биогенное происхождение. Например, дендрит самородного серебра представляет собой основной монокристаллический ствол, от которого закономерно отходят ветви. Каждая такая ветвь рассматривается как часть индивида-дендрита, поскольку дендрит любой сложности описывается как единое целое (рис. 6, б) [20]. Отмечается, что образование дендритов осуществляется в вязкой среде, в сильно пересыщенных средах при условиях затрудненного массопереноса и неравномерной диффузии вещества к кристаллу. В целом рост дендритных кристаллов происходит по механизму диффузионно-лимитированной агрегации [21, 22]. Тем самым можно предположить, что образование дендритов холестерина происходило в неравновесных условиях, в результате диффузионно-лимитированного роста.

**Механизм образования оолитов.** Оолиты образуются в тех случаях, когда вещество кристаллизуется из раствора на какой-нибудь затравке, наслаиваясь вокруг него. Ярким примером оолитов является жемчуг [23] (рис. 6, в). Согласно проведенным исследованиям, центрами зарождения в хо-

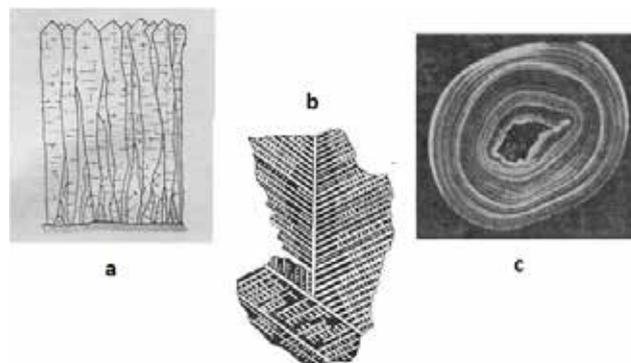


Рисунок 6. Схема группового роста кристаллов (геометрический отбор) [21] (а); дендрит самородного серебра [20] (б); оолит жемчуга, образованный наслаиваниями вокруг зерен кварца [23] (в).  
Figure 6. Scheme of crystals' group growth (geometric selection) [21] (a); dendrite of native silver [20] (b); pearl oolite, formed by layers around quartz grains [23] (c).

лелитах зонального строения являются фосфаты кальция, они и становятся затравкой для наслоения холестерина. Источником фосфата кальция могут послужить фосфолипиды при участии микрофлоры. Например, использование фосфолипидов в качестве источника углерода и энергии микрофлорой способствует высвобождению фосфатной группы, которая, вступая в реакцию с кальцием, образует фосфат кальция. В ходе настоящего исследования в фосфатсодержащих холестериновых холелитах выявлена различная микрофлора (рис. 2).

**Механизм развития сферолитов.** Образование сферолитов очень широко распространено среди органических веществ – от самых простых и часто встречающихся в природе жирных кислот – пальмитиновой ( $C_{16}H_{32}O_2$ ) и стеариновой ( $C_{18}H_{36}O_2$ ) – до более сложных, имеющих циклическое строение желчных кислот ( $C_{24}H_{40}O_4$ ) [24–26] (рис. 7, а–с). Кроме того, сферолиты известны среди неорганических минералов, например гипса ( $CaSO_4 \cdot H_2O$ ) и целестина ( $Sr[SO_4]$ ) [27] (рис. 7, d). Перечисленные органические и неорганические кристаллические образования формировались путем последовательного расщепления и объединения субиндивидов в структуру сферолита. Приставка *-суб-* подчеркивает генетическую связь с родительским кристаллом, от которого они отделились. Факторы, способствующие расщеплению на субиндивиды, могут быть самые разные. Согласно современным представлениям [28], каким бы ни был источник, в любом случае для процесса расщепления необходимы концентраторы напряжений в кристаллах, и образование сферолитов есть следствие деформаций в приповерхностных участках растущих кристаллов, как неорганических, так и органических. Данное заключение подтверждается, в том числе, и результатами экспериментов, на примере солей лимонной кислоты ( $C_6H_8O_7$ ) (рис. 7, d). Таким образом, предполагается, что механизм образования сферолитов холестерина обуслов-

лен расщеплением растущей поверхности на множество субиндивидов, каждый из которых становится самостоятельным ростовым центром и дает начало новому субиндивиду. Разрастаясь, субиндивиды заполняют постоянно расширяющееся пространство в растущих сферолитах с увеличивающимся диаметром. В итоге расщепленные кристаллы имеют единую лучистую, или веероподобную, форму в виде сферолита.

**Включения в холелитах.** Как известно, кристаллы практически всегда содержат то или иное количество включений. Во время роста кристалл взаимодействует не только с питающим раствором, но также с оседающими на его грани механическими частицами. Поэтому присутствие мельчайших кристаллов минералов в холелитах связано с их захватом растущими кристаллами холестерина из кристаллообразующего раствора. Отложение карбоната кальция происходит на последних этапах формирования холелитов. Можно полагать, что желчь в определенные моменты была пересыщена по карбонату кальция и имела более щелочную среду.

Учитывая характеристики холестерина: морфологические особенности кристаллов, элементный состав (С, Н, О/ $C_{27}H_{46}O$ ), поведение при нагревании (плавление в низкотемпературной области), структуру углеводородного скелета, можно отметить его сходства с кристаллическими смолами. Это свидетельствует о том, что между биологическими углеводородными веществами, образуемыми в организме человека, и природными органическими твердыми углеводородами растительного происхождения отмечаются аналогии.

## Заключение

В ходе настоящего исследования показано, что кристаллический холестерин является основным слагающим

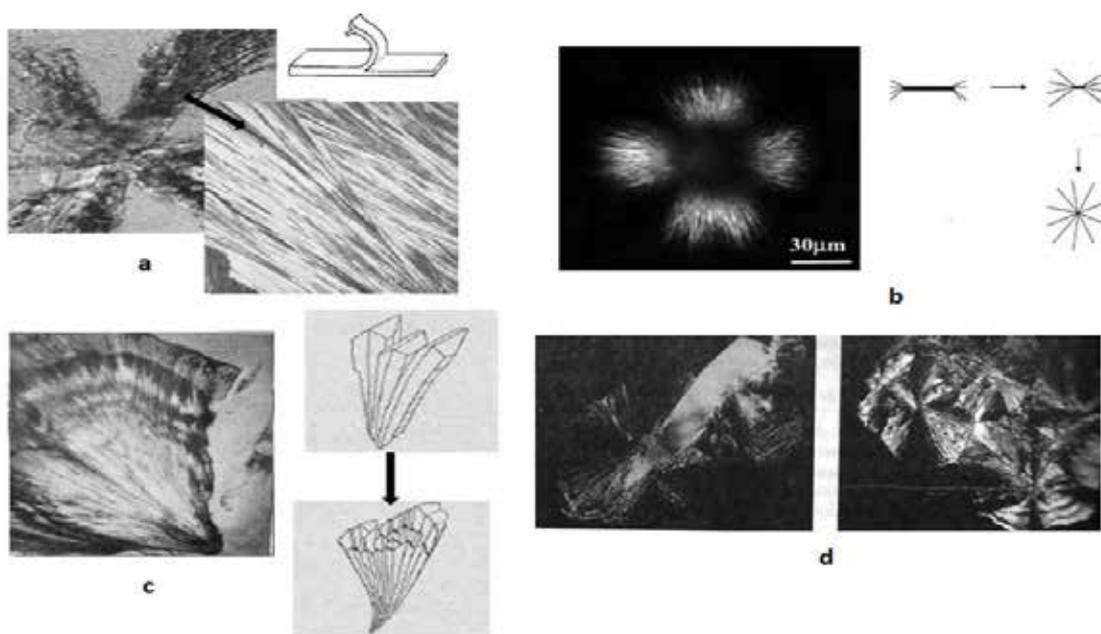


Рисунок 7. Сферолиты и механизмы их образования: а – стеариновая кислота [24, 25]; б – литохоловая кислота [26]; с – целестин [27]; d – лимонная кислота [28].

Figure 7. Spherulites and mechanisms of their formation: a – stearic acid [24, 25]; b – lithocholic acid [26]; c – celestine [27]; d – citric acid [28].

веществом холелитов. В качестве включений установлены минералы классов карбонатов, оксидов, хлоридов, сульфатов, силикатов и фосфатов.

Структурные особенности и физико-химические характеристики (элементный состав, поведение при нагревании) позволяют считать высокоуглеродистые образования холестерина аналогами природным кристаллическим смолам.

Исследования показали, что по морфологии можно выделить четыре типа холестеринových холелитов: сферолиты, оолиты, дендриты и шестоватые агрегаты. Схожесть с природными образованиями органического и неорганического происхождения позволяет предполагать сходный механизм роста кристаллических холелитов. Механизм образования сферолитов холестерина осуществляется в результате последовательного расщепления и объединения кристаллических субиндивидов. Оолиты образуются путем наслоения холестерина вокруг затравки, в качестве которой выступает минеральная составляющая. Рост шестоватых агрегатов с пластинчатым обликом кристаллов холестерина происходит согласно принципу геометрического отбора. Образование дендритной структуры холестерина является результатом диффузионно-лимитированного роста.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Ильченко, А. А. Желчекаменная болезнь / А. А. Ильченко. – Москва : Анахарасис, 2004. – 200 с.
2. Shaffer, E. A. Epidemiology and risk factors for gallstone disease : has the paradigm changed in the 21st century? // *Curr. Gastroenterol Rep.* – 2005. – Vol. 7. – № 2. – P. 132–40.
3. Mendez-Sanchez, N. Strong association between gallstones and cardiovascular disease / N. Mendez-Sanchez, J. Bahena-Aponte, N. Chavez-Tapia, D. Motola-Kuba, K. Sanchez-Lara [et al.] // *Am. J. Gastroenterol.* – 2005. – Vol. 100. – № 4. – P. 827–830.
4. Schafmayer, C. Predictors of gallstone composition in 1025 symptomatic gallstones from Northern Germany / C. Schafmayer, J. Hartleb, J. Tepel, S. Albers, S. Freitag. [et al.] // *BMC Gastroenterol.* – 2006. – № 6. – P. 1–9.
5. Grunhage, F. Pathogenesis of gallstones : a genetic perspective / F. Grunhage, F. Lammert // *Best Pract. Res. Clin. Gastroenterol.* – 2006. – Vol. 20. – № 6. – P. 997–1015.
6. Katsika, D. Body mass index, alcohol, tobacco and symptomatic gallstone disease : a Swedish twin study / D. Katsika, C. Tuvblad, C. Einarsson, P. Lichtenstein, H. U. Marschall // *J Intern Med* 2007. – Vol. 262. – P. 581–587.
7. Chowdhury, A. H. Gallstones / A. H. Chowdhury, D. N. Lobo // *Surgery (Oxford)*. – 2011. – Vol. 29. – P. 610–617.
8. Stinton, L. M. Epidemiology of gallbladder disease : gallstone disease and cancer / L. M. Stinton, E. A. Shaffer // *Gut Liver*. – 2012. – Vol. 6. – № 2. – P. 172–187.
9. Свиштунов, А. А. Желчнокаменная болезнь как клинический маркер метаболического синдрома / А. А. Свиштунов, М. А. Осадчук, Н. В. Киреева, А. М. Осадчук // *Ожирение и метаболизм*. – 2018. – № 15. – С. 3–8.
10. Аристов М. Р. Генетические факторы и аномалии строения желчного пузыря как предпосылки развития желчнокаменной болезни / М. Р. Аристов // *Вестник Челябинского государственного университета. Образование и здравоохранение*. – 2021. – № 4. – С. 38–40.
11. Toscano, R. TG and DSC investigation of gallstone samples collected from patients submitted to cholecystectomy / R. Toscano, D. Melo, M. Moura, R. Farias // *Thermochimica Acta*. – 2004. – Vol. 410. – P. 125–131.
12. Channa, N. A. Analysis of human gallstones by Fourier Transform Infrared (FTIR) / N. A. Channa, F. D. Khand, T. U. Khand, M. H. Leghari, A. N. Memon // *Pakistan Journal of Medical Sciences*. – 2007. – Vol. 23. – № 4. – P. 546–550.
13. Weerakoon, H. Chemical characterization of gallstones: an approach to explore the aetiopathogenesis of gallstone disease in Sri Lanka / H. Weerakoon, A. Navaratne, S. Ranasinghe, R. Sivakanesan, K. Galketiya [et al.] // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10. – № 4. – P. 1–12.
14. Shar, A. Estimation of stones in gallbladder with FT-IR / A. Shar, G. Soomro, G. Shar, M. Korai // *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. – 2020. – Vol. 17. – № 1. – P. 109–114.
15. Орлов, Н. А. Минералогия каустобиолитов / Н. А. Орлов, В. А. Успенский. – Москва–Ленинград : АН СССР, 1936. – 198 с.
16. Franzini, L. Re-discovery and re-definition of dinite, C<sub>20</sub>H<sub>36</sub>, a forgotten organic mineral from Garfagnana, northern Tuscany, Italy / L. Franzini, M. Pasero, N. Perchiuzzi // *European Journal of Mineralogy*. – 1991. – Vol. 3. – P. 855–861.
17. Mace, H. A. The crystal structure of fichtelite, a naturally occurring hydrocarbon / H. A. Mace, R. C. Peterson // *The Canadian Mineralogist*. – 1995. – Vol. 33. – P. 7–11.
18. Bouska, V. Hartite from Bilina / V. Bouska, I. Cisarova, R. Skala, Z. Dvorak, J. Zelinka [et al.] // *American Mineralogist*. – 1998. – Vol. 83. – P. 1340–1346.
19. Юшкин, Н. П. Биоминеральные взаимодействия / Н. П. Юшкин. – Москва : Наука, 2002. – 60 с.
20. Юшкин, Н. П. Теория и методы минералогии / Н. П. Юшкин. – Ленинград : Наука, 1977. – 291 с.
21. Григорьев, Д. П. Онтогенез минералов / Д. П. Григорьев. – Львов, 1961. – 281 с.
22. Ракин, В. И. Пространственные неоднородности в кристаллообразующей системе / В. И. Ракин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2003. – 370 с.
23. Кораго, А. А. Речной жемчуг / А. А. Кораго. – Ленинград : Недра, 1981. – 119 с.
24. Prasad, P. B. Crystal growth of fatty acids from melt : CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>14</sub>COOH and CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COOH / P. B. Prasad // *Crystal. Res. Technol.* – 1984. – Vol. 12. – P. 1549–1552.
25. Prasad, P. B. Characteristics of spherulitic growth : Palmitic acid / P. B. Prasad // *Crystal. Res. Technol.* – 1987. – Vol. 4. – P. 78–80.
26. Tamhan, K. Assembly and disassembly of tubular spherulites / K. Tamhan, X. Zhang, J. Zou, J. Fang // *Soft Matter*. – 2010. – Vol. 6. – P. 1224–1228.

