Научный журнал

Основан в 2010 г.
Выходит девять раз в год.

Учредитель
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
«Коми научный центр Уральского отделения
Российской академии наук»

Известия

КОМИ НАУЧНОГО ЦЕНТРА УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

№ 3 (79) **Серия «НАУКИ О ЗЕМЛЕ»** **2025**

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. Матвеенко, д.и.н. В. И. Меньковский (Беларусь), акад. РАН Г. А. Месяц, чл.-корр. РАН А. А. Москалев, д.э.н. Л. А. Попова, 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, 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, чл.-корр. РАН 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. Прищепа, 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 Уральского отделения Российской академии наук», 2025

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 (79) **«EARTH SCIENCES» series** **2025**

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,
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. Savelyeva, 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. Burdelnaya (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, 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,
RAS corresp. member 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

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

© Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Centre "Komi Science Centre, Ural Branch, Russian Academy of Sciences", 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Н. Н. Зинчук, М. Н. Зинчук
Геолого-петрофизические и минералого-петрографические исследования кимберлитовых пород 5

А. М. Шмакова, К. В. Куликова
Девонские базальты и долериты Тимана и полуострова Канин: петрография, минералогия, геохимия, изотопия 27

И. И. Голубева, А. В. Травин, В. Б. Хубанов, А. С. Шуйский
Гранитоиды евъюганского комплекса Харбейского блока (Полярный Урал): новые геохронологические данные 40

О. В. Удоратина, А. С. Шуйский
Редкометалльные аляскиты массива Маньхамбо (Северный Урал): U-Pb (SIMS) данные и изотопно-геохимические характеристики 53

С. Н. Хафаева
Фораминиферы нижнего мела севера Средней Сибири (Центральный Таймыр и низовья реки Оленек): биостратиграфический и биофациальный анализы 68

Ф. П. Леснов, В. Н. Королюк, А. В. Вишневский, Н. М. Подгорных
Особенности состава и условия образования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия) 78

Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан
Результаты исследований напряженно-деформированного состояния геосред в задачах геомеханики, геотектоники, горного машиностроения 87

А. А. Галимьянов, В. И. Мишнев
Рациональный объем массового взрыва при разработке карьеров 102

Юбилеи

Н. Н. Тимонина
«Ей покорялись Уральские горы» (памяти Р. Г. Тимониной) 106

З. П. Юрьева
Воспоминание о Валентине Николаевне Каратаюте-Талимаа 112

Л. П. Рощевская
Инженер-исследователь П. И. Толмачев из плеяды академика А. П. Карпинского 115

CONTENTS

N. N. Zinchuk, M. N. Zinchuk
Geological-petrophysical and mineralogic-petrographic studies of kimberlite rocks 5

A. M. Shmakova, K. V. Kulikova
Devonian basalts and dolerites of the Timan and the Kanin Peninsula: petrography, mineralogy, geochemistry, isotopy. 27

I. I. Golubeva, A. V. Travin, V. B. Khubanov, A. S. Shuisky
Granitoids of the Evyugan complex of the Kharbey block (Polar Urals): new geochronological data 40

O. V. Udoratina, A. S. Shuisky
Rare-metal alaskites of the Mankhambo massif (Northern Urals): U-Pb (SIMS) data and isotope-geochemical characteristics 53

S. N. Khafaeva
Lower Cretaceous foraminifera of the northern part of Middle Siberia (Central Taimyr and lower reaches of the Olenek River): biostratigraphic and biofacies analyses 68

F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk, A. V. Vishnevsky, N. M. Podgornykh
Composition characteristics and formation conditions of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia) 78

E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan
Investigation results of the stress-strain state of geomedia for the purposes of geomechanics, geotectonics, mining engineering 87

A. A. Galimyanov, V. I. Mishnev
Rational volume of the dirtied rock mass of large-scale blast during quarry development 102

Anniversaries

N. N. Timonina
“The Ural Mountains were conquered by her” (in memory of R. G. Timonina) 106

Z. P. Yurieva
To the memory of Valentina Nikolaevna Karatayute-Talimaa 112

L. P. Roshchevskaya
Research engineer P. I. Tolmachev from the pleiades of academician A. P. Karpinsky 115

УДК 552.323.6:553.81
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-5-26

Геолого-петрофизические и минералого-петрографические исследования кимберлитовых пород

Н. Н. Зинчук, М. Н. Зинчук

Западно-Якутский НЦ АН РС (Я),
г. Мирный
nnzinchuk@rambler.ru

Аннотация

Известны три геолого-генетических типа коренных месторождений алмаза: магматический (кимберлитовый и лампроитовый), метаморфогенный и импактный. Проведено комплексное изучение геолого-петрофизических и петрографических особенностей кимберлитовых пород – главного поставщика алмазов. Верхние части слабоэродированных кимберлитовых трубок обычно венчаются кратерными постройками, переходящими вниз по разрезу в диатремы, которые на глубине переходят в дайки. Для кимберлитовых трубок характерны трехфазные разрезы (кратер, диатрема и корневая часть), отличающиеся текстурно-структурными и минералого-петрографическими свойствами. Установлено, что облик и состав разнофациальных кимберлитов (порфировые разности, автолитовые и кимберлитовые брекчии, туфы и туфобрекчии) во многом определяются вещественным составом вмещающих диатремы пород, степенью их постмагматических и гипергенных изменений. Мантийный материал в кимберлитах представлен ксенолитами ультраосновных, щёлочно-ультраосновных и основных пород и ксенозёрнами минералов из них – алмазом, пиропом, пикроильменитом, хромшпинелидом, оливином, клинопироксеном, ортопироксеном, флогопитом, реже – цирконом, апатитом, титаноклиногумитом и др. Мантийные ксенолиты в кимберлитовых трубках обычно отражают различные уровни мантии, являющиеся источником глубинного вещества, прошедшего разноплановые изменения при формировании диатрем. Для южной части Сибирской платформы характерны высокомагнезиальные гранатовые перидотиты и пироксениты. Для кимберлитовых диатрем северной части этого кратона в одних участках преобладают перидотиты, в других – эклогиты. Здесь отмечена повышенная роль безгранатовых перидотитов и гранат-пироксеновых пород, что не характерно для кимберлитов других платформ мира. Подчеркивается важность проведения анализа влияния различных мантийных пород на продуктивность кимберлитов. Полученные данные по типоморфным особенностям алмазов и их парагенетических спутников позволяют совершенствовать как сами критерии алмазоносности кимберлитовых пород, так и существенно влиять на выбор перспективных территорий и площадей для прогнозирования и поисков алмазных месторождений.

Ключевые слова:

кимберлиты, петрофизика, петрография, минералогия, типизация, классификация, прогнозирование и поиски алмазных месторождений

Geological-petrophysical and mineralogic-petrographic studies of kimberlite rocks

N. N. Zinchuk, M. N. Zinchuk

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

Abstract

There are three geological-genetic types of primary diamond deposits as magmatic (kimberlite and lamproite), metamorphogenic and impact deposits. The authors carried out a comprehensive study of geological, petrophysical and petrographic features of kimberlite rocks, i.e. the main supplier of diamonds. The upper parts of weakly eroded kimberlite pipes are usually crowned with crater structures, transforming down the section into diatrems, which further turn into dikes. Kimberlite pipes have three-phase sections (crater, diatreme and root part), which differ in textural-structural and mineralogical-petrographic properties. The appearance and composition of different-facies kimberlites (porphyritic varieties, autolithic and kimberlite breccias, tuffs and tuff breccias) are largely determined by the material composition of the diatreme host rocks and the degree of their postmagmatic and hypergenic alterations. Mantle material in kimberlites is represented by xenoliths of ultrabasic, alkaline-ultrabasic and basic rocks and xenograins of minerals from them – diamond, pyrope, picroilmenite, chromospinelide, olivine, clinopyroxene, orthopyroxene, phlogopite, less zircon, apatite, titanoclinogumite and others. Mantle xenoliths in kimberlite pipes usually evidence different levels of the mantle, which are the source of deep matter that underwent diverse alterations during the diatreme formation. The southern part of the Siberian Platform includes high-magnesian garnet peridotites and pyroxenites. For kimberlite diatrems of the northern part of this craton, peridotites predominate in some areas and eclogites in others. Garnet-free peridotites and garnet-pyroxene rocks play a greater role here, which is not typical of kimberlites from the other platforms of the world. The paper underlines the importance of analysing the influence of different mantle rocks on the productivity of kimberlites. The obtained data on the typomorphic features of diamonds and their paragenetic satellites allow to improve both the diamond content criteria of kimberlite rocks and significantly influence the choice of promising territories and sites for forecasting and prospecting diamond deposits.

Keywords:

kimberlites, petrophysics, petrography, mineralogy, typification, classification, forecasting and prospecting of diamond deposits

Введение

В настоящее время известно три геолого-генетических типа коренных месторождений алмаза: магматический (кимберлитовый и лампроитовый), метаморфогенный и импактный. Из них главным коренным типом являются кимберлиты [1-9], установленные на всех древних платформах Земли, из которых добывается около 80 % природного алмазного сырья. Несмотря на широкое распространение кимберлитов (только на Сибирской, Африканской и Северо-Американской платформах их порядка 2500 проявлений) и наличию в десятой части из них признаков алмазоносности, промышленное значение имеют (т. е. являются месторождениями) менее 3 % тел [10–15]. По запасам алмазов и размерам месторождения разделяются на уникальные, крупные, средние и мелкие, а по содержаниям – на уникально-, высоко-, средне- и низкоалмазоносные. Естественно, наиболее рентабельной является отработка верхних горизонтов выходящих на дневную поверхность уникальных и крупных месторождений. Коренные месторождения алмазов, связанные с кимберлитовыми трубками взрыва или диатремами, успешно эксплуатируются более 130 лет. Из них, а также из образованных за счет их кор выветривания (КВ) и образования россыпей за всю историю добычи извлечено более 690 т алмазов. Большинством исследователей признано, что алмаз кимберлитов кристаллизовался на большой глубине (порядка 150–200 км) в мантии Земли в области его стабильности (P>45 ГПА, T=950–1400 °C) намного раньше образования кимберлитовых тел, т. е. алмаз в кимберлитах - ксеногенный минерал. Его источником являются дезинтегрированные мантийные породы - перидотиты и эклогиты, фрагменты которых вынесены кимберлитовой магмой в верхние слои литосферы [16–20]. Форма залегания алмазоносных кимберлитов – трубки и дайки, реже отмечаются силлы. Характерными особенностями кимберлитовых проявлений являются групповое расположение тел и приуроченность промышленно алмазоносных трубок к участкам древних платформ с кратонным основанием [21–25]. Несмотря на длительный период системного изучения кимберлитов, многие аспекты их геологии, генезиса и состава остаются нерешенными, недостаточно изученными или дискуссионными.

Материалы и методы

Кимберлиты представляют собой вулканические изверженные, недосыщенные кремнеземом, богатые летучими компонентами ультраосновные гибридные породы с повышенной щелочностью, содержащие мантийный и коровый материал в варьирующих количествах и соотношениях [26–32]. Основной формой проявления кимберлитов являются воронкообразные брекчиевые диатремы (трубки взрыва), верхние части которых венчаются кратерными постройками; на глубине (от 1000 до 2500 м от поверхности) диатремы переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «посткимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Как наблюдается практически во всех провинциях, кимберлиты пространственно локализованы в пределах архейских и архейско-нижнепротерозойских ядер-кратонов, обладающих консолидированной корой, мощной и относительно жесткой литосферой и низкоградиентными тепловыми потоками [33-35]. В пределах таких площадей положение проявлений контролируется коровыми структурами, многие кимберлитовые поля связаны с разноранговыми дизъюнктивными нарушениями и структурными зонами. Мантийный материал представлен ксенолитами ультраосновных, щелочно-ультраосновных и основных пород и ксенозернами минералов из них – алмазом, пиропом, пикроильменитом, хромшпинелидом, оливином, клинопироксеном, ортопироксеном, флогопитом, редко – цирконом, апатитом, титанклиногумитом. Перечисленные минералы устойчивы в широком диапазоне PT-условий: от стабильной кристаллизации алмаза до метастабильного состояния пиропа. Расплавленный мантийный материал раскристаллизован в условиях земной коры в виде мезостазиса, в состав которого входят выделения минералов второй генерации – оливин II, хромшпинелид II, ильменит II, флогопит II, а также монтичеллит, клинопироксен, рутил, перовскит и кальцит. Коровой составляющей кимберлитов является: а) ксеногенный материал пород, вмещающих кимберлиты; б) материал, перенесенный в кимберлиты из окружающей среды постмагматическими растворами. С минералогической точки зрения кимберлиты отвечают порфировым щелочным перидотитам [36–39], содержащим избыточный фенокристовый оливин (обычно замещенный серпентином или карбонатом) и флогопит в мелкозернистой основной массе, сложенной кальцитом, оливином (псевдоморфозами по нему) и флогопитом, иногда другими минералами. Особенно представительный материал получен в последнее 30-летие в связи с детальной разведкой и отработкой ряда важнейших коренных месторождений алмазов. В этот же период изучение вещественного состава кимберлитовых пород шагнуло от «стандартного» петрографо-минералогического и петрохимического изучения на новый качественный уровень в связи с появлением современных прецизионных методов исследования вещества (микрорентгеноспектральный, высокоразрешающие электронная микроскопия и рентгенография, изотопия, оптико-спектроскопический и рентгенофлуоресцентный анализы, ИК-спектроскопия и т. д.). Заметным вкладом в изучение минерального состава кимберлитов региона стало внедрение в практику регулярных лабораторно-аналитических работ рентгенофазового анализа [40–43], использование которого в течение 30 лет позволило вести успешную диагностику всего многообразия вторичных минералов, составляющих более 90 % объема пород. Исследования приобрели более разносторонний и углубленный характер. Наряду с этим, заметно повысило интерес к изучению коренных источников алмазов открытие трубок Накынского кимберлитового поля (НКП), проявивших признаки аномальности в минералого-геохимическом отношении, разведка глубоких горизонтов коренных месторождений алмазов и эксплуатация ряда уникальных

диатрем, что обусловило появление громадного массива разнообразных первичных данных, которые получены и проанализированы в рамках проводимых тематических исследовательских работ.

Результаты и их обсуждение

Диатремы кимберлитов характеризуются обычно специфическими физико-механическими [44–49], петрофизическими (рис. 1, 2) свойствами, многофазным строением с распространением пород не менее двух фаз внедрения: первой – гипабиссальной, представленной порфировыми кимберлитами (ПК), и второй – вулканической, сложенной разнообразными кимберлитовыми брекчиями (КБ), различающимися по алмазоносности. Важное значение имеет выявление различий между фазами внедрения по составу образований основной массы и индикаторных минералов кимберлитов – ИМК (пиропа, хромшпинелидов, пикроильменита), глубинных ксенолитов и петрогенных оксидов (SiO_2, TiO_2, FeO, MgO, CaO, K_2O, Cr_2O_3). Актуальной составной частью научных исследований коренных месторождений алмазов является изучение парагенезисов ИМК и ксенолитов мантийных пород, а также широкого спектра вторичных минералов, количество которых составляет порядка 80, что в итоге способствует решению ряда теоретических и практических вопросов. К главным особенностям кимберлитовых диатрем можно отнести: отсутствие больших объемов вытесненных пород и плутонических комплексов; специфика петрографо-минералогических и петрогеохимических признаков (относительно других ультраосновных пород); преимущественно морковкообразная форма (типа перевернутого конуса); спектр вулканических образований, характеризующих трехфациальный разрез (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и отличающихся между собой; насыщенность летучими при высокой доле CO_2; относительно низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов; присутствие слабораскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения; наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород, при наиболее угловатой форме последних; присутствие алмазов; примеры перехода диатрем в дайки; признаки взрывного генезиса; наличие дотрубочных, синтрубочных и посттрубочных даек; отсутствие термометаморфизма; широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями.