27. Юшкин, Н. П. Минералогия и парагенезис самородной серы в экзогенных месторождениях / Н. П. Юшкин. – Ленинград : Наука, 1968. – 187 с.
28. Пунин, Ю. О. Автodeформационные дефекты кристаллов / Ю. О. Пунин, А. Г. Штукенберг. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2008. – 318 с.

## References

1. Ilchenko, A. A. Zhelchekamennaya bolezn [Gallstone disease] / A. A. Ilchenko – Moscow : Anaharasis, 2004. – 200 p.
2. Shaffer, E. A. Epidemiology and risk factors for gallstone disease : has the paradigm changed in the 21st century? // *Curr. Gastroenterol Rep.* – 2005. – Vol. 7. – № 2. – P. 132–40.
3. Mendez-Sanchez, N. Strong association between gallstones and cardiovascular disease / N. Mendez-Sanchez, J. Bahena-Aponte, N. Chavez-Tapia, D. Motola-Kuba, K. Sanchez-Lara [et al.] // *Am. J. Gastroenterol.* – 2005. – Vol. 100. – № 4. – P. 827–830.
4. Schafmayer, C. Predictors of gallstone composition in 1025 symptomatic gallstones from Northern Germany / C. Schafmayer, J. Hartleb, J. Tepel, S. Albers, S. Freitag. [et al.] // *BMC Gastroenterol.* – 2006. – № 6. – P. 1–9.
5. Grunhage, F. Pathogenesis of gallstones : a genetic perspective / F. Grunhage, F. Lammert // *Best Pract. Res. Clin. Gastroenter.* – 2006. – Vol. 20. – № 6. – P. 997–1015.
6. Katsika, D. Body mass index, alcohol, tobacco and symptomatic gallstone disease : a Swedish twin study / D. Katsika, C. Tuvblad, C. Einarsson, P. Lichtenstein, H. U. Marchall // *J Intern Med* 2007. – Vol. 262. – P. 581–587.
7. Chowdhury, A. H. Gallstones / A. H. Chowdhury, D. N. Lobo // *Surgery (Oxford)*. – 2011. – Vol. 29. – P. 610–617.
8. Stinton, L. M. Epidemiology of gallbladder disease : gallstone disease and cancer / L. M. Stinton, E. A. Shaffer // *Gut Liver*. – 2012. – Vol. 6. – № 2. – P. 172–187.
9. Svistunov, A. A. Zhelchnokamennaya bolezn' kak klinicheskij marker metabolicheskogo sindroma [Gallstone disease as a clinical marker of metabolic syndrome] / A. A. Svistunov, M. A. Osadchuk, N. V. Kireeva, A. M. Osadchuk // *Ozhirenie i metabolism [Obesity and Metabolism]*. – 2018. – № 15. – P. 3–8.
10. Aristov, M. R. Geneticheskie faktory i anomalii stroeniya zhelchnogo puzyrya kak predposylki razvitiya zhelchnokamennoj bolezn [Genetic factors and structural anomalies of the gallbladder as prerequisites for the development of gallstones disease] / M. R. Aristov // *Bulletin of the Chelyabinsk State University. Education and Healthcare*. – 2021. – № 4. – P. 38–40.
11. Toscano, R. TG and DSC investigation of gallstone samples collected from patients submitted to cholecystectomy / R. Toscano, D. Melo, M. Moura, R. Farias // *Thermochemica Acta*. – 2004. – Vol. 410. – P. 125–131.
12. Channa, N. A. Analysis of human gallstones by Fourier Transform Infrared (FTIR) / N. A. Channa, F. D. Khand, T. U. Khand, M. H. Leghari, A. N. Memon // *Pakistan Journal of Medical Sciences*. – 2007. – Vol. 23. – № 4. – P. 546–550.
13. Weerakoon, H. Chemical characterization of gallstones: an approach to explore the aetiopathogenesis of gallstone disease in Sri Lanka / H. Weerakoon, A. Navaratne, S. Ranasinghe, R. Sivakanesan, K. Galketiya [et al.] // *PLoS ONE*. – 2015. – Vol. 10. – № 4. – P. 1–12.
14. Shar, A. Estimation of stones in gallbladder with FT-IR / A. Shar, G. Soomro, G. Shar, M. Korai // *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. – 2020. – Vol. 17. – № 1. – P. 109–114.
15. Orlov, N. A. Mineralogiya kaustobiolitov [Mineralogy of caustobiolites] / N. A. Orlov, V. A. Uspensky. – Moscow, Leningrad : USSR Academy of Sciences, 1936. – 198 p.
16. Franzini, L. Re-discovery and re-definition of dinite, C<sub>20</sub>H<sub>36</sub>, a forgotten organic mineral from Garfagnana, northern Tuscany, Italy / L. Franzini, M. Pasero, N. Perchiazzi // *European Journal of Mineralogy*. – 1991. – Vol. 3. – P. 855–861.
17. Mace, H. A. The crystal structure of fichtelite, a naturally occurring hydrocarbon / H. A. Mace, R. C. Peterson // *The Canadian Mineralogist*. – 1995. – Vol. 33. – P. 7–11.
18. Bouska, V. Hartite from Bilina / V. Bouska, I. Cisarova, R. Skala, Z. Dvorak, J. Zelinka [et al.] // *American Mineralogist*. – 1998. – Vol. 83. – P. 1340–1346.
19. Yushkin N. P. Biomineral'nye vzaimodejstviya [Biomineral interactions] / N.P. Yushkin. – Moskva: Nauka, 2002. 60 p.
20. Yushkin, N. P. Teoriya i metody mineralogii [Theory and methods of mineralogy] / N. P. Yushkin. – Leningrad : Nauka, 1977. – 291 p.
21. Grigoriev, D. P. Ontogeniya mineralov [Ontogeny of minerals] / D. P. Grigoriev. – Lvov, 1961. – 281 p.
22. Rakin, V. I. Prostranstvennye neodnorodnosti v kristallobrazuyushchej sisteme [Spatial inhomogeneities in the crystal-forming system] / V. I. Rakin. – Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. – 370 p.
23. Korago, A. A. Rechnoj zhemchug [Freshwater pearls] / A. A. Korago – Leningrad : Nedra, 1981. – 119 p.
24. Prasad, P. B. Crystal growth of fatty acids from melt : CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>14</sub>COOH and CH<sub>3</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>16</sub>COOH / P. B. Prasad // *Crystal. Res. Technol.* – 1984. – Vol. 12. – P. 1549– 1552.
25. Prasad, P. B. Characteristics of spherulitic growth : Palmitic acid / P. B. Prasad // *Crystal. Res. Technol.* – 1987. – Vol. 4. – P. 78– 80.
26. Tamhan, K. Assembly and disassembly of tubular spherulites / K. Tamhan, X. Zhang, J. Zou, J. Fang // *Soft Matter*. – 2010. – Vol. 6. – P. 1224–1228.
27. Yushkin, N. P. Mineralogiya i paragenезis samorodnoj sery v ekzogennyh mestorozhdeniyah [Mineralogy and paragenesis of native sulfur in exogenous deposits] / N. P. Yushkin. – Leningrad : Nauka, 1968. – 187 p.
28. Punin, Yu. O. Avtodeformacionnye defekty kristallov [Autodeformation defects in crystals] / Yu. O. Punin, A. G. Shtukenberg. – Saint-Petersburg: Saint-Petersburg University Publishing House, 2008. – 318 p.

### **Благодарность (госзадание)**

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

Автор выражает благодарность сотрудникам Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук: Б. А. Макееву (рентгенофазный анализ); Е. М. Тропникову (термический анализ); Е. М. Тропникову, В. Н. Филиппову (исследование с помощью аналитического сканирующего электронного микроскопа); М. Ф. Самотолковой (ИК-спектроскопия поглощения); Н. Сорвачевой (изготовление шлифов).

### **Acknowledgements (state task)**

The work was carried out within the frames of the research project of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (GR № 122040600009-2).

The author expresses his gratitude to the staff of the Institute of Geology KSC UB RAS: B. A. Makeev (X-ray diffraction analysis); E. M. Tropnikov (thermal analysis); E. M. Tropnikov, V. N. Filippov (analyzed with analytical scanning electron microscope); M. F. Samotolkova (infrared absorption spectroscopy); N. Sorvacheva (preparation of slides).

### **Информация об авторе:**

**Машина Екатерина Валерьевна** – аспирант, научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: mashina@geo.komisc.ru).

### **About the author:**

**Ekaterina V. Mashina** – Postgraduate Student, Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin Komi SC UB RAS (Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; mashina@geo.komisc.ru).

### **Для цитирования:**

Машина, Е. В. Характеристика холелитов кристаллического строения / Е. В. Машина // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 136–144.

### **For citation:**

Mashina, E. V. Harakteristika holelitov kristallicheskogo stroeniya [Characteristics of gallstones with crystal structure] / E. V. Mashina // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 136–144.

Дата поступления рукописи: 28.03.2024

Прошла рецензирование: 09.04.2024

Принято решение о публикации: 17.05.2024

Received: 28.03.2024

Reviewed: 09.04.2024

Accepted: 17.05.2024

## Памяти Н. И. Тимонина, посвятившего свою жизнь геологии

Н. Н. Тимонина, Н. Н. Рябинкина

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина  
Коми научного центра Уральского отделения  
Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
nntimonina@geo.komisc.ru

### Аннотация

Статья посвящена анализу организационной и научной деятельности доктора геолого-минералогических наук Н. И. Тимонина, известного ученого в области геотектоники и геологии горючих полезных ископаемых, внесшего весомый вклад в изучение геологического строения Печорской плиты. Несмотря на довольно длительную историю геологических исследований в Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции, по-прежнему остается много нерешенных задач, касающихся геологического строения территории, перспектив нефтегазоносности, развития минерально-сырьевой базы. Исследования продолжаются, и преемственность знаний имеет чрезвычайно большое значение, является важным фактором их объективности и основой дальнейших открытий.

В ходе подготовки статьи проведен анализ опубликованных и фондовых работ Н. И. Тимонина, посвятившего 50 лет своей жизни изучению геологии Печорской плиты, Тимана, Урала, Пай-Хоя, Вайгача и островов Новой Земли.

### Ключевые слова:

тектоника, структуры платформенного чехла, седиментационный бассейн, углеводороды, нефтегазоносный комплекс

Второго января 2024 г. исполнилось бы 90 лет главному научному сотруднику Института геологии Коми НЦ УрО РАН, заслуженному деятелю науки Республики Коми, доктору геолого-минералогических наук Николаю Иосифовичу Тимонину (фото 1). Область научных интересов ученого – региональная геология, геотектоника, геодинамика, геология нефти и газа. В течение 50 лет он трудился в Институте геологии, Президиуме Коми филиала АН СССР, из них 25 лет проводил полевые экспедиционные работы на Тимане, в Северном Приуралье, на Полярном и Приполярном Урале, Пай-Хое, Вайгаче и островах Новой Земли.

Н. И. Тимонин (2 января 1934 г. – 19 июня 2016 г.) родился в дер. Поруб Прилузского района Коми края, в 1957 г. окончил геологоразведочный факультет Свердловского горного института имени В. В. Вахрушева (ныне – Уральский государственный горный университет). Работал в геологоразведочных организациях Южноуральского и Оренбургского геологических управлений, где участвовал в разведке угольных и медных месторождений (фото 2).

## To the memory of N. I. Timonin who devoted his life to geology

N. N. Timonina, N. N. Ryabinkina

Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin,  
Komi Science Centre of the Ural Branch  
of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar  
nntimonina@geo.komisc.ru

### Abstract

The article is devoted to the analysis of the organizational and scientific activities of N. I. Timonin, Doctor of Geology and Mineralogy, a famous scientist in the field of geotectonics and geology of combustible minerals who made a significant contribution to the study of the geological structure of the Pechora Plate. In spite of the fact that the geological research in the Timan-Pechora oil and gas province has a rather long history, there are still many unsolved questions regarding the geological structure of the territory, oil and gas prospects, development of the mineral resource base. The research is going on, and the continuity of knowledge is an extremely important factor for its fairness and the basis for further discoveries.

During the preparation of the article, we have analyzed the published and archive works of N. I. Timonin who devoted 50 years of his life to the geological studies of the Pechora Plate, Timan, the Urals, Pay-Khoy, and the islands of Vaygach and Novaya Zemlya.

### Keywords:

tectonics, structures of the platform cover, sedimentation basin, hydrocarbons, oil and gas complex

В 1961 г. Н. И. Тимонин с семьей переехал в г. Сыктывкар и поступил на работу в Институт геологии Коми филиала АН СССР на должность старшего лаборанта, затем стал младшим научным сотрудником, старшим научным сотрудником, ученым секретарем Института, ведущим и главным научным сотрудником (фото 3). Заочно окончил аспирантуру. С 1983 по 1996 г. работал заместителем председателя Президиума Коми филиала АН СССР (ныне – ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

В начале 1960-х гг. Н. И. Тимонин совместно с В. А. Разницыным приступил к изучению тектоники Среднего Тимана в связи с перспективами нефтегазоносности, полевые исследования проводились в районе Четласского камня и Цилемской гряды. В результате были построены разрезы палеозойских и допалеозойских отложений и составлена тектоническая схема Среднего Тимана. С 1965 г. началось изучение тектоники гряды Чернышева в бассейнах рек Большая Сыня, Косью и Вангыр. Работа осуществлялась в рамках темы «Формирование структур Тимано-Печор-



Фото 1. Николай Иосифович и Римма Гавриловна Тимонины, г. Сыктывкар. 1980 г.  
Photo 1. Nikolay I. Timonin and his wife Rimma. Syktyvkar. 1980.



Фото 2. Н. И. Тимонин. Медногорская ПРП. 1960 г.  
Photo 2. Nikolay I. Timonin. Mednogorskaya expedition. 1960.

ской нефтегазоносной провинции в зависимости от структур фундамента и структур Урала». Дальнейшие исследования проходили на поднятии Чернова, было установлено, что в зоне сочленения поднятия с западным склоном Урала линейные вытянутые в северо-восточном направлении структуры характеризуются сложным тектоническим



Фото 3. Слева направо: Б. А. Голдин, Н. П. Юшкин, Л. А. Юшкина, Р. Г. Тимонина, Н. И. Тимонин, г. Сыктывкар. 1968 г.  
Photo 3. From left to right: Boris A. Goldin, Nikolay P. Yushkin, Lidia A. Yushkina, Rimma G. Timonina, Nikolay I. Timonin. Syktyvkar. 1968.

строением. В 1968 г. для концентрации работ по изучению проблем нефтегазоносности в Институте геологии была создана лаборатория региональной геологии и тектоники под руководством А. И. Елисеева, одной из задач которой стало изучение особенностей формирования геологических структур – зон нефтегазоаккумуляции.

В результате изучения палеотектонической обстановки Большеземельской тундры в палеозое и мезозое Н. И. Тимониным было установлено, что в формировании структурного плана территории значительную роль сыграло наложение разноплановых деформаций: северо-западной ориентировки, унаследованной от структурного плана доуралид, и субмеридионального северо-восточного направления, обусловленного тектоническими процессами [1–3]. Впервые ученым была построена серия карт размещения формаций для отдельных этапов развития этого региона. В платформенном чехле рассматриваемой территории обособляются три крупных структурно-формационных комплекса: ордовикско-каменноугольный, отвечающий доорогенному этапу развития Уральской палеозойской геосинклинали; пермско-триасовый, отвечающий орогенному этапу ее развития; мезозойско-кайнозойский, характеризующий посторогенный этап развития территории.

Большой вклад внесен Н. И. Тимониным в изучение геологического строения гряды Чернышева. По его мнению, гряда Чернышева сформировалась на платформе в зоне разлома глубокого заложения. Однако по характеру дислокаций она близка к линейно-складчатым структурам западного склона Уральской складчатой области, с которыми гряда непосредственно связана на крайнем юге. В северной, наиболее значительной части она отделена от структур западного склона Урала пологими структурами обширной Косью-Роговской ванны Предуралья краевого прогиба. В 1971 г. Н. И. Тимонин в Геологическом институте АН СССР защитил кандидатскую диссертацию на тему «Тектоника гряды Чернышева» [4].

До настоящего времени гряда Чернышева остается территорией со слабой степенью геологической изученности, несмотря на то, что она является тектоническим элементом первого порядка площадью 9 тыс. кв. км. За годы,

прошедшие с тех пор, пробурены скважины, проведены геофизические исследования, но геологическое строение гряды остается в центре внимания геологов. Менялись взгляды на строение гряды: В. В. Юдин предложил механизм послонного срыва осадочного чехла по серии структурных уровней. Позже на основе изучения сейсмических профилей К. О. Соборнов предложил «вдвиговую» модель. Это связано с появлением новых концепций в тектонике, позволивших иначе взглянуть на геологическую историю гряды, опираясь на новые данные, полученные в результате сейсморазведочных работ и глубокого бурения. В настоящее время гряда Чернышева – это один из перспективных объектов для поиска залежей углеводородов, что доказано результатами бурения на Воргамусюрской, Адакской и Харутамыльской площадях.

С целью изучения структурных ограничений Тимано-Печорской провинции проводились исследования на Вайгаче и на севере Югорского п-ова. В 1973 г. начались полевые исследования на Новой Земле (фото 4), были получены данные, подтверждающие разновозрастность венд-раннекембрийских толщ с отложениями на Пай-Хое и Полярном Урале. Дальнейшие исследования касались строения Вайгач-Южно-Новоземельского антиклинория, уточнения представлений о тектонике шельфа Печорского моря в связи с нефтегазоносностью [4–6].



Фото 4. Н. И. Тимонин. Новая Земля. 1976 г.  
Photo 4. Nikolay I. Timonin. Novaya Zemlya. 1976.

В 1975 г. в Институте геологии Коми филиала АН СССР был организован отдел геологии горючих ископаемых, в котором началась разработка широкого круга проблем, связанных с геологическим строением и нефтегазоносностью Печорского седиментационного бассейна. К этому времени на территории республики достигнут значительный уровень добычи нефти и газа, на севере образовались новые центры нефте- и газодобычи, завершено сооружение трубопроводной системы. Объемы разведочного бурения в начале 1970-х гг. превысили 100 тыс. м, а в 1988 г. достигли максимума – 315 тыс. м. За 15 лет (1961–1975) было пробурено 1675 тыс. пог. м поисково-разведочных скважин и открыто 29 месторождений. Актуальность создания отдела геологии горючих ископаемых в Институте геологии Коми филиала АН СССР была обусловлена тем, что объем новой геологической информации оказался настолько велик, что Тимано-Печорское отделение Всероссийского нефтяного научно-исследовательского геологоразведочного

института и геологическая служба «Ухтанефтегазгеология» едва справлялись с первичной обработкой полученного материала, на какие-либо серьезные научные обобщения и прогнозы не хватало ни времени, ни сил. Целью нового подразделения Института геологии явились сбор, обобщение и фундаментальные исследования в области нефтегазоносности Тимано-Печорской провинции, а также прогноз новых перспективных зон нефтегазоаккумуляции. В отделе были созданы: лаборатория нефтегазоносных формаций и лаборатория тектоники. К концу 1970-х гг. отдел по численности стал одним из наиболее крупных и плодотворно работающих подразделений Института. В лаборатории тектоники до 1983 г. работал Н. И. Тимонин.

В середине 1970-х гг., в связи с организацией отдела геологии горючих ископаемых, в Институте геологии появилось новое направление – анализ тектонических факторов нефтегазоносности осадочных бассейнов европейской части России, главным образом Тимано-Печорского [6–8]. Н. И. Тимонин принимал непосредственное участие в работе над этой темой. Он считал, что при выявлении тектонических критериев нефтегазоносности любого седиментационного бассейна учитываются следующие факторы: природа и тектоническая принадлежность рассматриваемого бассейна; режим эпейрогенических движений, определяющих время жизни бассейна, скорость осадконакопления, глубина погружения, объем и литолого-формационный состав осадочных образований; интенсивность и время проявления дизъюнктивных и пликативных движений, обуславливающих местоположение и масштабы зон нефтегазоаккумуляции, время формирования, переформирования и разрушения залежей углеводородов.

Н. И. Тимонин участвовал в подготовке палеогеологических, палеотектонических и современных структурных карт Печорского седиментационного бассейна, позволивших воссоздать характер его геологической эволюции, изменение структурного облика, оценить время, масштабы и роль структуроформирующих движений в процессе нефтегазообразования и нефтегазоаккумуляции.

В дальнейшем анализ тектонических факторов и распределение залежей углеводородов в платформенном чехле Печорского бассейна показали достаточно устойчивую связь между интенсивностью тектонических движений и типом скоплений углеводородов [8]. Менее дислоцированные, относительно стабильные структурные зоны характеризуются преимущественным распространением нефтяных месторождений, а более дислоцированные, мобильные – смешанным составом скоплений углеводородов. В частности, почти все запасы газа в бассейне сосредоточены в наиболее тектонически мобильных зонах (Предуральском краевом прогибе и Печоро-Колвинском авлакогене).