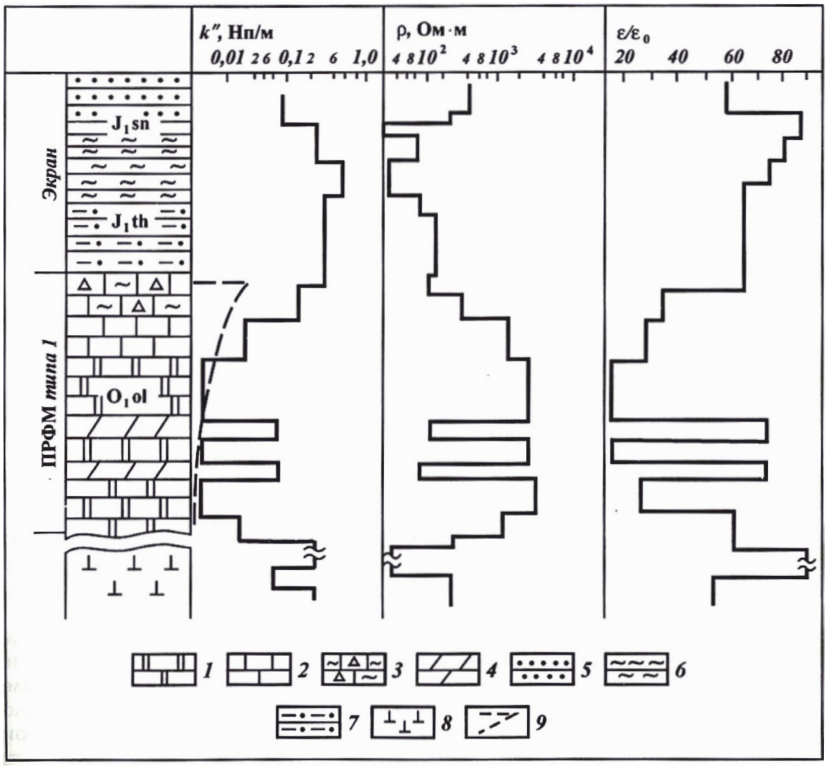


Рисунок 1. Обобщающая петрорадиоволновая физическая модель (ПРФМ) типа 1 – экранированное анизотропное полупространство НКП: 1 – доломиты; 2 – известняки; 3 – измененные карбонатные породы; 4 – мергели; 5 – пески; 6 – аргиллиты и алевритистые глины; 7 – глинистые алевролиты; 8 – кимберлиты; 9 – условный контур кимберлитовой трубки.

Условные обозначения: к"- коэффициент поглощения энергии электромагнитных волн; ρ – удельное электрическое сопротивление на постоянном токе; ε/ε₀ – значения относительной диэлектрической проницаемости.

Figure 1. The summarising petro-radiowave physical model (PRPM) of type 1 – screened anisotropic half-space of the Nakyn kimberlite field: 1 – dolomites; 2 – limestones, 3 – modified carbonate rocks; 4 – marls; 5 – sands; 6 – argillites and aleurite-like clays; 7 – clay aleurolites; 8 – kimberlites; 9 – conditional contour of kimberlite pipe.

Symbols: к" – energy absorption coefficient of electromagnetic waves; ρ – direct-current specific electric resistance; ε/ε₀ – relative permittivity values.

Петрографическая классификация кимберлитов была и остается одним из наиболее дискуссионных разделов в проблеме изучения этих своеобразных пород. Не ставя своей целью проводить в данной работе критический анализ этого направления, следует все же отметить, что основным недостатком существующих принципов классификации, по нашему мнению, является использование генетического подхода во многих из них, что само по себе включает много спорных элементов с учетом различной трактовки происхождения. С нашей точки зрения, наиболее аргументированными с петрографических позиций являются классификации кимберлитов, разработанные отечественными учеными [50–54]. К общепризнанным позициям следует отнести выделение основных текстурных типов пород – массивных (порфировых) и брекчиевых или брекчированных (эруптивные брекчии) кимберлитов. *В порфировых кимберлитах* (ПК) гипабиссальной или субвулканической фации порфировое строение определяется вкрапленниками оливина или псевдоморфозами по ним, а основной массой служит микрозернистая или скрытокристаллическая серпентин-карбонатная смесь с микролитами оливина, монтичеллита, перовскита, флогопита, апатита, ильменита и магнетита, при обычном

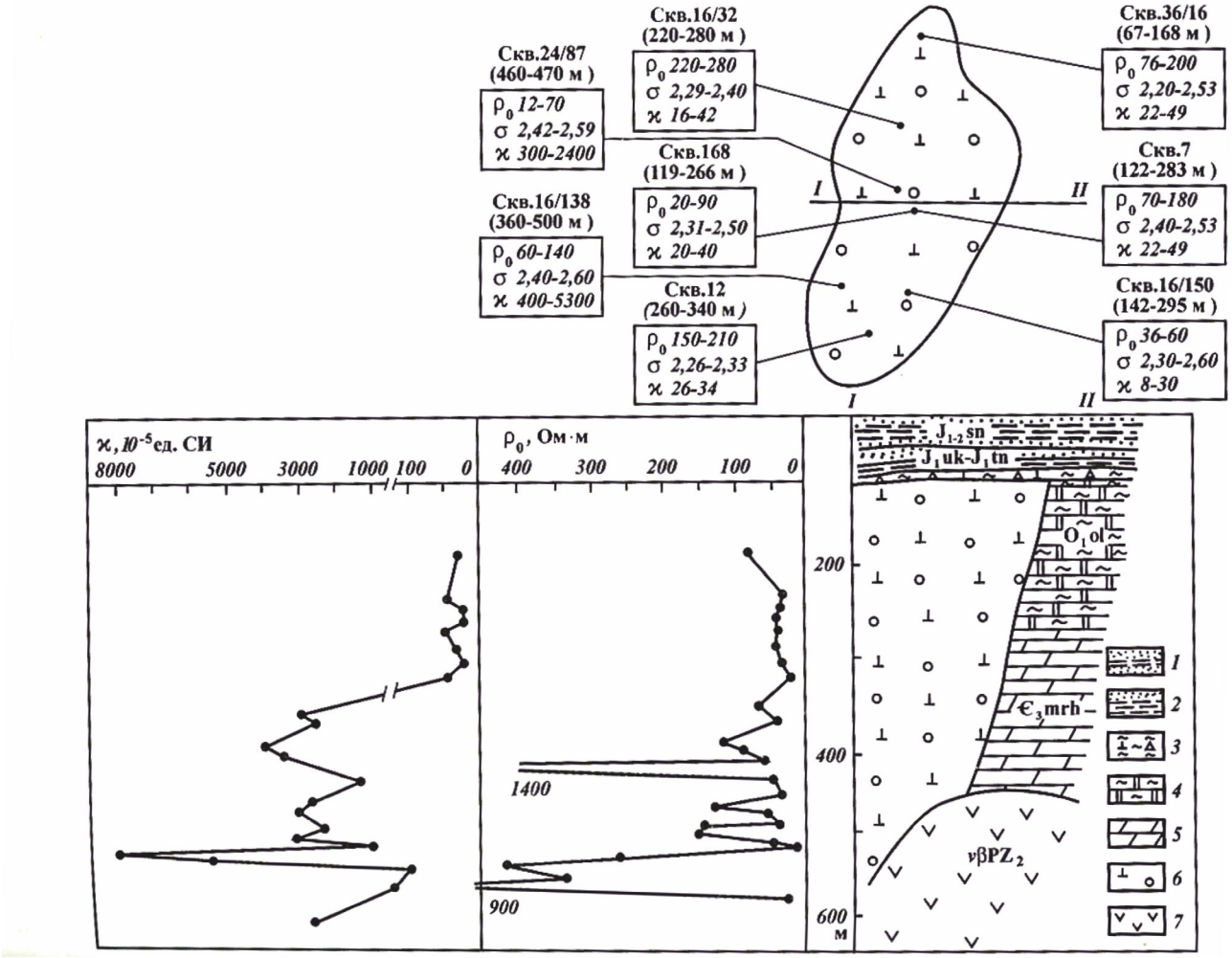


Рисунок 2. Параметрическая петрорадиоволновая физико-геологическая модель кимберлитовой трубки Нюрбинская: 1–3 – перекрывающие породы мезозоя: 1 –аргиллиты, алевролиты и песчаники сунтарской свиты; 2 – песчаники, алевролиты тюнгской и укугутской свит (нерасчлененные); 3 – карбонатные глины со щебнем доломитов, кимберлитов, интенсивно выветрелые средне-верхнетриасовые алевролиты; 4–5 – вмещающие породы: 4 – доломиты с прослоями плоскогалечных конгломератов, известняков и алевролитов олдондинской свиты; 5 – известняки, мергели, доломиты с прослоями песчаников и аргиллитов мархинской свиты; 6 – автолитовые кимберлитовые брекчии; 7 – базитовая интрузия щелочного состава, внедрившаяся в кимберлитовое тело. Распределение удельного электрического сопротивления на постоянном токе (ρо) и магнитной восприимчивости (х) кимберлитов приведены по разведочной скважине 16/138.

Figure 2. Parametric petro-radiowave physical-geological model of the Nyurbinskaya kimberlite pipe: 1–3 – overlying rocks of the Mezozoic: 1 – mudstones, siltstones and sandstones of the Suntarskaya suite; 2 – sandstones, siltstones of the Tyungskaya and Ukugutskaya suites (undifferentiated); 3 – carbonate clays with broken dolomites, kimberlites, intensely weathered Middle and Upper Triassic siltstones; 4–5 – host rocks: 4 – dolomites with interlayers of flat-pebble conglomerates, limestones and siltstones of the Oldondinskaya suite; 5 – limestones, marls, dolomites with interlayers of sandstones and argillites of the Markhinskaya suite; 6 – autolyte kimberlite breccia; 7 – basite intrusion of alkaline composition, embedded into the kimberlite body. The distribution of direct-current specific electrical resistance (ρo) and kimberlite magnetic susceptibility (x) is given for the exploration well 16/138.

присутствии акцессорных вкрапленников пиропов, хромитов, пикроильменитов и пироксенов. В основу выделения структурных разновидностей этого типа кимберлитов положены особенности строения (форма, величина, содержание, характер распределения породообразующих вкрапленников) и количественные соотношения микролитов и серпентин-карбонатных образований в основной массе. Примечательно выделение двух (а иногда и трех) генераций оливина и флогопита, а в основной массе пород фиксируется варьирующее количество мелких (до пылевидных) выделений магнетита, кристалликов перовскита, апатита, вторичной слюды, кальцита и сульфидов. Для разделения породообразующих минералов-вкрапленников по стадиям (генерациям) кристаллизации используются размеры и морфологические особенности: собственно кимберлитовому этапу кристаллизации отвечают относительно мелкие (до 1–2 мм) кристаллы второй генерации с отчетливо выраженной кристаллографической огранкой, а первая (протокимберлитовая) генерация представлена обломочными выделениями, крупнее указанных размеров. Необходимо отметить, что ПК свойственно относительно равномерное распределение минералов-вкрапленников, а также рудных минералов и перовскита на фоне карбонат-серпентиновой основной массы. Иногда в дайках или корневых зонах диатрем проявляется сегрегационная структура (шаровидные сегрегационные кимберлиты корневых зон), которая описана в литературе [55–59] при характеристике вскрытых шахтами корневых зон кимберлитовых трубок (Премьер и др.). В этих породах кристаллизация силикатов и оксидов происходила как сегрегация различных по величине капель, что могло происходить в гипабиссальной среде.

Проявление брекчиевой текстуры и наличие заметного (более 7–10 объем.%) количества обломков пород рамы (чехла и фундамента) и макрокристов мантийных минералов служат признаком эруптивно-обломочных пород и являются основанием для выделения эруптивных *кимберлитовых брекчий* (ЭКБ) или просто кимберлитовых брекчий – КБ (или брекчий с массивной текстурой цемента [60–64]). Наличие в последних макро- или микровключений «кимберлит в кимберлите» (автолитов) позволяет выделять группу *автолитовых кимберлитовых брекчий* (АКБ). Кроме автолитов примечательны спорадически встречающиеся такситовые текстурные неоднородности в кимберлитах (атакситы и эвтакситы), которые могли возникать [65–69] в расплаве вследствие неравномерного распределения в нем воды. Следовательно, в ПК неоднородного строения можно наблюдать эвтакситовую и атакситовую текстуры, а среди ЭКБ, наряду с автолитовой, можно выделить атакситовую и эвтакситовую текстурные разновидности. В отдельных диатремах СП диагностирован также в незначительном количестве [70–72] монтичеллитовый кимберлит. По размеру обломков КБ разделяются на крупно-, средне- и мелкообломочные, а по характеру кимберлита-цемента выделяются порфировая, кластопорфировая, автолитовая (или лавокластическая) и литокристаллокластическая (лавокристаллокластическая) структуры. Упомянутые выше петрографические типы кимберлитов двух фациальных групп являются общепризнанными. Они лежат в основе геолого-технологической типизации разведуемых блоков месторождений и особых возражений, кроме применения или не применения вулканологической терминологии, не вызывают. Гораздо больше дискуссионных вопросов связано с диагностикой и классификацией кимберлитовых пород кратерной части (трубки Юбилейная, Краснопресненская, имени Одинцова на СП). Примечательно, что выделение самих кратеров как морфологических элементов признается как несомненный факт, а наименование заполняющих кратеры отмеченных трубок пород нашло несколько вариантов, среди которых основными являются флюидизаты [20–23]. К кратерным образованиям целесообразно применять терминологию и классификацию вулканических пород [53–55] с выделением эксплозивно-обломочной, осадочно-вулканокластической, вулканогенно-осадочной и осадочно-кластической групп пород. Правомочность этого была подтверждена нами при изучении кимберлитовых диатрем северо-востока Анголы [5–8]. Группа эксплозивно-обломочных пород представлена: а) *туфами* и *туфобрекчиями*, состоящими из кластического материала кимберлитов без существенных примесей; б) *ксенотуфами* и *ксенотуфобрекчиями*, содержащими примесь обломков чуждых пород разной размерности в количестве менее 50 %. Туфобрекчии – брекчиевые кимберлитовые породы, образованные в результате уплотнения и цементации неотсортированного грубообломочного рыхлого угловатого или слабо окатанного вулканокластического материала, погруженного в более мелкозернистый туфовый цемент. Туфы образуются из твердых продуктов кимберлитовых извержений и фрагментов вмещающей среды, впоследствии уплотненных и сцементированных. Породы разделяются по размеру доминирующих обломков на: грубообломочные (агломератовые), крупнообломочные (псефитовые), среднеобломочные (псаммитовые), тонкообломочные (алевритовые), а по характеру обломков – на литокластические (из обломков пород), кристаллокластические (из кристаллов и их обломков), встречающиеся редко, и смешанные кристаллолитокластические, наиболее распространенные. Диагностика и, как следствие, выделение кимберлитовых туфов (и туффизитов) не всегда просты – наиболее надежным признаком их распознавания являются наличие горизонтальной слоистости и геологическое положение. Туфы обычно имеют ограниченное распространение, но в слабо эродированных полях, характерных для провинции Лунда Норте в северо-восточной части Анголы, они входят в виде отдельных слоев в состав горизонтально залегающих вулканогенно-осадочных толщ кимберлитового состава или фрагментов туфовых воротников по обрамлению кратеров и, по нашему мнению, их принадлежность к кимберлитовым туфам несомненна. В ряде случаев, при наблюдении резких контактов с другими породами, их правильней было бы назвать *туффизитами* – интрузивными туфами. Иногда интенсивная гидротермальная цементация пород придает породам облик кимберлитовых брекчий и на принадлежность к туфам могут указывать слоистые текстуры и хлорит-гидрослюдистый характер цемента. В отдельных образцах эксплозивно-обломочных пород, в отличие от автолитов, содержащих то или иное количество фенокристаллов и микролитов оливина и флогопита, отмечаются округлые кимберлитовые включения афировых и спорадофировых кимберлитов с серпентин-карбонатным базисом, которые схожи с бомбами и лапиллями (гипобомбами), так как состоят в основном из аповитрофирового материала. Подобные породы отмечены в разрезах верхних частей трубок Анголы и отнесены к кимберлитовым туфобрекчиям. При нахождении данной разновидности кимберлитов в диатремовой фации или в составе пластических инъекционных даек их следует относить к туффизитам. Здесь следует согласиться с имеющимися мнениями [23–26], что данные породы образовались в процессе взрывов магмы в подводящем канале ниже дневной поверхности. Очевидно, что такие разновидности являются полигенными. Осадочно-вулканокластические породы наименее распространены в кимберлитовых постройках и представлены *туффитами*. Последние, наряду с выброшенным при извержении пирокластическим кимберлитовым материалом, в отличие от ксенотуфов и ксенотуфобрекчий, содержат [28–32] примесь не гетерогенных обломков, а только осадочных (вмещающих) пород в количестве менее 50 % (пирокластического материала – 50–90 %). Эта разновидность кимберлитовых пород по текстурно-структурным и другим особенностям ничем не отличается от туффитов других вулканических формаций: по размеру пирокластического материала выделяются псефитовые, псаммитовые, алевритовые и пелитовые разновидности. Цемент может быть карбонатным, монтмориллонитовым, хлоритовым, хлорит-гидрослюдистым и т. д.