На основе анализа истории тектонического развития региона и современного структурного плана осадочного чехла Н. И. Тимониным совместно с коллегами (Л. З. Аминовым, В. А. Дедеевым, В. В. Юдиным и др.) было осуществлено нефтегазогеологическое районирование Тимано-Печорской провинции.

В монографическом исследовании «Печорская плита: история геологического развития в фанерозое» приведены результаты многолетних исследований автора, материал был собран во время экспедиций на Тиман, Приполярный и Полярный Урал, Предуральский краевой прогиб, Пай-Хой, Вайгач и острова Новой Земли. На основе построенных палеотектонических и палеогеологических карт выделены и детально охарактеризованы естественные этапы геологической истории Печорской плиты, каждый из которых отличается специфическими наборами формаций. Этапы разделены региональными перерывами в осадконакоплении, вызванными определенными структурными перестройками. Описаны вертикальные и латеральные формационные ряды, характерные для каждого из выделенных этапов [8, 9]. Дан обоснованный прогноз нефтегазоносности Баренцевоморско-Печорского и Карского арктических шельфов.

Результатом экспедиционных работ на Пай-Хое явились коллективные монографии [10–12], вышедшие в свет в 2004 и 2007 гг. соответственно. Авторы подчеркивают, что исследуемая территория уникальна по особенностям геологического строения и развития – здесь компактно расположены все известные на земле формационные и структурные комплексы. В соответствии с этим детально описаны фанерозойские литодинамические комплексы, осадочные и магматические комплексы девонского рифтогенеза, а также магматические формации «горячей точки» и уникальные образования крупных астроблем. На Пай-Хое широко развиты складчато-надвиговые и другие коллизионные структуры: шарьяжи, разнопорядковые послонные и секущие надвиги, принадвиговые складки, чешуи, дизъюнкты и др. Все это позволило выделить регион как отдельный структурный ансамбль, получивший название «пайхоиды». Значительное внимание Н. И. Тимонин уделял проблеме взаимоотношения структур Полярноуральской и Пайхойской складчато-надвиговой областей с целью реконструкции геологической истории данного региона (фото 5).



Фото 5. Граница Полярного Урала и Пай-Хоя (фото Н. И. Тимонина).  
Photo 5. Boundary between the Polar Urals and the Pay-Khoy Range (photo by N. I. Timonin).

В ходе экспедиционных работ на Пай-Хое внимание исследователя привлекли импактные структуры: Карская, Усть-Карская и Марей-Го, расположенные в пределах

Карской впадины. Структуры образовались в результате падения роя космических тел, в свою очередь образовавшихся вследствие разрушения болида [13]. Ученый отмечал, что кратер Карской астроблемы образован в сложноподстилаемых породах палеозоя от ордовика до перми. В результате длительных процессов он преобразовался в пологую Карскую депрессию, открывающуюся к Карскому морю. В строении Карской астроблемы были описаны пять структурно-литологических комплексов, приведена реконструкция траектории космических тел, вызвавших образование кратеров и т. д.

На счету Н. И. Тимонина целый ряд экспедиций, проведенных в Арктической зоне, результатом которых стали работы по геологическому строению и перспективам этой территории. В определенном смысле он предвидел, что в недалеком будущем северные территории неизменно привлекут внимание не только исследователей, но и политиков. На самом деле, в последние годы Арктике уделяется все большее внимание, что обусловлено геополитической стратегией и высоким ресурсным потенциалом данного региона, где выявлены крупные и уникальные месторождения углеводородов, такие как Штокмановское, Ледовое и ряд других [14–17].

Помимо чисто геологических интересов Н. И. Тимонина увлекала история географических исследований русской и советской Арктики. Так, во время одной из экспедиций на южный остров Новой Земли были обнаружены следы пребывания экспедиции В. А. Русанова, пропавшей в 1914 г. [18]. Н. И. Тимонин проводил поиски документов в Государственном архиве Российской Федерации, Российском государственном архиве и др., пытался найти сведения о последней стоянке В. А. Русанова, связывался с экспедицией газеты «Комсомольская правда», чтобы объединить усилия в поисках. По его приглашению в г. Сыктывкар приезжали Д. Шпаро и другие участники экспедиции. Была организована конференция, посвященная исследованиям В. А. Русанова.

В книге И. Н. Тимонина «Новоземельский мемориал» [19] приведена информация о 700 географических пунктах, названных в честь промышленников, рудознатцев, путешественников, мореплавателей, ученых и государственных деятелей. Мемориальная топонимия – своеобразная летопись полярных событий, описывающая величие и силу людей, которых увлекла Арктика.

С 1983 по 1996 г. Н. И. Тимонин занимал должность заместителя председателя Президиума Коми филиала АН СССР. В это время он проводил большую работу по организации научных исследований в Республике Коми, координации геологических исследований в регионе, организации и проведению VII, VIII, IX геологических конференций Республики Коми. Принимал участие в организации международных и всесоюзных конференций и совещаний, среди которых: VI Международный конгресс финно-угроведов, «Проблемы комплексного развития производительных сил южных районов Коми АССР», «Проблемы создания специальных видов керамики на основе природного минерального сырья Республики Коми», «Проблемы комплексного освоения бокситов». Большую организацион-

ную и редакционную работу осуществлял в качестве заместителя главного редактора по подготовке к изданию энциклопедии «Республика Коми».

Н. И. Тимонин организовал разработку и исполнение научных экологических программ «Чистая Печора» (1986), «Охраняемые природные территории Республики Коми» (1996).

Многие проекты ученого сопровождались научными рекомендациями производству, в частности, «Перспективы нефтегазоносности западного склона севера Урала и севера Предуралья Краевого прогиба», «Прогноз нефтегазоносности Тимано-Печорской провинции» и др.

Результаты исследований Н. И. Тимонина отражены в 225 научных работах, в числе которых 10 монографий, написанных лично и в соавторстве: «Атлас литолого-палеогеографических карт палеозоя и мезозоя Северного Приуралья м-ба 1 : 2 500 000» [2], «Тектоника гряды Чернышева» [4], «Структура платформенного чехла Европейского Севера СССР» [6], «Тектонические критерии прогноза нефтегазоносности Печорской плиты» [7], «Новоземельский мемориал» [19], «Печорская плита: история геологического развития в фанерозое» [9], «Структурно-тектоническая карта Печорской плиты м-ба 1 : 1 000 000» [20], «Национальный парк "Югыд ва"» [21], «Палеогеодинамика Пай-Хоя» [11], «Минерагения Пай-Хоя» [12].

Н. И. Тимонин выполнял большую общественную работу, избирался председателем профбюро Института геологии, членом и секретарем партбюро Коми филиала АН СССР, членом Сыктывкарского горкома КПСС нескольких созывов, председателем научно-методического комитета общества «Знание».

С 1996 по 2011 г. Николай Иосифович продолжал работать в Институте геологии. Полученные им научные результаты до сих пор востребованы, специалисты часто обращаются к книгам «Тектоника гряды Чернышева», «Печорская плита» и другим, это служит доказательством реальной значимости его научной деятельности. Скорее всего, со временем модели геологического строения территории изменятся, но результаты исследований Н. И. Тимонина останутся актуальными и важными в теоретическом и практическом отношении, они будут способствовать лучшему пониманию геологии нашего региона еще долгие годы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Трапповые формации Северного Урала и Приуралья / Б. А. Голдин, В. П. Давыдов, В. И. Мизин, Н. И. Тимонин и др. // Проблемы магматизма западного склона Урала. – Свердловск, 1972. – Вып. 95. – С. 130–147.
2. Атлас литолого-палеогеографических карт палеозоя и мезозоя Северного Приуралья м-ба 1 : 2 500 000. – Ленинград : Наука, 1972. 45 карт.
3. Тимонин, Н. И. Тектоническое развитие восточной части Большеземельской тундры в связи с перспективами ее нефтегазоносности / Н. И. Тимонин // Геология и нефтегазоносность Тимано-Печорской провинции. – Сыктывкар, 1975. – С. 99–104.
4. Тимонин, Н. И. Тектоника гряды Чернышева / Н. И. Тимонин. – Ленинград : Наука, 1975. – 130 с.
5. Тимонин, Н. И. Основные черты тектоники и особенности истории геологического развития Южноновоземельско-Вайгачского антиклинория / Н. И. Тимонин // Тектоника и нефтегазоносность Тимано-Печорской провинции и ее структурных обрамлений. – Сыктывкар, 1978. – С. 16–29 (Труды Института геологии Коми филиала АН СССР; вып. 26).
6. Структура платформенного чехла Европейского Севера СССР / коллектив авторов; под ред. В. А. Дедеева. – Ленинград : Наука, 1982. – 200 с.
7. Тектонические критерии прогноза нефтегазоносности Печорской плиты / В. А. Дедеев, Л. З. Аминов, В. Г. Гецен, И. В. Запорожцева, Н. И. Тимонин [и др.]. – Ленинград : Наука, 1986. – 217 с.
8. Тимонин, Н. И. Фанерозойская геодинамика Печорской плиты (доорогенный период) / Н. И. Тимонин. – Сыктывкар, 1997. – 36 с. (Серия препринтов «Научные доклады» / Коми НЦ УрО РАН; вып. 390).
9. Тимонин, Н. И. Печорская плита: история геологического развития в фанерозое / Н. И. Тимонин. – Екатеринбург, 1998. – 240 с.
10. Тимонин, Н. И. Пайхойды – особый комплекс дислокаций земной коры / Н. И. Тимонин, В. В. Юдин // Литосфера. – 2002. – № 2. – С. 34–37.
11. Тимонин, Н. И. Палеогеодинамика Пай-Хоя / Н. И. Тимонин, В. В. Юдин, А. А. Беляев. – Екатеринбург, 2004. – 235 с.
12. Юшкин, Н. П. Минерагения Пай-Хоя / Н. П. Юшкин, А. Ф. Кунц, Н. И. Тимонин. – Екатеринбург : УрО РАН, 2007. – 290 с.
13. Тимонин, Н. И. Импактные кратеры на Пай-Хое / Н. И. Тимонин // Уральский геологический журнал. – 2006. – № 5 (53). – С. 3–20.
14. Тимонин, Н. И. Глубинное строение Баренцево-Карского региона (аспекты геодинамической эволюции литосферы) / Н. И. Тимонин. – Сыктывкар, 2006. – 36 с. (Серия препринтов «Научные доклады» / Коми НЦ УрО РАН; вып. 482).
15. Тимонин, Н. И. Карский шельф: глубинное геологическое строение и перспективы нефтегазоносности / Н. И. Тимонин. – Сыктывкар, 2009. – 86 с. (Серия препринтов «Научные доклады» / Коми НЦ УрО РАН; вып. 506).
16. Тимонин, Н. И. Строение литосферы и нефтегазоносность Баренцево-Карского региона / Н. И. Тимонин // Литосфера. – 2009. – № 2. – С. 41–55.
17. Тимонин, Н. И. Российский сектор Западно-Арктического шельфа: геологическое строение и нефтегазоносность / Н. И. Тимонин. – Сыктывкар, 2011. – 68 с. (Серия препринтов «Научные доклады» / Коми НЦ УрО РАН; вып. 513).
18. Тимонин, Н. И. Новоземельские экспедиции В. А. Русанова (к 100-летию со дня рождения) / Н. И. Тимонин, Н. П. Юшкин // Геология и палеогеография Северо-Вос-

тока европейской части СССР. – Сыктывкар, 1977. – С. 87–104.

19. Тимонин, Н. И. Новоземельский мемориал / Н. И. Тимонин. – Сыктывкар, 1995. – 300 с.
20. Структурно-тектоническая карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. – Москва : Мингео СССР, 1988.
21. Национальный парк «Югыд ва». – Москва : ДИК, 2001. – 208 с.