В группу вулканогенно-осадочных пород входят вулканокласто-осадочные, тефроидные и вулкано-терригенные образования с содержанием осадочного материала более 50 %. Из этих трех типов среди кимберлитовых пород пока реально можно выделить только вулканокласто-осадочные, в которых кимберлитовый материал (40–20 % и менее) присутствует в виде обломков брекчий, автолитов, зерен минералов-спутников и т. п., а также трудно диагностируемые вулкано-терригенные породы. Среди первых по размерам и характеру обломочного материала выделяют [33–35] туфоконгломераты, туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты. Вулкано-терригенные породы состоят из окатанных и отсортированных обломков вулканических пород, образующихся за счет разрушения вулканитов. Они не синхронны извержению и накапливаются после нивелировки вулканической постройки при разрушении вулканических пород жерла (кратера) или тефроидов, с их перекрытием. Тефроидные породы кимберлитовой природы пока не обнаружены, но они предусмотрены в классификации, так как их выбросы, сцементированные гидрохимическим веществом, могут служить прототипом кимберлитовых туфов и туфобрекчий, сохранившихся в отрицательных формах рельефа на различном расстоянии от диатрем. Вулкано-терригенные породы по существу являются одной из генетических разновидностей россыпей ближнего сноса с характерными для них признаками. Среди таковых особое значение имеют прямая и обратная микроцикличность, где наиболее продуктивными будут грубообломочные образования в первом случае. В связи с очень быстрой дезинтеграцией кимберлитов в экзогенных условиях и обычной эродированностью наземных и верхних частей кимберлитовых вулканов, в большинстве известных кимберлитовых провинций вулкано-терригенные отложения перемыты или подвергнуты глубоким изменениям в КВ и поэтому трудно распознаваемы. Представляется целесообразным к этой группе пород относить и туфобрекчии со слоистыми текстурами. Последнюю группу (осадочно-кластических образований) представляют синхронные и несинхронные вулканизму образования, сформировавшиеся преимущественно после предыдущих пяти групп и включают спектр разнофациальных осадочных отложений с различной гранулометрией частиц. Большинство из них выделяются под названием «эпикластические отложения», которые включают спектр осадочных образований с содержанием кимберлитового материала менее 1–2 % (например, песчаники с примесью кимберлитового материала), гетеролитовые брекчии с содержанием кимберлитового материала менее 1–2 %, состоящие из обломков пород геологического разреза района. В завершение петрографической систематики кимберлитовых пород следует отметить их типизацию на основании роли слюды, по количеству которой кимберлиты разделяются на два минералогических типа: базальтоидный и слюдяной (лампрофировый) с последующим выделением в каждом типе отмеченных выше текстурных разновидностей – массивных (порфировых) кимберлитов, кимберлитовых брекчий, туфов и туфобрекчий. Указанным двум типам кимберлитов отвечают, в принципе, две группы кимберлитов, выделяемых на Африканской платформе, – I и II соответственно. Анализируя распределение отмеченного спектра кимберлитовых пород в объеме диатрем СП видно, что пирокластические кимберлитовые туфы и туфобрекчии слагают верхние части кратеров, образуя тела мощностью от 30–35 м (трубка Одинцова) до 230–250 м (трубка Юбилейная). В последнем случае толща пирокластических образований была нарушена более поздней фазой внедрения АКБ. Эпикластический туфогенный кимберлитовый материал достоверно установлен [1–5] в кровле кратера трубки Краснопресненская в виде прослоев и линз в терригенных породах тегерюкской свиты нижнего карбона.

В промышленных месторождениях алмазов АКБ характеризуется [36–39] наибольшей продуктивностью (трубки Мир, Интернациональная, Ботуобинская, Нюрбинская, Айхал, Юбилейная, Удачная и др.) по сравнению с ПК гипабиссальной фазы, а в средне- и низкоалмазоносных трубках наблюдается обратная закономерность (трубки Заполярная, Комсомольская-Магнитная, Дальняя, Искорка и др.). По характеру взаимоотношений субвулканической (гипабиссальной) и вулканической фаз заполнения диатрем в пределах кимберлитовых полей СП можно выделить [50–52] три группы трубок: 1) кимберлитовые тела, где ПК субвулканической фазы образуют самостоятельные рудные столбы, при примерных объемных соотношениях с АКБ вулканической фазы 1:1 (трубки Заполярная, Байтахская и др.), 1:2 (Дальняя, Сытыканская, Молодость и др.), 1:4 (Юбилейная, Ботуобинская, Удачная), 1:10 (Комсомольская, Геофизическая и др.); 2) трубки, в которых ПК присутствует в АКБ в виде многочисленных обломков и отдельных крупных (десятки метров) блоков, не образуя рудных столбов (трубки Краснопресненская, Кылахская, Восток, Мир, Нюрбинская и др.), а объемная доля порфирового кимберлита относительно АКБ варьирует от 1:30 до 1:100; 3) кимберлитовые тела, где ПК присутствуют в КБ в виде многочисленных мелких обломков (трубки им. 325 лет Якутии, Мархинская, Заря, Маршрутная, Ленинградская, Зарница, Якутская, Долгожданная и др.). Промышленные содержания алмазов фиксируются в трубках первой и второй групп, а третья группа представляет низкоалмазоносные кимберлитовые трубки. Необходимо отметить важность оптико-микроскопического изучения основной массы кимберлитовых пород, что позволяет детализировать минералогические особенности и показатели эволюции выделяемых типов и разновидностей кимберлитов. В процессе таких исследований выделены монтичеллитсодержащие кимберлиты центральных районов провинции (трубки Удачная Восточная, Дальняя, диатремы Верхне-Мунского поля-ВМКП и др.), которые являются алмазоносными, в том числе промышленно значимыми. Монтичеллит – характерный минерал для многих среднепалеозойских кимберлитовых тел СП и его распространенность в них, прежде всего, определяется степенью вторичного преобразования пород. Монтичеллиты из кимберлитовых тел северных и южных полей широко перекрываются по составу. С другой стороны, в пределах одной сложнопостроенной кимберлитовой трубки (напри-

мер, Удачная-Восточная) монтичеллиты в кимберлитах отдельных фаз внедрения могут резко отличаться по геохимии микроэлементов и составу. Высокомагнезиальные монтичеллиты (Mg/(Mg+Fe)=92–97 %) из кимберлитов (трубки Дальняя, Новинка и др.) имеют метасоматический генезис. Среди достаточно широкого спектра кимберлитовых и комагматичных им пород СП слюдяные кимберлиты с диопсидом в основной массе встречаются реже, чем монтичеллитовые разновидности пород. Отдельные тела, сложенные подобными породами, наиболее распространены в северной части СП, а в южной подобные образования встречаются в виде отдельных обломков в диатремах (Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Таежная) и слагают небольшие по размеру трубки или отдельные фазы в них (трубки Загадочная, Буковинская).

Типизация кимберлитов промышленно алмазоносных полей по *петрографо-минералогическим* и *геохимическим* признакам с выделением монтичеллитовых и диопсид-флогопит-оливиновых разновидностей позволила проследить в общем виде эволюцию родоначальных кимберлитовых расплавов от периода, предшествовавшего образованию диатрем, до заключительного этапа, связанного с образованием внутритрубочных жил и инъекций. На начальном субвулканическом этапе формирования южных кимберлитовых полей происходило формирование даек, затем – штоков, реже – образование отдельных трубочных тел, выполненных породами, которые мы обычно наблюдаем в виде обломков слюдяных кимберлитов. Исходя из состава этих кимберлитов и минералов, их слагающих, видно, что первые порции расплава были обогащены [40-43] кремнием, титаном, алюминием, щелочами, железом и обеднены магнием. В соответствии с этим, образованные породы по ряду особенностей (в частности, присутствию в них высокотитанистых флогопитов и титанистых диопсидов) конвергентны лампрофирам или оливиновым лампроитам. Присутствие в расплаве достаточного количества щелочей, воды и кремнезема способствовало массовой кристаллизации флогопита, в результате чего кристаллизующиеся на заключительных стадиях рудные минералы обеднены алюминием, содержание глинозема в них не превышает 0,6 %. Дальнейшая эволюция расплава связана с накоплением летучих и кальция и формированием кимберлитов дотрубочных жил, штоков и разновидностей кимберлитовых брекчий. Крупнейшая трубка СП – Юбилейная – является уникальным кимберлитовым телом и в геологическом отношении: она характеризуется полным набором морфологических элементов - подводящей дайковой корневой системой, диатремой и кратерным чашеобразным расширением. В пределах ее восточной части выделены три самостоятельные фазы образования кимберлитов (крупнопорфировый, дейтеропорфировый кимберлит и брекчия расщепления), отличающиеся между собой по текстурно-структурным, минералого-геохимическим признакам и алмазоносности. По контактовым взаимоотношениям между выделенными фазами кимберлитов установлена их последовательность формирования. На начальном субвулканическом этапе, предшествующем образованию трубки, происходило формирование дайковых кимберлитовых тел, сложенных слюдистым крупнопорфировым кимберлитом, конвергентным по ряду вещественных признаков лампрофирам или оливиновым лампроитам. Дальнейшая эволюция кимберлитового расплава, связанная с процессами фракционной кристаллизации, флюидно-магматической дифференциации, а также захватом расплавом коровых и осадочных пород, привели к образованию различных брекчиевых кимберлитовых пород.

Выявлено своеобразие вещественного состава кимберлитов трубки Загадочная Далдынского поля (ДКП), которое заключается [44–46] в следующих особенностях: 1) значительном количестве гроспидитов, дистеновых эклогитов и практически полном отсутствии ультраосновных включений в породе; 2) резком преобладании граната (главным образом, эклогитового парагенезиса) и хромита над пикроильменитом, который характеризуется повышенными концентрациями Cr_2O_3 и MgO; 3) высоком содержании в породе клинопироксена, образующего по составу широкий ряд от хромдиопсидов до кальциевых диопсидов; 4) прямой зональности вкрапленников флогопита, по характеру аналогичной с зональностью таковых из лампроитов; 5) ярко выраженной индивидуальности по содержанию микроэлементов (особенно некогерентных и радиоактивных). По минералого-петрографическим и геохимическим особенностям кимберлит трубки Загадочная проявляет сходство с оливин-флогопитовыми лампроитами, а также слюдяными кимберлитами, встречающимися в виде обломков в ряде других трубок (Удачная, Сытыканская и др.).

Сопоставление химических составов кимберлитов НКП с петрохимическими типами кимберлитов СП по данным факторного анализа показывает, что кимберлиты этого региона в целом относятся к магнезиальным и кальцит-магнезиальным типам. При этом, наиболее карбонатизированными являются кимберлиты трубки Нюрбинская. Следует отметить, что, несмотря на присутствие в переменных количествах флогопита в кимберлитовых брекчиях и порфировых кимберлитах НКП, они не попадают в поле типичных слюдяных петрохимических типов кимберлитов трубок Загадочная, Юбилейная, Удачная. Для кимберлитов НКП характерны низкие содержания оксидно-рудных минералов и очень редкая встречаемость перовскита.

С ранним этапом проявления кимберлитового магматизма в ДКП связано формирование жильных тел, выполненных слюдяным кимберлитом с пироксеновой основной массой и кальцитовым кимберлитом, содержащим переменное количество флогопита. Вслед за кимберлитовыми жилами, часто наблюдаемыми в трубках, образовались штокообразные тела, сложенные монтичеллитовым массивным кимберлитом и слюдистой разновидностью, близкой по вещественному составу кальцитовому кимберлиту жил. Особенности внутреннего строения многофазных трубок свидетельствуют о том, что многие кимберлитовые жилы и дайки являлись «слепыми» и образовались на значительных глубинах от дневной поверхности. Принимая во внимание вышеуказанные данные, а также

последовательность формирования разнообразных по вещественному составу кимберлитов во многих многофазных трубках ДКП, можно предполагать проявление не менее двух этапов кимберлитового магматизма в пределах рассматриваемого района. Проявление основного объема кимберлитового материала в виде образования отдельных трубок, жил или самостоятельных фаз кимберлитов в уже сформировавшихся диатремах происходило во второй этап кимберлитового магматизма. Разница по возрасту отдельных фаз внедрения внутри одной трубки, по геологическим наблюдениям и радиологическим данным, может достигать 15–20 млн лет. Установленные типы кимберлитов и комагматичные им породы многофазных трубок резко отличаются между собой по количеству, соотношению и типохимизму протоминералов, а также по алмазоносности (содержанию, типоморфизму крупных и мелких кристаллов).