## References

1. Goldin, B. A. Trappovye formacii Severnogo Urala i Priuralya [Trap formations of the Northern Urals and the Ural Region] / B. A. Goldin, V. P. Davydov, V. I. Mizin, N. I. Timonin [et al.] // Problemy magmatizma zapadnogo sklona Urala [Problems of Magmatism of the Western Slope of the Urals]. – Sverdlovsk, 1972. – Iss. 95. – P. 130–147.
2. Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart paleozoya i mezozoya Severnogo Priuralya m-ba 1 : 2 500 000 [Atlas of lithologic and paleogeographic maps of the Paleozoic and Mesozoic of the Northern Ural Region at scale 1 : 2 500 000]. – Leningrad : Nauka, 1972. 45 maps.
3. Timonin, N. I. Tektonicheskoe razvitie vostochnoj chasti Bolshezemelskoj tundry v svyazi s perspektivami ee neftegazonosnosti [Tectonic development of the eastern part of the Bolshezemelskaya tundra in regard with its oil and gas potential] / N. I. Timonin // Geologiya i neftegazonosnost Timano-Pechorskoj provincii [Geology and Oil and Gas Content of the Timan-Pechora Province]. – Syktyvkar, 1975. – P. 99–104.
4. Timonin, N. I. Tektonika gryady Chernysheva [Tectonics of the Chernyshev Ridge] / N. I. Timonin. – Leningrad : Nauka, 1975. – 130 p.
5. Osnovnye cherty tektoniki i osobennosti istorii geologicheskogo razvitiya Yuzhnonovozemelsko-Vajgachskogo antiklinoriya [The main features of tectonics and the historical overview of geological development of the Yuzhnonovozemelsko-Vaygach anticlinorium] // Tektonika i neftegazonosnost Timano-Pechorskoj provincii i ee strukturnyh obramlenij [Tectonics and oil-and-gas bearing capacity of the Timan-Pechora province and its structural frames]. – Syktyvkar. – 1978. – P. 16–29 (Proceedings of the Institute of Geology of the Komi Branch of the Academy of Sciences of the USSR; Iss. 26).
6. Struktura platformennogo chekhla Evropejskogo Severa SSSR [Structure of the platform cover of the European North of the USSR] / collective of authors; ed. by V. A. Dedeev. – Leningrad : Nauka, 1982. – 200 p.
7. Dedeev, V. A. Tektonicheskie kriterii prognoza neftegazonosnosti Pechorskoj plity [Tectonic criteria of oil and gas content forecasting in the Pechora Plate] / V. A. Dedeev, L. Z. Aminov, V. G. Getsen, I. V. Zaporozhtseva, N. I. Timonin [et al.]. – Leningrad : Nauka, 1986. – 217 p.
8. Timonin, N. I. Fanerozojskaya geodinamika Pechorskoj plity (doorogennyj period) [Phanerozoic geodynamics of the Pechora Plate (pre-orogenic period)] / N. I. Timonin. – Syktyvkar, 1997. – 36 p. (Series of preprints “Scientific reports” / Komi Science Centre of the Ural Branch RAS; Iss. 390).
9. Timonin, N. I. Pechorskaya plita : istoriya geologicheskogo razvitiya v fanerozoe [The Pechora Plate : History of geological development in the Phanerozoic] / N. I. Timonin. – Ekaterinburg, 1998. – 240 p.
10. Timonin, N. I. Pajhoidy – osobyj kompleks dislokacij zemnoj kory [Payhoids – a special complex of dislocations in the Earth's crust] / N. I. Timonin, V. V. Yudin // Litosfera [Lithosphere]. – 2002. – № 2. – P. 34–37.
11. Timonin, N. I. Paleogeodinamika Paj-Hoya [Paleogeodynamics of Pay-Khoy] / N. I. Timonin, V. V. Yudin, A. A. Belyaev. – Ekaterinburg. – 2004. – 235 p.
12. Yushkin, N. P. Minerageniya Paj-Hoya [Minerageny of Pay-Khoy] / N. P. Yushkin, A. F. Kunz, N. I. Timonin. – Ekaterinburg : Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. – 290 p.
13. Timonin, N. I. Impaktnye kratery na Paj-Hoe [Impact craters in Pay-Khoy] / N. I. Timonin // Uralskij geologicheskij zhurnal [Ural Geological Journal]. – 2006. – № 5 (53). – P. 3–20.
14. Timonin, N. I. Glubinnoe stroenie Barencevo-Karskogo regiona (aspekty geodinamicheskoy evolyucii litosfery) [Deep structure of the Barents-Kar Region (aspects of geodynamic evolution of the lithosphere)] / N. I. Timonin. – Syktyvkar, 2006. – 36 p. (Series of preprints “Scientific Reports” / Komi Science Centre of the Ural Branch RAS; Iss. 482).
15. Timonin, N. I. Karskij shelf : glubinnoe geologicheskoe stroenie i perspektivy neftegazonosnosti [Kara shelf : deep geological structure and oil and gas potential] / N. I. Timonin. – Syktyvkar, 2009. – 86 p. (Series of preprints “Scientific Reports” / Komi Science Centre of the Ural Branch RAS; Iss. 506).
16. Timonin, N. I. Stroenie litosfery i neftegazonosnost Barencevo-Karskogo regiona [Lithosphere structure and oil-and-gas bearing capacity of the Barents-Kara Region] / N. I. Timonin // Litosfera [Lithosphere]. – 2009. – № 2. – P. 41–55.
17. Timonin, N. I. Rossijskij sektor Zapadno-Arkticheskogo shelfa : geologicheskoe stroenie i neftegazonosnost [The Russian sector of the West-Arctic shelf : geological structure and oil and gas content] / N. I. Timonin / N. I. Timonin. – Syktyvkar, 2011. – 68 p. (Series of preprints “Scientific Reports” / Komi Science Centre of the Ural Branch RAS; Iss. 513).
18. Timonin, N. I. Novozemelskie ekspedicii V. A. Rusanova (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya) [Expeditions to Novaya Zemlya of V. A. Rusanov (to the 100th anniversary of his birth)] / N. I. Timonin, N. P. Yushkin // Geologiya i paleogeografiya Severo-Vostoka evropejskoj chasti SSSR [Geology and Paleogeography of the North-Eastern part of the European USSR]. – Syktyvkar, 1977. – P. 87–104.
19. Timonin, N. I. Novozemelsky memorial [Memorial of Novaya Zemlya] / N. I. Timonin. – Syktyvkar, 1995. – 300 p.
20. Strukturno-tektonicheskaya karta Timano-Pechorskoj neftegazonosnoi provintsii [Structural-tectonic map of the Timan-Pechora oil-bearing province]. – Moscow : Mingeo SSSR, 1985.
21. Natsionalnyy park «Yugyd va» [Yugyd Va National Park]. – Moscow : DIK, 2001. – 208 p.

#### **Информация об авторах:**

**Тимонина Наталья Николаевна** – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геологии нефтегазоносных бассейнов, ведущий научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: nntimonina@geo.komisc.ru).

**Рябинкина Надежда Николаевна** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории геологии нефтегазоносных бассейнов Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: ryabinkina@geo.komisc.ru).

#### **About the authors:**

**Natalya N. Timonina** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory of Oil and Gas Basins' Geology, Leading Researcher at the Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomayskaya str., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: nntimonina@geo.komisc.ru).

**Nadezhda N. Ryabinkina** – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Associate Professor, Senior Researcher at the Laboratory of Oil and Gas Basins' Geology, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (54 Pervomayskaya str., Syktyvkar, Komi Republic, Russian Federation, 167982; e-mail: ryabinkina@geo.komisc.ru).

#### **Для цитирования:**

Тимонина, Н. Н. Памяти Н. И. Тимонина, посвятившего свою жизнь геологии / Н. Н. Тимонина, Н. Н. Рябинкина // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 145–151.

#### **For citation:**

Timonina, N. N. Pamyati N. I. Timonina, posvyativshego svoyu zhizn geologii [To the memory of N. I. Timonin who devoted his life to geology] / N. N. Timonina // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2024. – № 3 (69). – P. 145–151.

## Памяти географа-палинолога Евгении Сергеевны Малясовой (к 100-летию со дня рождения)\*

В. И. Силин

Институт языка, литературы и истории Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук,  
г. Сыктывкар  
silinv@rambler.ru

### Аннотация

Статья посвящена 100-летию высококлассного палинолога, учителя многих географов, выпускников географического факультета Ленинградского государственного университета, Евгении Сергеевны Малясовой (1923–2020). Ученица И. М. Покровской, основательницы палинологической лаборатории при географическом факультете ЛГУ, Е. С. Малясова более 20 лет возглавляла палинологическую лабораторию, читала лекции на кафедре геоморфологии ЛГУ, проводила активные научные исследования по палинологии Арктических территорий и отложений Белого и Баренцева морей. Воспитала десятки географов Ленинградского государственного университета. В статье приводятся подробности ее жизни и научной деятельности.

### Ключевые слова:

палинология, Е. С. Малясова, СПбГУ, Белое море, Баренцево море, Новая Земля, квартал

14 сентября 1923 г. родился прекрасный человек, воин, великолепный палинолог-четвертичник Евгения Сергеевна Малясова. Она прожила долгую и сложную жизнь. Как типичный представитель своего поколения защищала Родину во время Великой Отечественной войны, всю жизнь занималась любимой работой, вырастила сына.

В «Личном листке по учету кадров» Е. С. Малясовой отражена формальная биография ученого: дата рождения, социальное происхождение – из служащих, беспартийная; образование высшее, окончила Ленинградский государственный университет, географический факультет, годы учебы 1940–1950; специальность – географ-геоморфолог; владеет английским языком; кандидат географических наук, старший научный сотрудник. Совсем небольшой послужной список: 1940–1941 гг. – металлургический завод, г. Аша Челябинской области; 1942–1945 гг. – находилась в рядах Советской армии; 1946–1950 гг. – учеба в ЛГУ; с 1950 г. работала на должности лаборанта, старшего лаборанта, младшего научного сотрудника ГЭНИИ, НИГЭИ, ЛГУ;

\* При написании данной статьи автор использовал материалы семейного архива, а также пожелания сына Е. С. Малясовой А. А. Прудникова.

The author used the materials from the family archive and suggestions of E. S. Malyasova's son A. A. Prudnikov.

## To the memory of the geographer- palynologist Evgenia Sergeevna Malyasova (to her 100th birthday)\*

V. I. Silin

Institute of Language, Literature and History,  
Federal Research Centre Komi Science Centre  
of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
Syktyvkar

silinv@rambler.ru

### Abstract

The article is dedicated to the 100th anniversary of the highly qualified palynologist, teacher of many geographers graduated from the Leningrad State University (Department of Geography) Evgenia Sergeevna Malyasova (1923–2020). E. S. Malyasova was a student of I. M. Pokrovskaya, the founder of the Palynological Laboratory at the Department of Geography at the Leningrad State University. She headed the Palynological Laboratory for more than 20 years, gave lectures at the Department of Geomorphology at the Leningrad State University, conducted active scientific research works on the palynology of the Arctic territories and sediments of the White and Barents Seas. The paper contains details of her life and scientific activities.

### Keywords:

palynology, E. S. Malyasova, Saint-Petersburg State University, White Sea, Barents Sea, Novaya Zemlya, quarter

с 1962 г. – руководитель лаборатории палинологии НИИГ. За границей не была, в советские органы не избиралась. Правительственные награды – «За победу над Германией», «За победу над Японией». Невоеннообязанная. Сын – Александр Александрович Прудников, 1961 г. р. За сухими строчками официальной биографии – годы увлеченной работы, десятки экспедиций, выступлений и диспутов на конференциях, совещаниях, переживания и ответственность за коллектив, дружба с интереснейшими людьми.

В 17 лет Евгения Сергеевна поступила в ЛГУ, но... война внесла свои коррективы, пришлось пойти работать на металлургический завод. В 1943 г. Е. С. Малясову призвали в армию, служила писарем железнодорожной бригады на Украинском фронте, затем была служба на Белорусском и Прибалтийском фронтах [1]. Люди, незнакомые с делом-производством, не представляют, насколько сложным и кропотливым трудом на войне является служба делопроизводителей. Каждый командир пишет отчет о жизни и боях своего коллектива – батареи, батальона или полка. Во время боев бойцы, связанные с делопроизводством, оказывались на одних позициях с разведчиками и брали в руки оружие. Служила Е. С. Малясова в санитарно-эвакуационном госпитале 4557 2-й гвардейской армии. В 1943 г.



А

Е. С. Малясова: А – конец 1950-х гг.; Б – 2004 г.  
E. S. Malyasova: A - end of the 1950s; Б - 2004.



Б



А. К. Прудников на колхозных лугах. 1956 г.  
A. K. Prudnikov in kolkhoz meadows. 1956.

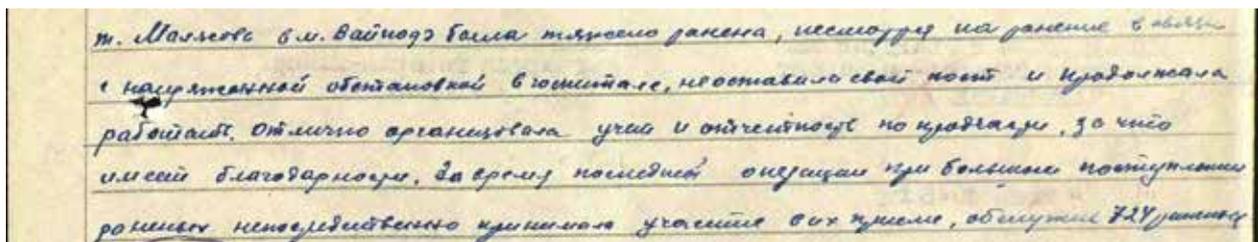
Армия воевала на Украине, освобождая Мелитополь и Херсон.

В феврале 1944 г. 2-я армия была передислоцирована в район Перекопского перешейка и в апреле-мае приняла участие в Крымской операции, в ходе которой во взаимодействии с другими войсками 4-го Украинского фронта и силами флота 9 мая освободила г. Севастополь. Затем были бои в Вильнюсской и Шауляйской операциях в составе 1-го Прибалтийского фронта. 20 декабря Армия была переподчинена 3-му Белорусскому фронту [2]. В январе-апреле 1945 г. в ходе Восточно-Прусской операции прорвала долговременную оборону противника, ликвидировала во взаимодействии с другими войсками фронта его окруженные группировки (юго-западнее Кенигсберга и земландскую группировку). Во время штурма Кенигсберга Евгения Сергеевна была ранена, поэтому День Победы встречала в госпитале. К концу войны она была уже заведующей делопроизводством. Свою армейскую службу Е. С. Малясова завершила на Дальнем Востоке, куда ее направили с эвакогоспиталем. Евгения Сергеевна была награждена орденом Отечественной войны II степени (1985), медалями «За боевые заслуги», «За взятие Кенигсберга», «За победу над Германией», «За победу над Японией».

Автору удалось найти на сайте «Память народа» [3] сведения о награждении Евгении Сергеевны Малясовой орденом Красной Звезды, о котором ни она, ни ее родственники не знали. Сохранилось и описание подвига, отмеченного этой наградой: «т. Малясова в м. Вайнодэ (село

в Латвии, так оно обозначено в документе – В. С.) была тяжело ранена, несмотря на ранение в связи с напряженной обстановкой в госпитале, не оставила свой пост и продолжала работать. Отлично организовала учет и отчетность по продчасти, за что имеет благодарности. За время последней операции при большом поступлении раненых непосредственно принимала участие в их приеме, обслужив 724 раненых». В Вайноде на братском кладбище похоронены 6416 (по данным на 1984 г. – 6327) советских воинов, погибших в 1944–1945 гг. при освобождении п. Вайноде и окрестностей.

После войны Евгения Сергеевна вернулась к учебе в Ленинградском университете. В 1950 г. окончила V курс. Еще студенткой она начала работать на кафедре под руководством Ирины Митрофановны Покровской (1902–1970) – видного специалиста-палинолога, сотрудника ВСЕГЕИ. Как говорила Евгения Сергеевна, «я ходила за ней хвостиком» с 1947 г., когда на III курсе прослушала курс по палинологии. С 1949 г., будучи студенткой IV курса, Е. С. Малясова стала на полставки работать лаборантом, а с 1950 г. – полноправным сотрудником лаборатории при кафедре геоморфологии. Увлечение палинологией, возможно, появилось не только под влиянием И. М. Покровской, но и благодаря объективным процессам 1950-х гг. – широкому развитию геологических работ. И. М. Покровская писала: «Количество лабораторий и лиц, занятых как производством палинологического анализа, так и разработкой его методики, резко увеличилось по сравнению с довоенными



Отрывок из архивного документа с описанием подвига Е. С. Малясовой [3].  
Archive document part with description of the heroic deed of E. S. Malyasova [3].

годами. Перед Великой Отечественной войной оно исчислялось только единицами, теперь имеется не менее 55–60 спорово-пыльцевых лабораторий (палинологических), а лиц, как работающих в лабораториях, так и отдельных специалистов, насчитывается не менее 300–350» [4, с. 4].

В своих воспоминаниях Евгения Сергеевна пишет: «В то время лаборатория располагалась в небольшой комнате, из оборудования была одна ручная центрифуга, но деятельная и всегда полная энергии Ирина Митрофановна привлекала в лабораторию многих интересных людей. Работали много, с утра и до вечера я крутила центрифугу и под руководством И. М. Покровской я выполняла спорово-пыльцевые анализы. Образцы поступали из разных регионов: Ленинградской области, Карелии, Калининграда и др.» [семейный архив]. На примере судьбы Е. С. Малясовой можно в очередной раз убедиться, как важно в начале научной карьеры встретить увлеченных своим делом Учителей. С 1953 г. началась геологическая съемка Западной Сибири, в которой приняли участие многие территориальные управления и геологи ВСЕГЕИ, где тогда работала И. М. Покровская. В эту деятельность была вовлечена и молодой палинолог.

В одной из первых работ Евгении Сергеевны, опубликованной совместно с И. И. Красновым, И. М. Покровской и Е. П. Бойцовой, рассмотрены вопросы стратиграфического расчленения континентальных отложений третичного возраста Нижнего Приобья, изученные в 1949 г. [5]. Определения пыльцы и зарисовки выполнены молодой сотрудницей Е. С. Малясовой. Также под руководством И. М. Покровской она принимала участие в выпуске атласов миоценовых [6] и олигоценых [7] спорово-пыльцевых комплексов районов СССР. И хотя доля участия Евгении Сергеевны в изданиях указанных атласов была незначительной (она охарактеризовала пыльцу Нижнего Приобья и Урала), это стало прекрасной школой для специалиста-палинолога.



Внешний вид издания монографии «Палинология донных осадков Белого моря». 1976 г.

Appearance of the monograph work "Palynology of bottom sediments of the White Sea". 1976.

О коллегах того времени – геологах Иване Ивановиче Краснове (1906–2003), Сергее Геннадиевиче Боце (1905–1956), Сергее Сергеевиче Шульце (1898–1981) и др. – Е. С. Малясова вспоминала через десятилетия с большим уважением.

В эти годы молодой палинолог набирается опыта не только у Ленинградских специалистов. Евгения Сергеевна вспоминала о многочисленных поездках для консультаций к Владимиру Поликарповичу Гричуку (1907–1999) и др. В одной из таких поездок она познакомилась с Леонидом Рувимовичем Серебрянным (1931–2000), с которым впоследствии плотно сотрудничала и дружила (Л. Р. Серебрянный являлся редактором монографии Е. С. Малясовой «Палинология донных осадков Белого моря», в 1984 г. вышла их совместная монография «Колебания ледников и процессы моренонакопления на Центральном Кавказе» [8] и много других работ по Арктике).

В 1950-е гг. основной территорией работ Е. С. Малясовой становятся Карельский перешеек и юг Карелии, в конце 1950-х – Кольский полуостров. Результаты исследований публиковались в статьях, а итогом явилась кандидатская диссертация на тему «Спорово-пыльцевые комплексы четвертичных отложений Кольского полуострова, Карелии и Карельского перешейка и их стратиграфическое значение» [9], защищенная в 1961 г. в Институте им. А. И. Герцена (г. Ленинград). Оппонентами диссертации стали профессор Александр Михайлович Архангельский (1903–1982) и Н. Г. Загорская. За основу расчленения четвертичных отложений территории была взята схема, разработанная Николаем Ивановичем Апухтиным (1911–1980) в 1956 г., насчитывающая четыре ледниковых горизонта, четыре межледниковых и послеледниковых отложения. Е. С. Малясова в своей диссертации на основе применения палеонтологического метода обосновывает стратиграфическую схему. Особенно подробно ею рассмотрены отложения поздне- и послеледникового времени. В заключении работы Е. С. Малясова пишет: «Таким образом, в результате проведенного автором исследования, выяснилось, что определенную палинологическую характеристику на территории Кольского полуострова, Карелии и Карельского перешейка имеют только отложения мгинского межледниковья, поздне- и послеледниковья, на основании которой можно коррелировать разрезы в пределах обширного региона Северо-Запада» [9, с. 15].

В публикациях, посвященных истории кафедры геоморфологии, Е. С. Малясова отмечает: «В период с 1949 по 1954 г. кафедрой снова руководит И. И. Бобков, затем его на короткий срок сменяет профессор (лауреат государственной премии) И. М. Покровская. Палинолог с мировым именем, одновременно руководившая кафедральной в ЛГУ и лабораторией палинологии во ВСЕГЕИ. Она создала направление и развила уникальную школу палинологов. Некоторые из ее учеников работали и достигли больших результатов не только в Санкт-Петербурге, но и в Новосибирске, Иркутске и других городах и весях нашей страны. Позже в должности заведующей лабораторией в ЛГУ Ирину Митрофановну сменила ее ученица Е. С. Малясова. В этот период происходит резкое увеличение выпускников-палинологов, хорошо разбирающихся в вопросах стратигра-

фии четвертичных и более древних отложений и до сих пор работающих в палинологических лабораториях СПб и СПбГУ» [10]. Е. С. Малясова более 20 лет читала лекции студентам на кафедре геоморфологии. Автору статьи повезло работать с двумя ее учениками – докторами геолого-минералогических наук Владимиром Васильевичем Соловьевым (ВСЕГЕИ) и Эммой Ивановной Лосевой (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН). Оба очень тепло отзывались об Евгении Сергеевне как преподавателе.

В 1970-е гг. Е. С. Малясова публикует цикл работ по палинологии прибрежных и донных отложений Белого моря. На основе анализа обширного материала она отмечает, что благодаря структуре течений палинологические характеристики отложений достаточно равномерно пространственно распределены [11]. В частности, исследователь пишет: «В общем составе спектров всех образцов преобладает пыльца древесных пород (85–98 %). Пыльца травянистых растений чаще встречается единично, споры составляют 3–15 %. Древесные породы представлены пыльцой ели, сосны, березы (древовидной, кустарниковой и кустарничковой форм), единично и не во всех образцах отмечена пыльца широколиственных пород (дуб, вяз, липа). Доминирует в спектрах пыльца сосны (50–95 %), в значительно меньшем количестве встречается пыльца ели (6–33 %), ольхи (1–7 %) и березы (2–22 %)» [11, с. 120].

По характеристике времени отложений Е. С. Малясова отмечает: «Изменения количественных соотношений компонентов в спектрах и состава флоры явились основанием для выделения в разрезе отложений аллередского, верхнедриасового, пребореального, бореального, атлантико-суббореального и субатлантического возраста» [11].