Весьма важный составной компонент кимберлитов – это *ксенолиты мантийных пород*, которые являются главнейшим источником информации о составе глубинных зон Земли и играют определяющую роль для расшифровки процессов кимберлито- и алмазообразования. К настоящему времени усилиями многих исследователей наработан обширный фактический материал по вещественному составу распространенных мантийных парагенезисов, выносимых кимберлитами к поверхности в виде глубинных ксенолитов, прежде всего, по их геохимии и составу породообразующих минералов. В значительно меньшей степени проводились изотопно-геохимические исследования, которые, тем не менее, дали важнейшие результаты относительно возраста мантийных пород и особенностей двух главных процессов в глубинах Земли – мантийного метасоматоза и частичного плавления мантийных субстратов, приводящих к появлению проторасплавов, кристаллизующихся затем в виде широкого спектра алмазоносных кимберлитов и родственных пород. Глубинные ксенолиты в кимберлитах представляют три семейства пород [46–48]: ультраосновные, основные и промежуточные при заметном преобладании в большинстве трубок первых, включающих дуниты (гранат+ оливин+шпинель±алмаз), верлиты (гранат+оливин+клинопироксен+шпинель), гарцбургиты (гранат+оливин+ ортопироксен±алмаз), лерцолиты (гранат+оливин+клинопироксен+ ортопироксен+шпинель), ильменитовые перидотиты (гранат+оливин+ильменит+ортопироксен±клинопироксен± флогопит), вебстериты (гранат± клинопироксен+ ортопироксен). По текстурно-структурным признакам они подразделяются на равномерно-зернистые (крупно- и среднезернистые гранобластовые или пойкилобластовые [43–45], и порфировые (порфировидные). На основании всестороннего изучения ультраосновных нодулей их разделяют на две группы: магнезиальные и магнезиально-железистые. Последняя группа объединяет ильменитсодержащие разновидности. Основные породы в ксенолитах представлены магнезиально-железистыми, магнезиальными (нередко с энстатитом), дистеновыми и корундовыми эклогитами, гроспидитами. Иногда [49–51] акцентируется внимание на особую роль гранатов и пироксенов при анализе особенностей состава минералов перидотитов, что вызвано равновесием между ними в зависимости от температуры и давления. Среди гранатсодержащих ксенолитов ультраосновного состава этими исследователями выделяются следующие ассоциации: 1) пироп+оливин, 2) пироп+оливин+энстатит, 3) пироп+оливин+ энстатит+диопсид, 4) пироп+оливин+диопсид, 5) пироп+энстатит+диопсид, 6) пироп +диопсид при наличии акцессорных шпинелидов в большинстве ассоциаций и наиболее широком распространении третьей ассоциации с вариациями компонентов, а также пятой ассоциации. Перечисленные ассоциации устойчивы в широком диапазоне температур и давлений и охватывают графит-пироповую и алмаз-пироповую фации глубинности в соответствии с фазовой границей графит-алмаз [7–9]. Алмаз-пироповая фация включает алмазсодержащие и потенциально алмазоносные (по составу минералов идентичные алмазоносным) минеральные ассоциации: дуниты, верлиты, гарцбургиты и лерцолиты, а также гранатовые пироксениты и ильменитовые перидотиты. Примечательно, что, несмотря на меньшую распространенность эклогитовых ксенолитов, их находки с алмазами более часты, чем перидотитовые. Данные по предельному содержанию хромовой компоненты и примеси натрия в гранатах, а калия в пироксенах – из парагенезисов алмаз-пироповой фации глубинности, указывают на их кристаллизацию при давлениях от 45–50 до 60–70 кбар [53–55], что отвечает глубинам 150–230 км.

Анализ распределения мантийных нодулей в кимберлитах СП показывает, что для южной части региона примечательны высокомагнезиальные гранатовые перидотиты и пироксениты, которые определяют специфику всей популяции мантийных ксенолитов в трубке Мир. Преобладающие здесь гранатовые перидотиты представлены типичными для кимберлитов двупироксеновыми парагенезисами, довольно сильно истощенными магмофильными компонентами. Среди пироксенитов также преобладают двупироксеновые парагенезисы, преимущественно вебстериты. Редкие гранатовые клинопироксениты сходны с эклогитами по минеральному составу, но отличаются от них высокой магнезиальностью и повышенной хромистостью силикатов, наряду с низким содержанием жадеитовой молекулы в клинопироксенах. Наиболее глубинные породы в пределах Мирнинского кимберлитового поля (МКП) представлены катаклазированными гранатовыми перидотитами; к ним по глубинности, вероятно, близки ильменит-гранатовые верлиты с порфирокластическими структурами, а также дискретные нодули (мегакристы) низкохромистой серии (титановая ассоциация вкрапленников). Тенденция обогащения титаном и железом характеризует процессы мантийного Fe-Ti метасоматоза у нижней кромки литосферы. В поле стабильности алмаза, вероятно, могут быть распространены мегакристаллические алмазоносные дунит-гарцбургиты (в трубке Мир их находки пока редки), а также алмазоносные эклогиты и пироксениты. Над уровнем алмазосодержащих пород залегают недеформированные гранатовые перидотиты, переслаивающиеся с пестрыми по составу гранатовыми пироксенитами. Эта наиболее широко распространенная

в трубке группа пород была равновесна в поле устойчивости графита, при относительно низких температурах. Наименее глубинный мантийный слой в трубке Мир представлен шпинелевыми и переходными гранатизированными шпинелевыми перидотитами и пироксенитами. В трубке Удачная мантийные нодули представлены широким спектром пород, наиболее глубинными среди которых являются деплетированные в архейское время мегакристаллические перидотиты, которые, вероятнее всего, являются материнскими для абсолютного большинства (более 90 %) алмазов этого региона [27–31]. В целом в кимберлитах данной диатремы, аналогично трубкам Мир и Сытыканская, отмечены практически все известные в кимберлитах СП разновидности ультраосновных и основных пород, но преобладающими являются [32–36] гранатовые лерцолиты порфиробластовые деформированные (более 39 % всех мантийных ксенолитов) и гранатовые лерцолиты (21 %). В трубке Сытыканская (Алакит-Мархинское поле – АМКП), как и в диатреме Мир, доминируют гранатовые лерцолиты, при значительной доле (15,3 %) шпинелевых лерцолитов [37–39]. Здесь же несколько выше (более 5 %) встречаемость эклогитов, ильменитовых перидотитов и ильменит-гранатовых перидотитов.

Мантийный разрез северной части провинции можно охарактеризовать по ксенолитам в кимберлитовой трубке Обнаженная – одной из наиболее богатых включениями глубинных пород, содержание которых достигает 2,5 об.% [40–43]. В трубке выделяются два небольших участка, насыщенные нодулями, причем в одном из них преобладают перидотиты, а в другом – эклогиты. Отмечаются повышенные содержания безгранатовых перидотитов и разнообразных гранат-пироксеновых пород. Встречаются также своеобразные гранатовые пироксениты, переходные по содержанию оливина от эклогита к перидотиту, часто отмечаются пироксениты и перидотиты с развитием граната вокруг зерен хромшпинелида. Отличие мантийного материала трубки Обнаженная от такового большинства других трубок СП, в которых гранатовые перидотиты резко преобладают над всеми остальными разновидностями глубинных нодулей, состоит в большом содержании гранатовых пироксенитов (38 %) и эклогитов (26 %). В трубке Обнаженная менее одной шестой глубинных нодулей приходится [51–54] на породы, образовавшиеся при умеренных давлениях шпинелевой фации, дуниты, перидотиты (лерцолиты, гарцбургиты) – около 3 % и пироксениты (энстатититы и вебстериты) – около 4 %, флогопитовые пироксениты и слюдиты, глиммериты, слюдистые перидотиты – около 8 %. К породам, сформировавшимся при более высоких давлениях, в зоне устойчивости пиропового граната, относятся гранатовые лерцолиты (9 %), пироксениты (40), эклогиты (13), ильменитсодержащие слюдиты, перидотиты и пироксениты (4), а также гранатизированные перидотиты и пироксениты, количество которых достигает 10 %. Общий спектр мантийных нодулей охватывает различные минеральные фации разреза верхней мантии, имеющие различные термодинамические характеристики.

Для создания корректной статистической базы термодинамических реконструкций комплексно (с привлечением прецизионных методов изучения элементного состава) исследованы [5–9] породообразующие и акцессорные минералы мантийных ассоциаций пяти кимберлитовых полей – ДКП, АМКП, ВМКП, МКП и НКП, включая трубки Зарница и Долгожданная, Комсомольская, Сытыканская и Айхал, Деймос, Заполярная и Новинка, Мир, Дачная и Интернациональная, Нюрбинская и Ботуобинская соответственно. Для многих трубок впервые на достоверных выборках изучена минералогия пироксенов. В выборках гранатов анализировались в основном пиропы из перидотитовых парагенезисов и пироп-альмандиновые гранаты эклогитовых парагенезисов, реже альмандины, которые отнесены к глубинным ассоциациям на основании находок алмазов в парагенезисах с гранатом такого типа в трубках НКП. Для обработки результатов анализов состава гранатов, помимо основной классификационной CaO-Cr_2O_3 диаграммы Н. В. Соболева [66], отражающей барофильные и парагенетические зависимости, использованы и другие диаграммы с отражением различных компонентов, к примеру TiO_2 и Na_2O (рис. 3), которые могут характеризовать процессы эволюции поднимающихся магматических расплавов. В результате получены материалы для сравнения отдельных районов и трубок по значимым выборкам. Анализировались гранаты из концентрата фракций +0,25–0,5 и +0,5–1,0, который отличается по составу от более мелкой фракции, где доля гранатов алмазной фации [23–26] значительно выше. Крупные пиропы чаще всего более богаты TiO_2 и соответствуют пироксенитовым ассоциациям или перекристаллизованным импрегнированным расплавом перидотитам. Помимо обычных прогнозных оценок алмазоносности кимберлитов по пиропам на диаграмме Cr_2O_3 – CaO, полезны также определения уровней концентрации расплавов, поскольку прогрев, сопровождающий внедрение расплавов, может способствовать росту алмазов хорошего качества [28–31]. Целесообразно рассмотреть особенности составов гранатов по соотношению оксидов хрома и кальция из различных полей и трубок с общим анализом тенденций распространения их основных парагенезисов. В составах гранатов из трубок ДКП проявляется тренд Cr_2O_3 – CaO в пределах лерцолитового поля, который для трубки Зарница обнаруживает [13–17] дискретный характер с разрывом в интервале 8–9 % Cr_2O_3. Гранаты пироксенитовых ассоциаций (с повышенной долей CaO, TiO_2 и Na_2O) слагают существенную долю тяжелого концентрата, образуя прерывистые линии смешения с перидотитовыми парагенезисами [18–21]. Количество групп обогащения соответствует четырем уровням концентрации расплавов. Гранаты из трубки Удачная отличаются тем, что тренд их составов трассирует границу с гарцбургитовым полем; доля пироксенитовых гранатов значительна, но они не столь контрастно отличаются по составу от перидотитовых, отражая процессы кимберлитообразования, что может быть вызвано «сглаживанием» границ за счет метасоматической проработки мантийной литосферы под трубкой [51]. Составы гранатов из кимберлитовых трубок АМКП обычно образуют протяженный тренд в пределах лерцолитового поля, а субкальцевые гранаты появляются в массовых количествах начиная с 6 % Cr_2O_3. В трубке

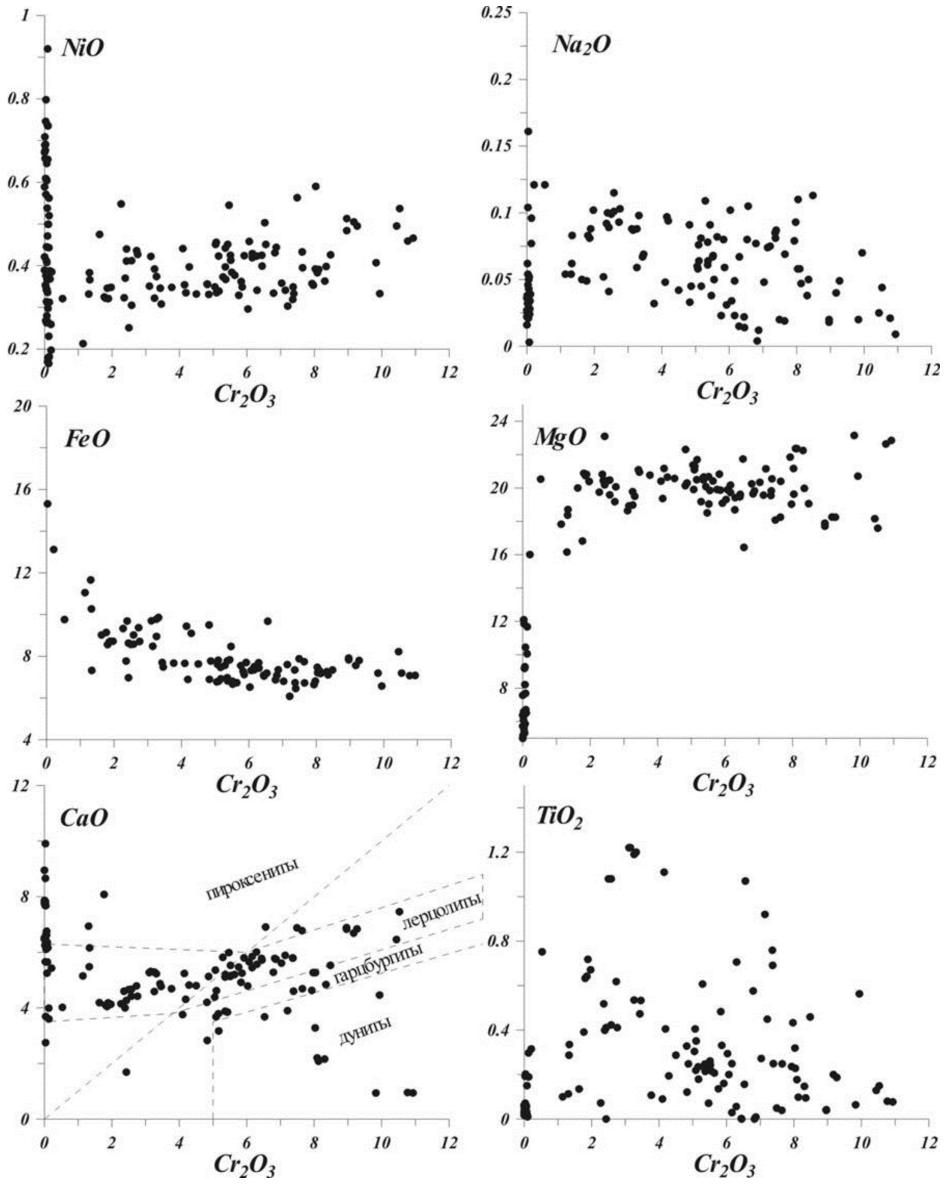


Рисунок 3. Особенности химического состава (мас.%) гранатов из кимберлитов трубки Ботуобинская НКП.
Figure 3. Chemical composition (wt.%) of garnets from kimberlites of the Botuobinskaya pipe of the Nakyn kimberlite field.

женный лерцолитовый тренд до 10–12 % Cr_2O_3 и параллельный ему в области гарцбургитовых составов; дунитовые парагенезисы с очень низкими содержаниями CaO встречаются при содержаниях Cr_2O_3 10–12 % в кимберлитах трубки Ботуобинская и редки в трубке Нюрбинская. Обоим телам свойственны алмазоносные парагенезисы с альмандином (~24-26% FeO), которые составляют нередко более 50 % тяжелых минералов.

Особого внимания заслуживает *хромдиопсид*, являющийся весьма чутким индикатором условий магмообразования. Он встречается практически во всех трубках, будучи, как и пироп, продуктом дезинтеграции мантийных перидотитов в основном из литосферной части мантии. Его реликты можно обнаружить даже в кимберлитах высокой степени серпентинизации; заметно увеличивается его количество в глубинных частях кимберлитовых трубок начиная с уровня 600 м и более. Составы хромистых клинопироксенов значительно варьируют в пределах трубок и между отдельными кимберлитовыми полями. Обычно хромистость положительно коррелируется с глубиной образования и степенью метасоматической проработки магматической колонны. Увеличение степени плавления перидотитов также приводит к увеличению хромистости, если в системе достаточно Na_2O. По составу клинопироксена существует резкая зональность в пределах Сибирской алмазоносной провинции (САП). Наиболее истощенные перидотиты установлены в кимберлитах ДКП, где присутствуют даже глубинные деформированные перидотиты, в которых образование клинопироксена связано с проработкой глубинными карбонатитовыми расплавами [49–53]. Вариации состава *клинопироксенов* из кимберлитов ДКП показывают, что более железистые (~ 4% FeO), но малохромистые клинопироксены в кимберлитах, отвечают гранат-шпинелевым и шпинелевым перидотитам. В трубках Долгожданная и Иреляхская глубинные Cr-диопсиды из перидотитов образованы в процессе магматического замещения силикатным железистым расплавом с уменьшением доли Cr_2O_3 и Na_2O. Силикатный расплав менее характерен для процессов алмазообразования, однако мо-

Сытыканская более хромистые гранаты менее обогащены кальцием, что вместе с содержанием TiO_2 и Na_2O может свидетельствовать об их пироксенитовом источнике из гранат-шпинелевой фации мантии. Гранаты из трубки Комсомольская также отличаются обогащением TiO_2 на уровне гранат-шпинелевого перехода и глубже (т. е. на двух уровнях), один из которых соответствует алмаз-пироповой фации глубинности. Субкальциевые гранаты характерны для глубинных минеральных парагенезисов трубки Юбилейная, при тенденции обогащения TiO_2 на уровне гранатовой и гранат-шпинелевой фаций верхней мантии. Наиболее богаты субкальциевыми гранатами кимберлиты трубки Айхал. В составах гранатов из трубок Верхне-Мунского поля (Заполярная, Новинка и Деймос) лерцолитовый тренд хорошо выражен лишь до 6,5 % Cr_2O_3, что наглядно видно на примере трубки Заполярная. Гранаты из кимберлитовых трубок НКП (особенно трубки Нюрбинская), на диаграмме Cr_2O_3 – CaO образуют протя-

жет способствовать перекристаллизации при разогреве вблизи контактовых зон. Самые хромистые пироксены (до 6 % Cr_2O_3) близки по составу к космохлору. Не менее пяти групп, выделяемых по уровню содержания Na_2O и Cr_2O_3, соответствуют слоистости в мантии и, возможно, отдельным пульсациям метасоматических процессов. Судя по редкой встречаемости перидотитов с характеристиками, близкими к таковым ДКП, процессу метасоматоза подвержена практически вся мантийная колонна в алмаз-пироповой фации. В трубке Айхал составы пироксенов очень близки к хромдиопсидам из трубки Юбилейная, но они несколько менее щелочные, в них больше разновидностей истощенного типа и железистых составов, особенно малоглубинных. Из экспериментальных данных известно о прямой зависимости содержания гейкилитового минала от давления [54–56]. При этом необходимо учитывать, что и сравнительно малоглубинные ильмениты из метасоматитов в мантийных перидотитах также могут быть магнезиальными – дополнительным показателем принадлежности к мантийным метасоматитам является повышенная хромистость *ильменитов* [13–16]. Исключением являются многие ксенолиты глиммеритов, особенно с существенно оливиновыми вмещающими породами, повышение содержаний хрома в которых часто не наблюдается. Аналогично ведут себя и многие ильменитсодержащие породы, которые, судя по термобарометрии, могут быть очень глубинными и образовываться вблизи основания литосферы, но также не отличаются повышенной хромистостью и чрезвычайно высокими содержаниями MgO. Анализ состава ильменита из различных кимберлитовых трубок, специфика распределения концентраций основных компонентов (TiO_2, MgO, NiO, Al_2O_3, FeO, Fe_2O_3, MnO, V_2O_5), а также высокозарядных элементов-примесей – Nb, Ta, Hf, Y и, как правило, REE, являются показателем условий фракционирования кимберлитового расплава в магматических камерах [49–52] и в продвигающейся колонне кимберлитовых масс в основании литосферы. Следует отметить, что, кроме указанной индикаторной роли минерала в эволюции поднимающихся в земную кору кимберлитовых расплавов, его химизм отражает специфику строения верхней мантии под кимберлитовыми проявлениями, при сходстве составов ильменита отдельно взятых кустов кимберлитовых трубок [28-30]. Важную роль в определении условий мантийного петрогенезиса, продуцирующего кимберлитовые расплавы, играет *хромит*. Хромитовые тренды имеют четко выраженные зависимости от давления, которое коррелирует с хромистостью; выявлена тенденция обогащения хромом в ранних микрофенокристаллах, а Fe и Ti – на более поздних стадиях [13]. Примечательно, что включения хромита в алмазах всегда высокохромисты: Cr_2O_3 составляет более 60 мас. %. На диаграммах Cr_2O_3 - Al_2O_3 хромиты обычно обнаруживают четко выраженные обратные зависимости. Наблюдаемые в отдельных случаях отклонения обусловлены, вероятнее всего, вхождением ульвошпинелевого или магнетитового минала преимущественно к наиболее хромистой части шпинелевых трендов, что связано с близостью к глубинным магматическим источникам в основании литосферных колонн. Однако, в зависимости от окислительных условий, возможны варианты изоморфных замещений. Для *хромшпинелидов* трубки Зарница ДКП наблюдается расщепление тренда составов на обогащенный ульвошпинелевым компонентом и более характерный для рядом расположенной трубки Удачная. При этом тренд составов хромитов из трубки Зарница, как и ильменитов, проявляет дискретный характер, а трубки Удачной - более непрерывный ряд составов, вплоть до 10 мас.% Cr_2O_3 – значений шпинелевой фации. *Шпинелиды* из кимберлитов трубки Юбилейная, как и некоторых других трубок в АМКП, также обнаруживают вариации составов, при этом наблюдается характерное расщепление трендов, что может соответствовать слоистости мантийного разреза. Подобный тренд проявлен и для хромшпинелидов и верхней части мантийной колонны. Шпинелиды из трубки Айхал также обнаруживают сходный тренд расщепления, но он менее контрастен, чем в Юбилейной и некоторых других трубках поля. В МБАР кимберлитовые тела (за исключением трубки Интернациональная) отличаются редкой встречаемостью хромшпинелидов [18–22]. Тренд состава хромитов трубки Интернациональная проявляет четкое деление на отдельные интервалы с существенным расщеплением на ветви, но между ветвями в более хромистой глубинной области наблюдаются линии смешения, что могло быть связано с отдельными промежуточными магматическими очагами. Судя по вариациям составов хромитов из трубки Заполярная ВМКП, практически вся перидотитовая колонна верхней мантии подвержена взаимодействию с жильной системой с обогащением и разогревом [51]. Эти же процессы можно предположить по гомогенному тренду составов клинопироксена и данным термобарометрии. Для трубки Нюрбинская НКП (рис. 4) тренд обогащения ульвошпинелевым миналом очень крутой и состоит из двух отрезков. В менее глубинной части интервала степень взаимодействия поднимающихся протокимберлитовых масс менее выражена. Вполне возможно, что на более значительной глубине из этих расплавов вместо ильменита кристаллизовалась ульвошпинель, при достаточно высоких степенях окисления и высоких температурах. Этим отчасти объясняется отсутствие ильменитовых мегакристаллов в кимберлитах НКП.

В целом для каждого типа кимберлитовых пород, слагающих трубки, количество ИМК алмазной ассоциации пропорционально алмазоносности той или иной разновидности кимберлита. Высокоалмазоносные кимберлитовые тела этой группы характеризуются содержанием не менее 5 % гранатов алмазной ассоциации от общего их числа. Обособляющиеся от них высокоалмазоносные кимберлиты НКП характеризуются [39–41] пониженным содержанием гранатов алмазной ассоциации (более чем в два раза). Главная их особенность – преобладание низкохромистых разновидностей, оставляющих не менее 66 % от общего количества, при появлении зерен с $Cr_2O_3 \geq 12$ мас.%. В кимберлитах этого поля, характеризующихся снижением роли первых двух минералов, важное индикационное значение принадлежит хромшпинели.

Очень важным является разработка новых и совершенствования уже принятых методов изучения *алмаза* –

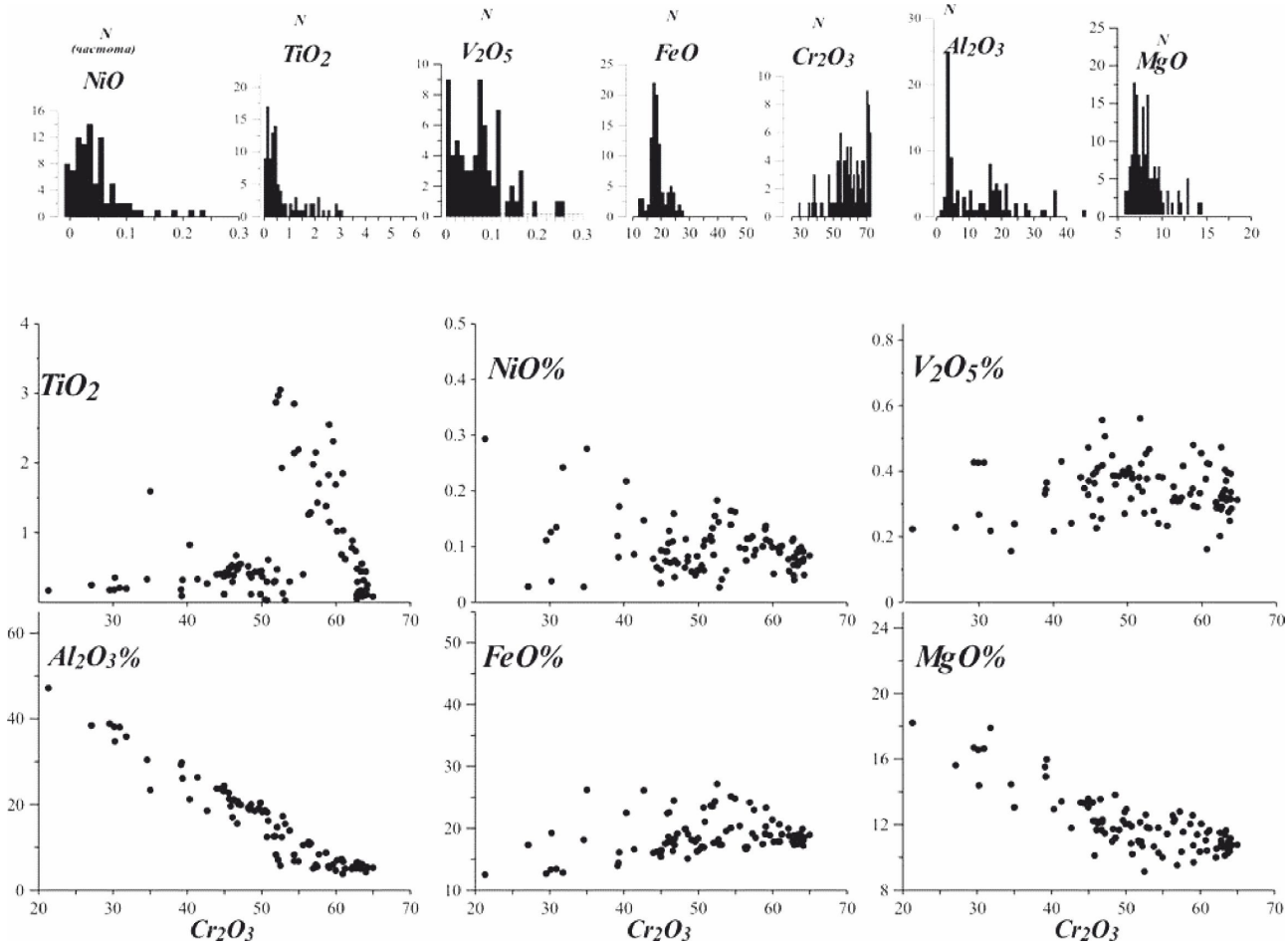


Рисунок 4. Особенности химического состава (мас.%) хромита из кимберлитовых пород трубки Нюрбинская НКП.
Figure 4. Chemical composition (wt.%) of chromite from kimberlite rocks of the Nyurbinskaya pipe of the Nakyn kimberlite field.

минерала с широким комплексом физико-химических, кристалло-морфологических и других особенностей, отражающих своеобразие термодинамических и геохимических условий его образования, которые могут быть использованы в качестве типоморфных [27–29]. Алмазы из отдельных кимберлитовых тел (а нередко и из различных минералого-петрографических разновидностей кимберлитов в одном из месторождений) довольно существенно отличаются по ряду типоморфных особенностей. Зная свойства алмазов из кимберлитовых тел, можно с большой долей уверенности решить вопрос о коренных источниках изучаемой россыпи или группы россыпей. Современные методы исследования алмазов дают возможность получить большой объем информации об условиях их образования, последующего существования и изменения, что имеет важное значение при прогнозировании, поисках и оценке алмазных месторождений. Из большого спектра этих особенностей наиболее информативными и относительно легко диагностируемыми являются [31–33]: морфология, фотолюминесценция, распределение оптически активных и водородных центров, электронный парамагнитный резонанс, химический состав твердых включений в алмазах и др. При этом главнейшими из них является определение принадлежности алмазов к определенной минералогической разновидности, что происходит по комплексу взаимосвязанных признаков и свойств. В результате многолетних исследований алмазов из россыпей и кимберлитовых тел СП (Якутия, Красноярский край и Иркутская область) с применением минералогической классификации алмазов, предложенной Ю. Л. Орловым [1–4, 56], по которой выделяется 11 генетических разновидностей алмазов (с дополнительным разделением кристаллов отдельных разновидностей по габитусу и морфологическим типам кристаллов) накоплен [36–38] громадный фактический материал по типоморфным особенностям алмазов из кимберлитовых тел, современных отложений и разновозрастных вторичных коллекторов САП и провести районирование территорий. В природе в действительности мы видим смесь отдельных разновидностей алмазов. Так, в кимберлитовой трубке Интернациональная в МБАР превалируют бесцветные кристаллы октаэдрического габитуса 1 разновидности (71 %), реже – переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому (23 %) при пониженном (меньше 1 %) содержании ламинарных ромбододекаэдров. В рядом находящейся в этом же районе кимберлитовой трубке имени XXIII сьезда КПСС, характеризующейся в верхней части четко выраженной КВ, также представлены бесцветными, реже – эпигенетически окрашенными в лилово-коричневые цвета алмазами 1 разновидности. Среди них резко преобладают (до 82 %) кристаллы октаэдрического габитуса при невысоком (до 13 %) содержании кристаллов переходного от октаэдриче-

ского к ромбододекаэдрическому габитусов. В свою очередь, из трубок Накынского кимберлитового поля (трубки Нюрбинская и Ботуобинская) отмечаются бесцветные, реже – эпигенетически бледно окрашенные в лилово- и дымчато-коричневые цвета кристаллы 1 разновидности при повышенной доле, по сравнению с другими месторождениями СП, алмазов 1У разновидности с окрашенной в желтовато-зеленые и серые цвета оболочкой. В слабоэродированных диатремах, с развитой в верхней части толщей вулканогенно-осадочных пород, ярким примером которых является самая большая на СП (59 га) кимберлитовая трубка Юбилейная, среди бесцветных прозрачных и полупрозрачных кристаллов почти половину составляют разности, окрашенные в различные цвета. Среди них свыше 30 % бледно-дымчато-коричневых, меньше розово-лиловых и лилово-коричневых окрашенных вследствие пластинчатой деформации. Характерно значительное количество индивидов с признаками природного травления (шрамы, матировка, коррозия, каверны и др.), количество которых по месторождению достигает 25 % всех алмазов. Таким же разнообразием характеризуется спектр алмазов из россыпей СП [34–39, 44].