Будучи на пенсии, Е. С. Малясова активно продолжала палеонтологические исследования. Поселившись в п. Мельниково Приозерского района, она организовала оборудование для обработки геологических проб и активно сотрудничала с геологами, в том числе продолжая совместные исследования с Л. Р. Серебряным. Евгения Сергеевна вспоминала: «В 1983 г. по ряду причин я ушла из Университета на пенсию. Лаборатория палинологии как самостоятельная единица была ликвидирована. Еще некоторое время отдельные сотрудники продолжали работать, но это были уже одиночки, а не единый коллектив. Но работу я не оставила. Два года проработала в Новоземельской экспедиции Севморгео и более десяти лет (15 лет) в Палеофлористической лаборатории Ленинградской геологической экспедиции (зав. лабораторией Э. С. Плешивцева)» [семейный архив].

В начале 1990-х гг. Е. С. Малясова обобщила свои многолетние работы и подготовила монографию, которую собиралась представить как докторское исследование на тему «Палинология северных морей (методика, значение для стратиграфии и палеогеографии позднего кайнозоя Арктики)». Монография состояла из двух частей – первая была посвящена вопросам формирования спорово-пыльцевых спектров в современных акваториях, вторая – вопросам практического применения метода в изучении проблем стратиграфии и палеогеографии позднего кайнозоя шельфа, островов и побережья Арктики.

Работа была пионерная и получила высокую оценку специалистов. В отзыве геологов ВНИИОкеанологии Ю. Н. Кулакова и В. С. Зархидзе (1984) отмечается: «Автором (Е. С. Малясовой – В. С.) разработаны методические основы маринопалинологии – нового направления в стратиграфии морских кайнозойских осадков Арктики» [семейный архив].

Видный специалист в морской палинологии доктор геолого-минералогических наук Е. Д. Заклинская также очень высоко оценила работу Е. С. Малясовой. Она писала: «В монографии систематизирован огромный фактический материал, не имеющий себе равного среди (выделение в отзыве – В. С.) маринопалинологических исследований у нас в Союзе и за рубежом. Исследование окраинных морей в настоящее время особенно важно в связи с широким разворачиванием изучения шельфовых зон, как правило, перспективных при поисковых работах на нефть, природные газы и другие энергетические ресурсы. СССР является первой страной, где была заложена маринопалинология. Методически выдержанная сводная работа жизненно необходима для практической палинологии, в особенности в настоящее время, когда разворачивается крупномасштабная съемка. Для обоснованной корреляции морских и континентальных отложений пока еще нет более надежного метода, чем палинологический. В монографии Е. С. Малясовой именно этому вопросу отведен целый раздел (раздел второй). Материал, собранный Е. С. Малясовой и систематизированный в виде монографии, является безусловно достаточным по объему и содержанию для докторской диссертации (02.03.1983 г.)» [семейный архив].

К сожалению, по независящим от Евгении Сергеевны обстоятельствам монография не была опубликована и диссертация не была защищена. Об этом Е. С. Малясова и через много лет сожалела, так как в исследовании заключался результат ее многолетней работы – и методической и исследовательской. Причин непубликации могло быть несколько – выход на пенсию, расформирование лаборатории, разногласие между Ленинградской и Московской палинологическими школами и др.

В 1986 г. вышли в свет обобщающие статьи по стратиграфии отложений Новой Земли [12] и острова Колгуев в кайнозое [13]. Результаты исследований опирались, в том числе, на палинологические работы, проведенные Е. С. Малясовой.

Всем известно, что на севере европейской части России и на севере Западной Сибири давно существует полемика между гляциалистами и маринистами. Евгения Сергеевна являлась гляциалистом, но прекрасно сотрудничала и с маринистами, для нее важнее был результат обработки фактического материала. Ее палинологические данные отрицали существование на Новой Земле в четвертичном периоде сплошного покровного оледенения, об этом говорят и сохраненные олигоценовые коры выветривания на вершинах гор, и пыльцевые спектры отложений. Приведем слова антигляциалиста В. Г. Чувардинского: «Здесь важно отметить, что к выводам об отсутствии сплошного оледенения Новой Земли и тем самым исключения ее из реестра центров материковых оледенений, пришли не антигляциалисты, а сторонники ледниковой теории – Л. Р. Серебрян-

ный (он наиболее привержен ледниковым идеям) и Евгения Сергеевна Малясова – крупнейший отечественный палинолог. Но все-таки первыми исследователями, кто привел веские доказательства отсутствия четвертичного покровного оледенения на Южном острове Новой Земли, были геологи А. С. Красножен, В. С. Зархидзе и микрофаунист О. Ф. Барановская (в публикациях 1982 г.)» [14, с. 19].

Помимо изучения палинологических особенностей четвертичных отложений Севера Евгения Сергеевна принимала участие и в исследовании других географических процессов – ледниковых и приледниковых отложений и геоморфологических форм [15], лессов и погребенных почв [16], динамики торфонакопления и процесса образования бугристых болот Западной Сибири [17] и др. Бесценны ее многочисленные работы по методике проведения палинологического анализа, особенно донных отложений северных морей [18, 19 и др.].

Еще в университете Евгения Сергеевна на студенческой практике познакомилась с Александром Калистратовичем Прудниковым (1907–1990), который в числе «тридцатитысячников», оставив преподавание в вузе (кандидат географических наук, написал диссертацию на тему «Пути развития сельского хозяйства районов Северного Приладожья Карело-Финской Республики»), возглавил колхоз им. Кирова (п. Горы) на Карельском перешейке. Александр Калистратович Прудников – муж Евгении Сергеевны, участник советско-финляндской и Великой Отечественной войн, командир разведроты 19-го стрелкового полка 142-й стрелковой дивизии. Названная дивизия воевала на Карельском перешейке, с которым была связана вся дальнейшая жизнь А. К. Прудникова. После объединения колхоза и совхоза «Мельниково» он возглавил вновь созданную структуру. В 1965 г. вышел на пенсию и остался жить в п. Мельниково, сюда же приехала, выйдя на пенсию, Евгения Сергеевна. Она установила центрифугу и занялась обработкой анализов, сюда приезжали ее коллеги, работодатели и гости из-за рубежа. В поселке она проводила большую общественную работу, выступала с лекциями и беседами в школе.

Евгения Сергеевна прожила достойную и красивую долгую жизнь. Она умерла 17 сентября 2020 г., немного не дожив до 100-летнего юбилея. Е. С. Малясова была последним ветераном Великой Отечественной войны, проживавшим в Приозерском районе.

Автор статьи счастлив, что знал Евгению Сергеевну с раннего детства как добрейшего, интереснейшего человека. Скромная, обаятельная, умная, романтичная... такой она останется навсегда в памяти тех, кто был с ней знаком.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

## Литература

1. Бережной, А. Ф. Они сражались за Родину: Универсанты в годы войны и в послевоенные годы. Вып. 4 / А. Ф. Бережной. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2003. – С. 72, 73.
2. 2-я Гвардейская Армия / [https://mail.ru/search?text=2%20%D0%B3%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%2B%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F&us=14&usln=1&serp\\_path=%2Fsearch%2F](https://mail.ru/search?text=2%20%D0%B3%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%2B%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F&us=14&usln=1&serp_path=%2Fsearch%2F).
3. Центральный архив министерства обороны. Ф. 33. Оп. 686196. Ед. хр. 5544. <https://pamyat-naroda.su/a/14779980>.
4. Покровская, И. М. Основные задачи палинологического анализа на ближайшее время / И. М. Покровская // Материалы по палинологии и стратиграфии. Сб. статей. – Москва, 1954. – С. 4–6.
5. Бойцова, Е. П. Результаты изучения спорово-пыльцевых комплексов из континентальных третичных отложений Нижнего Приобья / Е. П. Бойцова, И. И. Краснов, Е. С. Малясова, И. М. Покровская // Материалы по палинологии и стратиграфии. – Москва : Госгеолтехиздат, 1954. – С. 114–123.
6. Бойцова, Е. П. Миоценовые спорово-пыльцевые комплексы Низшего Приобья / Е. П. Бойцова, Е. С. Малясова, И. М. Покровская // Атлас миоценовых спорово-пыльцевых комплексов различных районов СССР. – Москва : Госгеолтехиздат, 1956. – Нов. сер.; вып. 13. – С. 50–66.
7. Бойцова, Е. П. Средне- и верхнеолигоценые спорово-пыльцевые комплексы нижнего Приобья / Е. П. Бойцова, Е. С. Малясова, И. М. Покровская // Атлас олигоценых спорово-пыльцевых комплексов различных районов СССР. – Москва : Госгеолтехиздат, 1956. – Нов. сер.; вып. 16. – С. 29–31.
8. Серебрянный, Л. Р. Колебания ледников и процессы моренонакопления на Центральном Кавказе / Л. Р. Серебрянный, Н. А. Голодковская, А. В. Орлов, Е. С. Малясова, Э. О. Ильвес [и др.]. – Москва : Наука, 1984. – 216 с.
9. Малясова, Е. С. Спорово-пыльцевые комплексы четвертичных отложений Кольского полуострова, Карелии и Карельского перешейка и их стратиграфическое значение: автореф. дис. ... канд. геогр. наук / Е. С. Малясова; М-во просвещения РСФСР. Ленингр. гос. пед. ин-т им. А. И. Герцена. Кафедра физ. географии. – Ленинград : [б. и.], 1961. – 16 с.
10. Лопатин, Д. В. К девяностолетию кафедры геоморфологии Санкт-Петербургского государственного университета / Д. В. Лопатин, А. И. Жиров // Журнал Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. – 2008. – <https://cyberleninka.ru/article/n/k-devyanos-toletiyu-kafedry-geomorfologii-sankt-peterburgskogo-gosudarstvennogo-universiteta>.
11. Малясова, Е. С. Пыльца и споры из донных осадков Белого моря / Е. С. Малясова // Палинология голоцена и маринопалинология. – Москва : изд-во «Наука», 1973. – С. 119–123. – [http://www.ginras.ru/library/pdf/1973\\_holocene\\_palynologyu.pdf](http://www.ginras.ru/library/pdf/1973_holocene_palynologyu.pdf).
12. Красножен, А. С. Стратиграфия и основные этапы геологического развития архипелага Новая Земля в кайнозое / А. С. Красножен, О. Ф. Барановская, В. С. Зархидзе, Е. С. Малясова // Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. – Ленинград : Изд-во ПГО «Севморгеология», 1986. – С. 23–26. – <http://www.evgenyev.narod.ru/kz/kz.html>.