При всем разнообразии алмазов даже в пределах одной СП, по которой сделана применяемая классификация Ю. Л. Орлова, представилась возможность выделить [35-39] четыре типа источников алмазов: *1-й тип первоисточника* – кимберлитовый, характерный для богатых кимберлитовых тел фанерозойского возраста, характеризуется резким преобладанием алмазов 1 разновидности, представленных ламинарными кристаллами октаэдрического, ромбододекаэдрического и переходного между ними габитусов и образующих непрерывный ряд, а также присутствием алмазов с оболочкой 1У разновидности, серых кубов Ш разновидности, поликристаллических агрегатов УШ-1Х разновидностей, а в отдельных месторождениях (трубка Юбилейная) равномерно окрашенных в желтый цвет кубоидов П разновидности. *2-й тип первоисточника* – алмазы кимберлитового генезиса, характерные для кимберлитовых тел с убогими алмазностью и кимберлитовыми жилами; он выделяется по преобладанию додекаэдроидов с шагренью и полосами пластической деформации «жильного» типа, типичных округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствию бесцветных кубоидов 1 разновидности. *3-й 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 У разновидности, сложенными двойниками и сростками додекаэдроидов УП разновидности с легким ($\delta^{13}C$=-23‰) изотопным составом углерода и равномерно окрашенными кубоидами П разновидности с изотопным составом углерода промежуточного ($\delta^{13}C$=-13,60 ‰) состава, образующими ассоциацию «эбеляхского» («нижнеленского») типа. *4-й тип первоисточника* – алмазы взрывных кольцевых структур импактного генезиса, представленные поликристаллами алмаза типа карбонадо с примесью гексагональной модификации углерода – лонсдейлита (якутит). Полученные данные позволили разделить [29-33] САП на четыре субпровинции: Центрально-Сибирскую – ЦСААП (центральная часть платформы) с преобладанием 1-го типа первоисточника; Лено-Анабарскую – ЛААСП (северо-восток платформы) с преобладанием кристаллов 3-го типа первоисточника невыясненного генезиса; Тунгусскую – ТАСП (юго-запад платформы) с преобладанием типичных округлых алмазов уральского (бразильского) типа, источником которых, возможно, были докембрийские терригенные формации платформы и ее складчатого обрамления; Алданскую – ААСП (юго-восток платформы) с находкой единичных округлых алмазов.

Всестороннее исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволило выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести, кроме регионального, среднемасштабное. Так, в россыпях первой субпровинции отмечено высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. В пределах ЛААСП выделяется две алмазоносные области: Кютюнгдинская (Приленская) и Анабаро-Оленекская. В россыпях первой области устанавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация «кютюнгдинского» типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях Лено-Анабарской области наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциации «эбеляхского» типа) с преобладанием кристаллов П, У и УП разновидностей, типичных округлых алмазов во всех возрастных и генетических типах алмазоносных отложений. ТАСП разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типично доминирование округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствие значительного количества (до 10 %) балласов. В россыпях Байкитской области преобладают кристаллы октаэдрического габитуса ассоциации «мирнинского типа», характерной для богатых кимберлитовых трубок, но при значительных содержаниях типичных округлых алмазов (особенно в крупных классах), свойственных периферийным частям древних платформ.

Заключение

Таким образом, кимберлиты установлены на всех древних платформах Земли, а основной формой их проявления являются воронкообразные брекчиевые вулканические трубки взрыва маар-диатремового типа, верхние части которых венчаются кратерными постройками, а на глубине (от 1000 до 2500 м) диатремы переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «посткимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках (Мир и некоторые другие) в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Петрографический спектр кимберлитовых образований характеризует трехфациальный разрез (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и обнаруживает соответствующие

текстурно-структурные отличительные черты. Для кимберлитовых диатрем примечательны отсутствие больших объемов вытесненных пород и плутонических комплексов, выраженных в минеральном и химическом составе, а также насыщенности летучими при высокой доле CO_2, относительно низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов, присутствие слабо раскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения, наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород, присутствие алмазов, примеры перехода диатрем в дайки, признаки взрывного генезиса, наличие дотрубочных, синтрубочных и посттрубочных даек, отсутствие термометаморфизма, широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями. Облик и состав разнофациальных кимберлитовых пород (порфировые кимберлиты, кимберлитовые и автолитовые брекчии, туфобрекчии и туфы) во многом определяются качественно-количественным спектром вторичных минералов, главными из которых являются серпентин и карбонаты, а к второстепенным отнесены все остальные минералы, образовавшиеся на разных стадиях становления кимберлитовых трубок и представляющие различные минералогические классы – силикаты, карбонаты, оксиды и гидроксиды, сульфиды, сульфаты, галогениды, фосфаты, бораты и битумы. Установленные монтичеллитовые и диопсид-флогопит-оливиновые разновидности кимберлитов позволяют проследить различные этапы эволюции родоначальных кимберлитовых расплавов.

Мантийные парагенезисы минералов из кимберлитов представляют различные уровни мантии, включая ее алмазоносные горизонты, что позволяет конкретизировать алмазоносные ассоциации. Определены спектры редкоземельных элементов в породах различных горизонтов мантийных разрезов и их показательных минералах. Исследованы петролого-минералогические характеристики промышленно алмазоносных кимберлитов и ксенолитов мантийных пород из них. Породы изученных кимберлитовых трубок СП с учетом дискриминантных отношений (K_2O–TiO_2; SiO_2/MgO–Ti/Zr; Nb/Zr) объединены в три петрогеохимические группы. Рассчитаны термодинамические параметры эволюции исходного субстрата и выполнены реконструкции мантийных разрезов, что позволило выявить зональность литосферной мантии кимберлитовой провинции, вероятной причиной чего была смена глубинных геодинамических обстановок. Присутствие в кимберлитах определенных групп глубинных ксенолитов, ксенозерен их минералов, химический и геохимический составы кимберлитов позволяют высказать предположение о составе пород верхней мантии, являющихся источником магмы каждой из выделенных типов моделей кимберлитов. Эти данные убедительно показывают, что причиной различной продуктивности кимберлитов является глубина заложения корней кимберлитовых очагов. Состав мантийного материала свидетельствует, что корни промышленно продуктивных кимберлитов залегают на большей глубине, чем слабо алмазоносных. Алмазоносность кимберлитов определяется многими факторами, главными из которых являются: геолого-тектонические особенности районов распространения кимберлитового магматизма; состав вещества верхней мантии, генерирующего кимберлитовые расплавы; глубина заложения корней магматических очагов; скорость миграции (подъема) кимберлитового расплава в земную кору; сохранность алмазов в условиях земной коры (в диатремах); содержание «пустого» материала в кимберлитовых телах. Состав глубинных (мантийных) минералов (пироп, пикроильменит, хромшпинелид и др.), кристалломорфология и физические свойства алмазов дифференцированы на уровне провинции, поля и каждой трубки. Индивидуальные особенности состава и физических свойств индикаторных минералов трубок выявляются на статистическом уровне. Всестороннее исследование алмазов из всех разновозрастных коллекторов и кимберлитовых диатрем позволило выработать систему анализа их типоморфных особенностей и провести, кроме регионального, среднемасштабное районирование. Так, в россыпях первой субпровинции отмечается высокое содержание кристаллов октаэдрического и ромбододекаэдрического габитусов. В пределах ЛААСП выделяются две алмазоносные области: Кютюнгдинская (Приленская) и Анабаро-Оленекская. В россыпях первой области устанавливаются кристаллы октаэдрического габитуса (ассоциация «кютюнгдинского» типа), характерные для богатого типа первоисточника кимберлитового генезиса. В россыпях Лено-Анабарской области наблюдается резкое преобладание алмазов из первоисточника невыясненного генезиса (ассоциации «эбеляхского» типа) с преобладанием кристаллов П, У и УП разновидностей, типичных округлых алмазов во всех возрастных и генетических типов алмазоносных отложений. ТАСП разделяется на две области: Байкитскую и Саяно-Тунгусскую. Для россыпей последней типично доминирование округлых алмазов «уральского» («бразильского») типа и присутствие значительного количества (до 10 %) балласов. В россыпях Байкитской области преобладают кристаллы октаэдрического габитуса ассоциации «мирнинского типа», характерной для богатых кимберлитовых трубок, но при значительных содержаниях типичных округлых алмазов (особенно в крупных классах), свойственных периферийным частям древних платформ.

Детальные комплексные исследования алмазов и их парагенетических спутников комплексом современных методов с геологической привязкой необходимы и актуальны. Во-первых, это фундаментальные комплексные исследования минералогии, кристаллографии и физических свойств алмазов и твердых включений в них для выяснения условий генезиса. Во-вторых – это использование информации, полученной разными методами при комплексном исследовании алмазов, для решения прикладных вопросов, непосредственно связанных с практикой геологоразведочных работ. К ним относятся установление связи вещественно-индикационных параметров кимберлитового магматизма различной алмазоносности и геолого-структурного положения кимберлитовых тел, что позволяет установить как региональные, так и локальные типоморфные особенности, а также выяснить вопрос о ко-

ренных источниках алмазов россыпей. Третьим направлением комплекса минералогических исследований алмазов, развивающихся на стыке минералогии и технологии минерального сырья, является разработка рекомендаций, направленных на создание наиболее рациональных схем переработки руды и обеспечивающих кристаллосберегающие технологии, а также уточнение областей применения алмазов с учетом их реальной структуры и физических особенностей и выявление обьектов с повышенным качеством алмазного сырья. Выполнение комплекса минералогических исследований алмазов и минералогическое районирование территорий необходимо как для рационального определения направления геологоразведочных работ, так и для повышения их качества и эффективности, что будет способствовать открытию новых месторождений алмазов и интенсификации всех работ, направленных на прирост запасов алмазного сырья.

Полученные результаты изучения кимберлитов позволили определить комплекс задач, требующих своего решения в ближайшие годы. До настоящего времени нет единой общепринятой формулировки понятия кимберлитов как горной породы. Требуется принятие единой схемы классификации и номенклатуры кимберлитовых пород на петрографических принципах. По-прежнему актуальны и дискуссионны проблемы их генезиса, природы алмазоносности, механизма формирования диатрем и структурного контроля проявлений. Среди исходных позиций кимберлитообразования, как и прежде, актуальны следующие аспекты: 1) вероятный мантийный источник материала, способного к формированию ультраосновной магмы, продуцирующей производные с минералогией и геохимией кимберлита; 2) условия плавления мантийного субстрата для образования кимберлитового расплава; 3) возможный «спусковой» механизм, ответственный за плавление в мантии и образование кимберлитового расплава. Весьма важным направлением является комплексирование результатов глубинных сейсмических исследований (до 700 км), магнитотеллурических зондирований и изучения ксенолитов мантийных пород для познания строения мантии, процессов алмазо- и кимберлитообразования и природы кимберлитовых проявлений. Рассмотрение всех этих вопросов, в свою очередь, требует обобщения и анализа накопленных данных по вещественному составу дискретных групп различных мантийных пород – дунитов, гранатовых и шпинелевых перидотитов, пироксенитов, эклогитов, ильменит- и флогопитсодержащих парагенезисов и пр., являющихся потенциальными поставщиками алмазов и другого глубинного материала в кимберлиты. Необходимо сопоставление таких данных по различным группам мантийных пород, анализ условий их P-T равновесия на глубине, пространственного положения в верхней мантии под различными кимберлитовыми полями, соотношений с палеогеотермами. Большой интерес представляет оценка количественной роли различных мантийных парагенезисов в материнских кимберлитах с учетом избирательного захвата глубинного материала протокимберлитовыми расплавами, особенностей транспортировки захваченного материала к поверхности, устойчивости алмазов в глубинных выплавках и т. д. Иными словами, следует рассмотреть те параметры и процессы, анализ которых может помочь углубить понимание механизмов возникновения продуктивности кимберлитов. Предполагается, что на этой основе удастся усовершенствовать, особенно в количественном отношении по элементному составу, существующие критерии алмазоносности и, соответственно, методы прогнозирования и поисков новых месторождений. Геологоразведочные и прогнозно-поисковые работы на СП в условиях усложняющихся алмазопоисковых обстановок настоятельно требуют повышения степени информативности вещественных характеристик магматических источников алмазов для прогнозно-поисковых и оценочных целей. Изучение отдельных месторождений алмазов АМКП и ДКП в связи с их разведкой и вовлечением в ближайшее время в эксплуатацию или дальнейшая эксплуатация (трубки Комсомольская, Юбилейная, Удачная, Зарница), трубки Накынского и Верхне-Мунского полей, а также пород трубочных и жильных тел и аномальных объектов северной части провинции – в связи с оценкой их потенциальной алмазоносности, вызывает необходимость и представляет возможность совершенствования принципов и критериев минерало-петрохимической диагностики промышленно-алмазоносных кимберлитов, выделения основных типов (и фаз) кимберлитовых пород, установления сходства и различия между высокопродуктивными кимберлитами и породами средне- и убогоалмазоносных диатрем.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Афанасьев, В. П. Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов У и УП разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) / В. П. Афанасьев, А. П. Елисеев, В. А. Надолинный [и др.] // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2000. – № 5 (10). – С. 79–96.
2. Афанасьев, В. П. Минерагения древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук // Геология и геофизика. – 1987. – № 1. – С. 90–96.
3. Афанасьев, В. П. Роль карста в формировании россыпной алмазоносности Муно-Тюнгского междуречья (Якутская алмазоносная провинция) / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук, Н. П. Похиленко [и др.] // Геология рудных месторождений. – 2001. – Т. 43, № 3. – С. 262–267.
4. Афанасьев, В. П. Закономерности изменения мантийных минералов в коре выветривания кимберлитовых пород / В. П. Афанасьев, Н. Н. Зинчук, А. Д. Харькив [и др.] // Минерагения зоны гипергенеза. – М.: ИГЕМ АН СССР, 1980. – С. 45–54.
5. Афанасьев, В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов / В. П. Афанасьев, Н. П. Похиленко, А. М. Логвинова [и др.] // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1729–1741.

6. Бардухинов, Л. Д. Первые результаты изучения крупных алмазов из промышленных месторождений Якутии / Л. Д. Бардухинов, Е. М. Седых, А. А. Евстратов [и др.] // Геология рудных месторождений. – 2024. – Вып. 66, № 4. – С. 363–384.
7. Василенко, В. Б. Критерии петрохимической идентификации кимберлитов / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, В. О. Красавчиков [и др.] // Геология и геофизика. – 2000. – Т. 41, № 12. – С. 1748–1759.
8. Василенко, В. Б. Средние составы кимберлитовых тел Вилюйской субпровинции Якутии как основа для формационной идентификации кимберлитов / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, Л. Г. Кузнецова [и др.] // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2006. – № 2. – С. 126–140.
9. Василенко, В. Б. Петрохимическая фактография кимберлитовой провинции Восточной Сибири / В. Б. Василенко, Л. Г. Кузнецова, Н. Н. Зинчук. – Новосибирск: Параллель, 2019. – 754 с.
10. Гладков, А. С. Тектонофизические исследования при алмазопоисковых работах: методическое пособие / А. С. Гладков, С. А. Борняков, А. В. Манаков [и др.]. – М.: Научный мир, 2008. – 175 с.
11. Джейкс, А. Кимберлиты и лампроиты Западной Австралии / А. Джейкс, Дж. Луис, К. Смит. – М.: Мир, 1989. – 430 с.
12. Доусон, Дж. Кимберлиты и ксенолиты в них / Дж. Доусон. – М.: Недра, 1983. – 300 с.
13. Дукардт, Ю. А. Авлакогенез и кимберлитовый магматизм / Ю. А. Дукардт, Е. И. Борис. – Воронеж: ВГУ, 2000. – 161 с.
14. Зинчук, Н. Н. Особенности состава и распределения слюдистых образований в кимберлитовых породах Якутии / Н. Н. Зинчук // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1991. – № 7. – С. 58–66.
15. Зинчук, Н. Н. Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород / Н. Н. Зинчук // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 12. – С. 1704–1715.
16. Зинчук, Н. Н. Особенности гипергенного изменения кимберлитов и проблема поисков коренных месторождений алмазов. Статья 1. Коры выветривания на кимберлитах Сибирской и Восточно-Европейской платформ / Н. Н. Зинчук // Бюллетень МОИП. Отдел. геолог. – 2015. – Т. 90, вып. 5. – С. 28–40.
17. Зинчук, Н. Н. Особенности гипергенного изменения кимберлитов и проблема поисков коренных месторождений алмазов. Статья 2. Коры выветривания на кимберлитах Африканской платформы / Н. Н. Зинчук // Бюллетень МОИП. Отдел. геолог. – 2015. – Т. 90, вып. 6. – С. 58–70.
18. Зинчук, Н. Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2018. – № 2. – С. 29–39.
19. Зинчук, Н. Н. Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. 2021. – № 2. – С. 41–56.
20. Зинчук, Н. Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2021. – № 3. – С. 50–61.
21. Зинчук, Н. Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
22. Зинчук, Н. Н. Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
23. Зинчук, Н. Н. Кремнистые минералы в кимберлитах / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2022. – № 4. – С. 38–52.
24. Зинчук, Н. Н. Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2022. – № 4. – С. 34–49.
25. Зинчук, Н. Н. Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ / Н. Н. Зинчук // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 100–120.
26. Зинчук, Н. Н. О специфике глинистых минералов в осадочных формациях / Н. Н. Зинчук // Вестник Пермского университета. Геология. – 2022. – № 1. – С. 10–23.
27. Зинчук, Н.Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2023. – № 1. – С. 42–55.
28. Зинчук, Н. Н. Литолого-стратиграфические исследования при алмазопоисковых работах / Н. Н. Зинчук // Вестник СВФУ. Науки о Земле. – 2023. – № 1 (29). – С. 5–28.
29. Зинчук, Н. Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдистых кимберлитов / Н. Н. Зинчук // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 32–50.
30. Зинчук, Н. Н. Сульфаты в кимберлитовых породах / Н. Н Зинчук // Отечественная геология. – 2023. – № 2. – С. 56–72.
31. Зинчук, Н. Н. Особенности кальцита из кимберлитовых пород / Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2023. – № 2. – С. 28–43.
32. Зинчук, Н. Н. Геолого-тектоническое строение и особенности развития Сибирской платформы в связи с алмазопоисковыми работами / Н. Н. Зинчук // Отечественная геология. – 2024. – № 3. – С. 43–72.
33. Зинчук, Н. Н. Генетические типы и основные закономерности формирования алмазоносных россыпей / Н. Н. Зинчук, В. П. Афанасьев // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1998. – № 2. – С. 66–71.
34. 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.
35. Зинчук, Н. Н. Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Руды и металлы. – 2022. – № 1. – С. 77–93.

36. 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.
37. Зинчук, Н. Н. Алмазы из полупромышленных кимберлитов / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2022. – № 2. – С. 32–45.
38. Зинчук, Н. Н. Сравнительные особенности алмазов из кимберлитовых месторождений северной части Сибирской платформы / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Вестник СВФУ. Науки о Земле. – 2024. – № 1 (33). – С. 11–30.
39. Зинчук, Н. Н. Особенности состава и формирования россыпей алмазов в краевых частях древних платформ (на примере северо-востока Сибирской платформы) / Н. Н. Зинчук, Л. Д. Бардухинов // Известия Коми НЦ УрО РАН. Серия «Науки о Земле». – 2024. – № 3 (69). – С. 63–75.
40. Зинчук, Н. Н. Петрофизика кимберлитовых и вмещающих пород / Н. Н. Зинчук, А. Т. Бондаренко, М. Н. Гарат. – М.: Недра, 2002. – 695 с.
41. Зинчук, Н. Н. О концентрации продуктов переотложения кор выветривания в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы / Н. Н. Зинчук, Е. И. Борис // Геология и геофизика. – 1981. – № 8. – С. 22–29.
42. Зинчук, Н. Н. Особенности минерагении алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы) / Н. Н. Зинчук, Е. И. Борис, Ю. Б. Яныгин. – М.: МГТ, 2004. – 172 с.
43. Зинчук, Н. Н. Тектонические аспекты прогнозирования кимберлитовых полей / Н. Н. Зинчук, Ю. А. Дукардт, Е. И. Борис. – Новосибирск: Сибтехнорезерв, 2004. – 166 с.
44. Зинчук, Н. Н. Стратегия ведения и результаты алмазопоисковых работ / Н. Н. Зинчук, В. М. Зуев, В. И. Коптиль [и др.] // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
45. Зинчук, Н. Н. О преобразовании серпентина в процессе выветривания кимберлитов Якутии / Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников // Доклады АН СССР. – 1980. – Т. 250, № 3. – С. 697–702.
46. 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.
47. Зинчук, Н. Н. Генезис и распространение каолинит-монтмориллонитов в осадочном чехле / Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, Б. П. Градусов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка.- 1997. – № 4. – С. 35–43.
48. Зинчук, Н. Н. Строение и минералогические особенности кор выветривания кимберлитов на малых трубках Якутии / Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, С. В. Соболева // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 1997. – Т. 72, № 5. – С. 56–64.
49. Зинчук, Н. Н. Апокимберлитовые породы / Н. Н. Зинчук, Ю. М. Мельник, В. П. Серенко // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
50. Зинчук, Н. Н. Тектоника и алмазоносный магматизм / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев. – Воронеж: ВГУ, 2004. – 282 с.
51. 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.
52. 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.
53. Зинчук, Н. Н. Историческая минерагения в 3-х томах: Т. 3. Историческая минерагения подвижных суперпоясов / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев. – Воронеж: ВГУ, 2008. – 622 с.
54. Зинчук, Н. Н. Историко-минерагенический анализ коренной алмазоносности Сибирской платформы // Труды НИИГ Воронежского гос. университета. Вып. 61 / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, Л. Т. Шевырев. – Воронеж: ВГУ, 2010. – 100 с.
55. Кедрова, Т. В. Россыпи алмазов Накынского кимберлитового поля / Т. В.Кедрова, И. Н. Богуш, Н. Н. Зинчук [и др.] // Геология и геофизика. – 2022. – Т. 63, № 3. – С. 291–302.
56. Коптиль, В. И. Типоморфизм алмазов северо-востока Сибирской платформы в связи с проблемой прогнозирования и поисков алмазных месторождений // Автореф. дисс. ... канд. геол.-минералог. наук. – Новосибирск: Институт геологии и минералогии СО РАН, 1994. – 25 с.
57. Котельников, Д. Д. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдистых минералов / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1996. – № 1. – С. 53–61.
58. 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.
59. Котельников, Д. Д. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2001. – Т. 76, № 1. – С. 45–53.
60. Котельников, Д. Д. Геологическая интерпретация результатов изучения глинистых минералов в осадочном чехле земной коры / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2001. – № 12. – С. 45–51.
61. Котельников, Д. Д. Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу /

Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук // Вестник Воронежского госуниверситета. Геология. – 2003. – № 2. – С. 57–68.
62. Котельников, Д. Д. Морфогенетические разновидности каолинита в корах выветривания и осадочном чехле земной коры. Статья 1. Механизм образования каолинита в корах выветривания различных петрохимических типов пород / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук, В. А. Кузьмин // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2006. – № 5. – С. 19–25.
63. Котельников, Д. Д. Стадийность и направленность преобразования серпентина и флогопита в кимберлитах трубки Катока (Ангола) / Д. Д. Котельников, Н. Н. Зинчук, Ю. Б. Стегницкий [и др.] // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2005. – № 2. – С. 16–23.
64. Лапин, А. В. Изотопный состав Sr- и Nd-кимберлитов и конвергентных с ними пород Сибирской платформы / А. В. Лапин, А. В. Толстов, А. В. Антонов // Доклады РАН. – 2007. – Т. 414, № 1. – С. 78–82.
65. Мацюк, С. С. Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии / С. С. Мацюк, Н. Н. Зинчук. – М.: Недра, 2001. – 428 с.
66. Похиленко, Н. П. Аномальные кимберлиты Сибирской платформы и кратона Слейв, Канада, их важнейшие особенности в связи с проблемой прогнозирования и поисков алмазов / Н. П. Похиленко, Н. В. Соболев, Н. Н. Зинчук // Алмазы и алмазоносность Тимано-Уральского региона: сборник. – Сыктывкар: Геопринт, 2001. – С. 19–21.
67. Розен, О. М. Состав и возраст земной коры северо-востока Сибирской платформы: изучение ксенолитов в кимберлитах и кернов глубоких скважин / О. М. Розен, Л. К. Левский, Д. С. Журавлёв [и др.] // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 2006. – № 4. – С. 18–28.
68. Савко, А. Д. Алмазоносность Воронежской антеклизы / А. Д. Савко, Н. Н. Зинчук, Л. Т. Шевырёв [и др.] // Труды НИИГ Воронежского ун-та. – 2003. – Т. 17. – 121 с.
69. Серокуров, Ю. Н. Космические методы при прогнозировании и поисках месторождений алмазов / Ю. Н. Серокуров, В. Д. Калмыков, В. М. Зуев. – М.: Недра, 2001. – 198 с.
70. Цыганов, В. А. О проблеме оценки генеральной совокупности по неслучайным выборкам (на примере индикационных характеристик кимберлитов) / В. А. Цыганов, Н. Н. Зинчук, В. П. Афанасьев // Доклады АН СССР. – 1988. – № 301. – С. 672–677.
71. Clifford, T. N. A structural framework of Africa / T. N. Clifford // African Magmatism and Tectonics. – Edinburgh: Oliwer and Boyd, 1970. – P. 1–16.
72. Rosen, O. M. Yakutian kimberlite position in the Sibirian craton and composition of the upper and lower crust / O. M. Rosen, V. P. Serenko, Z. V. Spetsius [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2002. – Vol. 43. – № 1. – P. 3–26.

References

1. Afanasiev, V. P. Mineralogiya i nekotorye voprosy genezisa almazov U i UP raznovidnostej (po klassifikacii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some genesis issues of У and УП diamonds (by classification of Y. L. Orlov)] / V. P. Afanasiev, A. P. Eliseev, V. A. Nadolinny [et al.] // Bulletin of the Voronezh SU. Geology. – 2000. – № 5 (10). – P. 79–96.
2. Afanasiev, V. P. Minerageniya drevnih rossypej almazov vostochnogo borta Tungusskoj sineklizy [Minerageny of ancient diamond placers on the eastern side the Tunguska syneclise] / V. P. Afanasiev, N. N. Zinchuk // Geology and Geophysics. – 1987. – № 1. – P. 90–96.
3. Afanasiev, V. P. Rol karsta v formirovanii rossypnoj almazonosnosti Muno-Tyungskogo mezhdurechya (Yakutskaya almazonosnaya provinciya) [The role of karst in the formation of diamond placers of the Muno-Tyungskoe interfluve (Yakut diamond province)] / V. P. Afanasiev, N. N. Zinchuk, N. P. Pochilenko [et al.] // Geologia rudnykh mestorozhdeny [Geology of Ore Deposits]. – 2001. – Vol. 43. – № 3. – P. 262–267.
4. Afanasiev, V. P. Zakonomernosti izmeneniya mantijnyh mineralov v kore vyvetrivaniya kimberlitovyh porod [Patterns of changes in mantle minerals in the weathering crust of kimberlite rocks] / V. P. Afanasiev, N. N. Zinchuk, A. D. Charkiv [et al.] // Minerageniya zony gipergeneza [Minerageny of the Hypergenesis Zone]. – M.: IGEM AS USSR. – 1980. – P. 45–54.
5. Afanasiev, V. P. Morphological and compositional features of some chromespinelides at the diamondiferous areas in view of the problem of 'false' kimberlite indicators / V. P. Afanasiev, N. P. Pochilenko, A. M. Loginova [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2000. – Vol. 41. – № 12. – P. 1729–1741.
6. Bardukhinov, L. D. Pervye rezultaty izucheniya krupnyh almazov iz promyshlennyh mestorozhdenij Yakutii [The first study results on large diamonds from the industrial deposits of Yakutia] / L. D. Bardukhinov, E. M. Sedykh, A. A. Evstratov [et al.] // Geologia rudnykh mestorozhdeny [Geology of Ore Deposits]. – 2024. – Vol. 66. – № 4. – P. 412–429.
7. Vasilenko, V. B. Kriterii petrohimicheskoj identifikacii kimberlitov [Criteria for petrochemical identification of kimberlites] / V. B. Vasilenko, N. N. Zinchuk, V. O. Krasavchikov [et al.] // Geologia and Geophizika [Geology and Geophysics]. – 2000. – Vol. 41. – № 12. – P. 1748–1759.
8. Vasilenko, V. B. Srednie sostavy kimberlitovyh tel Vilyujskoj subprovincii Yakutii kak osnova dlya formacionnoj identifikacii kimberlitov [Average compositions of kimberlite bodies of the Vilyuysk sub-province of Yakutia as the basis for the formation identification of kimberlites] / V. B. Vasilenko, N. N. Zinchuk, L. G. Kuznetsova [et al.] // Bulletin of the Voronezh SU. Geology. – 2006. – № 2. – P. 126–140.
9. Vasilenko, V. B. Petrohimicheskaya faktografiya kimberlitovoj provincii Vostochnoj Sibiri [Petrochemical factual account about the kimberlite province of Eastern Siberia]