13. Барановская, О. Ф. Стратиграфия позднего кайнозоя острова Колгуев / О. Ф. Барановская, М. Н. Григорьев, Е. С. Малясова // Кайнозой шельфа и островов Советской Арктики. – Ленинград : Изд-во ПГО «Севморгеология», 1986. – С. 83–89.
14. Чувардинский, В. Г. Букварь неотектоники (новый взгляд на ледниковый период) / В. Г. Чувардинский. – Апатиты : Изд-во Кольского научного центра РАН, 2008. – 85 с.
15. Малясова Е. С., Усикова Т. В. К вопросу о происхождении камовых возвышенностей окрестностей Ленинграда. – <http://evgengusev.narod.ru/spb/usikova-1965.pdf>
16. Болиховская, Н. С. Палеогеографические закономерности развития лессово-почвенной формации Северной Евразии: по палинологическим данным : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук: 11.00.04 / Н. С. Болиховская; МГУ им. М. В. Ломоносова. – Москва, 1996. – 45 с. – <https://earthpapers.net/paleogeograficheskie-zakonomernosti-razvitiya-lessovo-pochvennoy-formatsii-severnoy-evrazii>.
17. Малясова, Е. С. Динамика торфонакопления и процесс образования бугристых болот Западной Сибири / Е. С. Малясова, С. М. Новиков, Л. И. Усова // Ботанический журнал. – 1991. – Т. 76, № 9. – С. 1227–1238.
18. Малясова, Е. С. Формирование спорово-пыльцевых спектров в поверхностных осадках / Е. С. Малясова // Основные проблемы и палеогеография позднего кайнозоя Арктики / под ред. И. С. Грамберга и Ю. Н. Кулакова. – Ленинград : Недра, 1983. – С. 143–156.
19. Малясова, Е. С. Зависимость состава спорово-пыльцевых спектров от условий формирования их в бассейнах разного типа / Е. С. Малясова // Проблемы современной палинологии: Ст. сов. палинологов к VI Междунар. палинол. конф. Калгари, 1984. – Новосибирск, 1984. – С. 67–70.
5. Boitsova, E. P. Rezultaty izucheniya sporovo-pylcevykh kompleksov iz kontinentalnykh tretichnykh otlozheniy Nizhnego Priobya [The study results of spore-pollen complexes from continental Tertiary sediments of the Lower Ob River Region] / E. P. Boitsova, I. I. Krasnov, E. S. Malyasova, I. M. Pokrovskaya // Materialy po palinologii i stratigrafii [Materials on Palynology and Stratigraphy]. – Moscow : Gosgeoltekhizdat, 1954. – P. 114–123.
6. Boitsova, E. P. Miocenovyye sporovo-pylcevyye komplekсы Nizhnego Priobya [Miocene spore-pollen complexes of the Low Ob River Region] / E. P. Boitsova, E. S. Malyasova, I. M. Pokrovskaya // Atlas miocenovykh sporovo-pylcevykh kompleksov razlichnykh rajonov SSSR [Atlas of Miocene Spore-Pollen Complexes of Different Regions of the USSR]. – Moscow : Gosgeoltekhizdat, 1956. – New series; Issue 13. – P. 50–66.
7. Boitsova, E. P. Sredne- i verhneoligocenovyye sporovo-pylcevyye komplekсы nizhnego Priobya [Middle- and Upper Oligocene spore-pollen complexes of the Lower Ob River Region] / E. P. Boitsova, E. S. Malyasova, I. M. Pokrovskaya // Atlas oligotsenovykh sporovo-pylcevykh kompleksov razlichnykh rajonov SSSR [Atlas of Oligocene Spore-Pollen Complexes of Different Regions of the USSR]. – Moscow : Gosgeoltekhizdat, 1956. – New series; Iss. 16. – P. 29–31.
8. Serebryannyi, L. R. Kolebaniya lednikov i process morenolakopleniya na Centralnom Kavkaze [Glacier fluctuations and processes of moraine accumulation in the Central Caucasus] / L. R. Serebryannyi, N. A. Golodkovskaya, A. V. Orlov, E. S. Malyasova, E. O. Ilves [et al.]. – Moscow : Nauka, 1984. – 216 p.
9. Malyasova, E. S. Sporovo-pylcevyye komplekсы chetvertichnykh otlozheniy Kolskogo poluoostrova, Karelii i Karelskogo pereshejka i ih stratigraficheskoe znachenie [Spore-pollen complexes of Quaternary deposits of the Kola Peninsula, Karelia and the Karelian Isthmus and their stratigraphic significance] : extended abstract of Candidate's thesis / Malyasova E. S.; Ministry of Education of the RSFSR. Leningrad State Pedagogical Institute named after A. I. Herzen. A. I. Herzen. Department of Physical Geography. – Leningrad : [no ill.], 1961. – 16 p.
10. Lopatin, D. V. K devyanostoletiyu kafedry geomorfologii Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta [To the ninetieth anniversary of the Department of Geomorphology at the Saint-Petersburg State University] / D. V. Lopatin, A. I. Zhiron // Bulletin of the Saint-Petersburg State University. Earth Sciences. – 2008. – <https://cyberleninka.ru/article/n/k-devyanostoletiyu-kafedry-geomorfologii-sankt-peterburgskogo-gosudarstvennogo-universiteta>.
11. Malyasova, E. S. Pylca i spory iz donnykh osadkov Belogo morya [Pollen and spores from bottom sediments of the White Sea] / / E. S. Malyasova // Palinologiya golocena i marinopalnologiya [Palynology of the Holocene and Marinopalynology]. – Moscow : Nauka, 1973. – P. 119–123. – [http://www.ginras.ru/library/pdf/1973\\_holocene\\_palynologiyu.pdf](http://www.ginras.ru/library/pdf/1973_holocene_palynologiyu.pdf).
12. Krasnozhen, A. S. Stratigrafiya i osnovnye etapy geologicheskogo razvitiya arhipelaga Novaya Zemlya v kajnozoe [Stratigraphy and main stages of geological develop-

## References

1. Berezhnoi, A. F. Oni srazhalis za Rodinu : Universanty v gody vojny i v poslevoennyye gody [They fought for the Motherland : University students in the years of war and in the post-war years]. Iss. 4 / A. F. Berezhnoy. – Saint-Petersburg : Saint-Petersburg University Publicity, 2003. – P. 72, 73.
2. 2-ya Gvardejskaya Armiya [2nd Guards Army] / [https://mail.ru/search?text=2%20%D0%B3%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F&mstatid=855300&type=web&fr=ffvbm1.0.0.52&fr2=query&gp=855300&q=2%2B%D0%B3%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%2B%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F&us=14&usln=1&serp\\_path=%2Fsearch%2F](https://mail.ru/search?text=2%20%D0%B3%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F&mstatid=855300&type=web&fr=ffvbm1.0.0.52&fr2=query&gp=855300&q=2%2B%D0%B3%D0%B2%D0%B0%D1%80%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%2B%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B8%D1%8F&us=14&usln=1&serp_path=%2Fsearch%2F).
3. Centralnyj arhiv ministerstva oborony [Central Archive of the Ministry of Defense]. File 33. Inventory 686196. Storage item 5544. <https://pamyat-naroda.su/a/14779980>.
4. Pokrovskaya, I. M. Osnovnye zadachi palinologicheskogo analiza na blizhajshee vremya [The main tasks of palynological analysis for the near future] / I. M. Pokrovskaya // Materialy po palinologii i stratigrafii [Materials on Palynology and Stratigraphy]. Collection of articles. – Moscow, 1954. – P. 4–6.

- ment of the Novaya Zemlya archipelago in the Cenozoic] / A. C. Krasnozhen, O. F. Baranovskaya, V. S. Zarkhidze, E. S. Malyasova // *Kajnozoy shelfa i ostrovov Sovetskoy Arktiki* [The Cenozoic of the shelf and islands of the Soviet Arctic]. – Leningrad : Sevmorgeology, 1986. – P. 23–26. – <http://www.evgenyusev.narod.ru/kz/kz.html>.
13. Baranovskaya, O. F. Stratigrafiya pozdnego kajnozoya ostrova Kolguev [Stratigraphy of the Late Cenozoic in the Kolguev Island] / O. F. Baranovskaya, M. N. Grigoriev, E. S. Malyasova // *Kajnozoy shelfa i ostrovov Sovetskoy Arktiki* [The Cenozoic of the shelf and islands of the Soviet Arctic]. – Leningrad : Sevmorgeology, 1986. – P. 83–89.
  14. Chuvardinsky, V. G. Bukvar neotektoniki (novyj vzglyad na lednikovyy period) [The ABC book of neotectonics (a new focus on the glacial period)] / V. G. Chuvardinsky. – Apatity : Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 2008. – 85 p.
  15. Malyasova E. S. K voprosu o proiskhozhdenii kamovykh vozvyshennoy okrestnostey Leningrada [To the question about the origin of kame uplands in the vicinities of Leningrad] / E. S. Malyasova, T. V. Usikova. – <http://evgenyusev.narod.ru/spb/usikova-1965.pdf>.
  16. Bolikhovskaya, N. S. Paleogeograficheskie zakonomernosti razvitiya lessovo-pochvennoy formatsii Severnoy Evrazii : Po palinologicheskim dannym [Paleogeographic development mechanisms of loess-soil formation of Northern Eurasia : Based on palynological data] : extended abstract of Doctor's thesis (Geography) : 11.00.04 / Lomonosov Moscow State University. – Moscow, 1996. – 45 p. – <https://earthpapers.net/paleogeograficheskie-zakonomernosti-razvitiya-lessovo-pochvennoy-formatsii-severnoy-evrazii>.
  17. Malyasova, E. S. Dinamika torfonakopleniya i process obrazovaniya bugristykh bolot Zapadnoy Sibiri [Dynamics of peat accumulation and the process of formation of hummock mires in Western Siberia] / E. S. Malyasova, S. M. Novikov, L. I. Usova // *Botanicheskiy zhurnal* [Botanical Journal]. – 1991. – V. 76, № 9. – P. 1227–1238.
  18. Malyasova, E. S. Formirovaniye sporovo-pylcevykh spektrov v poverhnostnykh osadkakh [Formation of spore-pollen spectra in surface sediments] / E.S. Malyasova // *Osnovnye problemy i paleogeografiya pozdnego kajnozoya Arktiki* [Main Questions and Paleogeography of the Late Cainozoic in the Arctic] / ed. by I. S. Gramberg and Yu. N. Kulakov. – Leningrad : Nedra, 1983. – P. 143–156.
  19. Malyasova, E. S. Dependence of the composition of spore-pollen spectra on the conditions of their formation in different-type basins / E. S. Malyasova // *Issues of Modern Palynology : Papers of the Soviet Palynologists for the VI International Palynological Conference*. – Calgary, 1984. – Novosibirsk, 1984. – P. 67–70.

#### Благодарность (госзадание)

Исследование выполнено в рамках реализации государственного задания ФИЦ Коми НЦ УрО РАН по теме «Трансформации общества, власти и экономики в регионах европейского севера России» (№ 122040800166-0).

#### Acknowledgements (state task)

The research was carried out within the frames of the state task of the Federal Research Centre Komi Science Centre, Ural Branch, RAS on the theme “Transformations of society, government and economy in the regions of the European North of Russia” (state registration № 122040800166-0).

#### Информация об авторе:

**Силин Владимир Иванович** – доктор географических наук, главный научный сотрудник сектора историко-демографических и историко-географических исследований Российского Севера Института языка, литературы и истории Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; ORCID: 0000-0002-1616-2755 (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 26; e-mail: silinv@rambler.ru).

#### About the author:

**Vladimir I. Silin** – Doctor of Sciences (Geography), Chief Researcher of the Sector of Historical-Demographic and Historical-Geographic Research in the Russian North at the Institute of Language, Literature and History, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ORCID: 0000-0002-1616-2755 (26 Kommunisticheskaya st., Syktyvkar 167982, Russian Federation; e-mail: silinv@rambler.ru).

#### Для цитирования:

Силин, В. И. Памяти географа-палинолога Евгении Сергеевны Малясовой (к 100-летию со дня рождения) / В. И. Силин // *Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле»*. – 2024. – № 3 (69). – С. 152–158.

#### For citation:

Silin, V. I. Pamyati geografa-palinologa Evgenii Sergeevny Malyasovoj (k 100-letiyu so dnya rozhdeniya) [To the memory of the geographer-palynologist Evgenia Sergeevna Malyasova (to her 100th birthday)] / V. I. Silin // *Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”*. – 2024. – № 3 (69). – P. 152–158.



Научный журнал

**ИЗВЕСТИЯ**  
Коми научного центра  
Уральского отделения Российской академии наук

**Серия «Науки о Земле»**  
**№ 3 (69)**

Номер подготовили:

Ответственный редактор серии – д.г.-м.н. А. М. Пыстин  
Ответственный секретарь серии – д.г.-м.н. Н. С. Бурдельная  
Выпускающий редактор – И. В. Курляк  
Редактор – К. А. Попова  
Переводчик – Е. С. Кузьмина  
Оригинал-макет – Е. Н. Старцева  
Дизайн обложки – Я. С. Куликова

Лицензия № 0047 от 10.01.1999.

Подписано в печать 09.07.2024. Дата выхода в свет 12.07.2024.

Уч.-изд. л. 20.0. Усл.-печ. л. 18.5. Тираж 300. Заказ № 29.

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Свободная цена.

---

Подготовлено к изданию и отпечатано в редакционно-издательском центре ФИЦ Коми НЦ УрО РАН  
167982, Российская Федерация, ГСП-2, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24.

Адрес учредителя, издателя: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр УрО РАН».  
167982, Российская Федерация, ГСП-2, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24.