/ V. B. Vasilenko, L. G. Kuznetsova, N. N. Zinchuk. – Novosibirsk: Parallel, 2019. – 754 p.
10. Gladkov, A. S. Tektonofizicheskie issledovaniya pri almazopoiskovyh rabotah. Metodicheskoe posobie [Tectonophysical research for diamond prospecting. Manual] / A. S. Gladkov, S. A. Bornjakov, A. V. Manakov [et al.]. – M.: Nauchny mir, 2008. – 175 p.
11. Jakes, A. Kimberlity i lamproity Zapadnoj Avstralii [Kimberlites and lamproites of Western Australia] / A. Jakes, J. Luis, K. Smith. – M.: Mir, 1989. – 430 p.
12. Dowson, J. Kimberlity i ksenolity v nih [Kimberlites and xenoliths in them] / J. Dowson. – M.: Nedra, 1983. – 300 p.
13. Dukardt, Yu. A. Avlakogenez i kimberlitovyj magmatizm [Avlacogenesis and kimberlite magmatism] / Yu. A. Dukardt, E. I. Boris // Voronezh: VGU, 2000. – 161 p.
14. Zinchuk, N. N. Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistyh obrazovanij v kimberlitovyh porodah Yakutii [Specific features of composition and distribution of micaceous formations in kimberlite rocks of Yakutia] / N. N. Zinchuk // News of High Educational Institutions. Geology and Exploration. – 1991. – № 7. – P. 58–66.
15. Zinchuk, N. N. Vliyanie vtorichnyh mineralov na oblik i sostav kimberlitovyh porod [Influence of secondary minerals on appearance and composition of kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 1998. – Vol. 39. – № 12. – P. 1704–1715.
16. Zinchuk, N. N. Osobennosti gipergennogo izmeneniya kimberlitov i problema poiskov korennyh mestorozhdenij almazov. Statya 1. Kory vyvetrivaniya na kimberlitah Sibirskoj i Vostochno-Evropejskoj platform [Specific features of hypergenic alteration of kimberlites and prospecting of primary diamond deposits. Article 1. Weathering crusts on kimberlites of the Siberian and East European platforms] / N. N. Zinchuk // Bulletin MOIP. Geology. – 2015. – Vol. 90. – Iss. 5. – P. 28–40.
17. Zinchuk, N. N. Osobennosti gipergennogo izmeneniya kimberlitov i problema poiskov korennyh mestorozhdenij almazov. Statya 2. Kory vyvetrivaniya na kimberlitah Afrikanskoy platformy [Specific features of hypergenic alteration of kimberlites and prospecting of primary diamond deposits. Article 2. Weathering crusts on kimberlites of the African platform] / N. N. Zinchuk // Bulletin MOIP. Geology. – 2015. – Vol. 90. – Iss. 6. – P. 58–70.
18. Zinchuk, N.N. Osobennosti mineralov slyud v kimberlitah [Features of mica minerals in kimberlites] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2018. – № 2. – P. 29–39.
19. Zinchuk, N. N. Tipomorfnye svojstva indikatornyh mineralov kimberlitov i ih ispolzovanie pri prognozirovanii mestorozhdenij almaza na Sibirskoj platforme [Typomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in forecasting diamond deposits in the Siberian platform] / N. N. Zinchuk // Otechestvenaya geologiya [Domestic Geology]. – 2021. – № 2. – P. 41–56.
20. Zinchuk, N. N. Dokembrijskie istochniki almazov v rossypyah fanerozoya [Pre-Cambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2021. – № 3. – P. 50–61.
21. Zinchuk, N. N. Geologicheskie issledovaniya pri poiskah almaznyh mestorozhdenij [Geological surveys in prospecting of diamond deposits] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2021. – № 4. – P. 35–52.
22. Zinchuk, N. N. Rol petrologo-mineralogicheskih i geohimicheskih issledovanij v ocenke potencialnoj almazonosnosti kimberlitov [The role of petrologic-mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites] / N. N. Zinchuk // Otetchestvennaia geologiya [Domestic Geology]. – 2022. – № 1. – P. 36–47.
23. Zinchuk, N. N. Kremnistye mineraly v kimberlitah [Siliceous minerals in kimberlites] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2022. – № 4. – P. 38–52. 24.
24. Zinchuk, N. N. Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovyh porod [Specific features of petrographic research of kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Otetsestvennaya geologiya [Domestic Geology]. – 2022. – № 6. – P. 34–49.
25. Zinchuk, N. N. Kory vyvetrivaniya i ih rol v formirovanii postkimberlitovyh osadochnyh tolshch [Weathering crusts and their role in formation of post-kimberlite sedimentary sequences] / N. N. Zinchuk // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2022. – № 2. – P. 100–120.
26. Zinchuk, N. N. O specifike glinistyh mineralov v osadochnyh formaciyah [About a specific character of clay minerals in sedimentary formations] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Perm University. Geology. – 2022. – № 1. – P. 10–23.
27. Zinchuk, N. N. O geohimicheskih osobennostyah raznovozrastnyh obrazovanij almazoperspektivnyh territorij [About geochemical features of different-age formations on diamond-promising territories] / N. N. Zinchuk // Otetchestvennaya geologiya [Domestic Geology]. – 2023. – № 1. – P. 42–65.
28. Zinchuk, N. N. Litologo-stratigraficheskie issledovaniya pri almazopoiskovyh rabotah [Lithologic-stratigraphic surveys in diamond-prospecting works] / N. N. Zinchuk // Bulletin SVFU. Earth Sciences. – 2023. – № 1 (29). – P. 5–28.
29. Zinchuk, N. N. Osobennosti gidrotermalnogo i gipergennogo izmeneniya slyudistyh kimberlitov [Specific features of hydrothermal and hypergenic alteration of mica kimberlites] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Perm University. Geology. – 2023. – Vol. 22. – № 1. – P. 32–50.
30. Zinchuk, N. N. Sulfaty v kimberlitovyh porodah [Sulfates in kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Otetchestvennaya geologiya [Domestic Geology]. – 2023. – № 2. – P. 56–72.
31. Zinchuk, N. N. Osobennosti kalcita iz kimberlitovyh porod [Features of calcite from kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2023. – № 2. – P. 28–43.
32. Zinchuk, N. N. Geologo-tektonicheskoe stroenie i osobennosti razvitiya Sibirskoj platformy v svyazi s alma-

zopoiskovymi rabotami [Geologic-tectonic structure and development features of the Siberian platform in view of diamond-prospecting works] / N. N. Zinchuk // Otethestvenaya geologiya [Domestic Geology]. – 2024. – № 3. – P. 43–72.
33. Zinchuk, N. N. Geneticheskie tipy i osnovnye zakonomernosti formirovaniya almazonosnyh rossypej [Genetic types and principal formation patterns of diamond placers] / N. N. Zinchuk, V. P. Afanasiev // News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration. – 1998. – № 2. – P. 66–71.
34. Zinchuk, N. N. O specifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovyh rabotah (na primere Sibirskoj platformy) [About the specificity of diamond research during exploration and prospecting (Siberian platform) / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2021. – № 3. – P. 59–75.
35. Zinchuk, N. N. Almazy iz nizkoproduktivnyh kimberlitov [Diamonds from low-productive kimberlites] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Rudy i metally [Ores and Metals]. – 2022. – № 1. – P. 77–93.
36. Zinchuk, N. N. O specifike dokembrijskih istochnikov almazov v rossypyah [About the specificity of the pre-Cambrian sources of diamonds in placers] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Bulletin of the Perm University. Geology. – 2022. – Vol. 21. – № 2. – P. 149–166.
37. Zinchuk, N. N. Almazy iz polupromyshlennyh kimberlitov [Diamonds from semi-industrial kimberlites] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2022. – № 2. – P. 32–45.
38. Zinchuk, N. N. Sravnitelnye osobennosti almazov iz kimberlitovyh mestorozhdenij severnoj chasti Sibirskoj platformy [Comparative features of diamonds from kimberlite deposits in the northern part of the Siberian platform] / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // Bulletin of the North-Eastern Federal University. Earth Sciences. – 2024. – № 1 (33). – P. 11–30.
39. Zinchuk, N. N. Composition and formation of diamond placers in the marginal parts of the ancient platforms (on example of the North-East of the Siberian platform) / N. N. Zinchuk, L. D. Bardukhinov // 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.
40. Zinchuk, N. N. Petrofizika kimberlitovyh i vmeshchayushchih porod [Petrophysics of kimberlite and host rocks] / N. N. Zinchuk, A. T. Bondarenko, M. N. Garat. – M.: Nedra, 2000. – 695 p.
41. Zinchuk, N. N. O koncentracii produktov pereotlozheniya kor vyvetrivaniya v verhnepaleozojskih osadochnyh tolshchah vostochnogo borta Tungusskoj sineklizy [On the concentration of weathering crust redeposition products in the Upper Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syneclise] / N. N. Zinchuk, E. I. Boris // Geologiya and geofizika [Geology and Geophysics]. – 1981. – № 8. – P. 22–29.
42. Zinchuk, N. N. Osobennosti mineragenii almaza v drevnih osadochnyh tolshchah (na primere verhnepaleozojskih otlozhenij Sibirskoj platformy) [Diamond minerageny in ancient sedimentary layers (on the example of the Upper Paleozoic sediments of the Siberian platform)] / N. N. Zinchuk, E. I. Boris, Yu. T. Yanigin. – M.: MGT, 2004. – 172 p.
43. Zinchuk, N. N. Tektonicheskie aspekty prognozirovaniya kimberlitovyh polej [Tectonic aspect to forecast kimberlite fields] / N. N. Zinchuk, Yu. A. Dukardt, E. I. Boris. – Novosibirsk: Sibtekhnoreserv, 2004. – 166 p.
44. Zinchuk, N. N. Strategiya vedeniya i rezultaty almazopoiskovyh rabot [Strategy and results of diamond prospecting works] / N. N. Zinchuk, V. M. Zuev, V. I. Koptil [et al.] // Gorny vestnik [Mining Bulletin]. – 1997. – № 3. – P. 53–57.
45. Zinchuk, N. N. O preobrazovanii serpentina v processe vyvetrivaniya kimberlitov Yakutii [About transformation of serpentine during weathering of Yakutia kimberlites] / N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov // Reports of the USSR Academy of Sciences. – 1980. – Vol. 250. – № 3. – P. 697–702.
46. Zinchuk, N. N. Identifikaciya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanoslojnogo obrazovaniya v kimberlitah odnoj iz trubok Yuzhnoj Afriki [Identification and genesis of a lysardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes in South Africa] / N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, A. I. Gorshkov // Litologiya i poleznye iskopaemye [Lithology and Minerals]. – 2003. – № 1. – P. 87–96.
47. Zinchuk, N. N. Genezis i rasprostranenie kaolinit-montmorillonitov v osadochnom chekhle [Genesis and distribution of kaolinite-montmorillonites in sedimentary cover] / N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, B. P. Gradusov // News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration. – 1997. – № 4. – P. 35–43.
48. Zinchuk, N. N. Stroenie i mineralogicheskie osobennosti kor vyvetrivaniya kimberlitov na malyh trubkah Yakutii [Structure and mineralogical features of weathering crusts of kimberlites on small pipes of Yakutia] / N. N. Zinchuk, D. D. Kotelnikov, S. V. Soboleva // Bulletin of the Moscow Society of Nature Researchers. Geological Department. – 1997. – Vol. 72. – № 5. – P. 56–64.
49. 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.
50. Zinchuk, N. N. Tektonika i almazonosnyj magmatizm [Tectonics and diamondiferous magmatism] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh: VSU, 2004. – 282 p.
51. Zinchuk, N. N. Istoricheskaya minerageniya v 3-h tomah: T. 1. Vvedenie v istoricheskuyu minerageniyu [Historical minerageny in 3 volumes: Vol. 1. Introduction to the historical minerageny] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh: VSU, 2005. – 590 p.
52. Zinchuk, N. N. Istoricheskaya minerageniya v 3-h tomah: T. 2. Istoricheskaya minerageniya drevnih platform [Historical minerageny in 3 volumes: Vol. 2. Historical mineralogy of ancient platforms] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh: VSU, 2007. – 570 p.
53. Zinchuk, N. N. Istoricheskaya minerageniya v 3-h tomah: T. 3. Istoricheskaya minerageniya podvizhnykh superpoyasov [Historical minerageny in 3 volumes: Vol. 2. His-

torical mineralogy of mobile super-belts] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev. – Voronezh: VSU, 2008. – 622 p.
54. Zinchuk, N. N. Istoriko-mineragenicheskij analiz korennoj almazonosnosti Sibirskoj platformy [Historical-mineragenetic analysis of primary diamond content of the Siberian platform] / N. N. Zinchuk, A. D. Savko, L. T. Shevyrev // Materials of the Research Institute of Geology at the Voronezh SU. – Voronezh: VGU, 2010. – Iss. 61. – 100 p.
55. Kedrova, T. V. Rossypi almazov Nakynskogo kimberlitovogo polya [Diamond placers of the Nakyn kimberlite field] / T. V.Kedrova, I. N. Bogush, N. N. Zinchuk [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2022. – Vol. 63. – № 3. – P. 245–254.
56. Koptil, V. I. Tipomorfizm almazov severo-vostoka Sibirskoj platformy v svyazi s problemoj prognozirovaniya i poiskov almaznyh mestorozhdenij [Typomorphism of diamonds from the north-eastern part of the Siberian Platform for the purposes of exploration and prospecting of diamond deposits]: Extended abstract of Candidate's thesis (Geology and Mineralogy) / Koptil V. I. – Novosibirsk: Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 1994. – 25 p.
57. Kotelnikov, D. D. Tipomorfnye osobennosti i paleogeograficheskoe znachenie slyudistyh mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of mica minerals] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geology and Prospecting. – 1996. – № 1. – P. 53–61.
58. Kotelnikov, D. D. Osobennosti glinistyh mineralov v otlozheniyah razlichnyh osadochnyh formacij [Characteristic features of clay minerals in sediments of various sedimentary formations] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geology and Prospecting. – 1997. – № 2. – P. 53–63.
59. Kotelnikov, D. D. [Usloviya nakopleniya i postsedimentacionnogo preobrazovaniya glinistyh mineralov v osadochnom chekhle zemnoj kory [Accumulation conditions and post-sedimentary transformation of clay minerals in sedimentary cover of the Earth's crust] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Bulletin of the Moscow Society of Nature Researchers. Geological Department. – 2001. – Vol. 76. – № 1. – P. 45–53.
60. Kotelnikov, D. D. Geologicheskaya interpretaciya rezultatov izucheniya glinistyh mineralov v osadochnom chekhle zemnoj kory [Geological interpretation of the study results of clay minerals in sedimentary cover of the Earth's crust] / / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2001. – № 12. – P. 45–51.
61. Kotelnikov, D. D. Ob anomalii obshchej skhemy preobrazovaniya razbuhayushchih glinistyh mineralov pri pogruzhenii soderzhashchih ih otlozhenij v stratisferu [On the anomaly of the general transformation pattern of swelling clay minerals during immersion of sediments containing them into the stratisphere] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk // // Bulletin of the Voronezh State University. Geology. – 2003. – № 2. – P. 57–68.
62. Kotelnikov, D. D. Morfogeneticheskie raznovidnosti kaolinita v korah vyvetrivaniya i osadochnom chekhle zemnoj kory. Statya 1. Mekhanizm obrazovaniya kaolinita v korah vyvetrivaniya razlichnyh petrohimicheskih tipov porod [Morphogenetic varieties of kaolinite in weathering crusts and sedimentary cover of the Earth's crust. Article 1. Formation mechanism of kaolinite in the weathering crusts of various petrochemical types of rocks] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk, V. A. Kuzmin // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geology and Prospecting. – 2006. – № 5. – P. 19–25.
63. Kotelnikov, D. D. Stadijnost i napravlennost preobrazovaniya serpentina i flogopita v kimber-litah trubki Katoka (Angola) [Stages and direction of serpentine and phlogopite transformation in kimberlites of the Catoka pipe (Angola)] / D. D. Kotelnikov, N. N. Zinchuk, Yu. B. Stegnitsky [et al.] // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geology and Prospecting. – 2005. – № 2. – P. 16–23.
64. Lapin, A. V. Izotopnyj sostav Sr- i Nd-kimberlitov i konvergentnyh s nimi porod Sibirskoj platformy [Izotopic compositions of Sr- and Nd-kimberlites and associated rocks of the Siberian platform] / A. V. Lapin, A. V. Tolstov, A. V. Antonov // Reports of the RAS. – 2007. – Vol. 414. – № 1. – P. 557–560.
65. Matsyuk, S. S. Opticheskaya spektroskopiya mineralov verhnej mantii [Optical spectroscopy of upper mantle minerals] / S. S. Matsuk, N. N. Zinchuk. – M.: Nedra, 2001. – 428 p.
66. Pokhilenko, N. P. Anomalnye kimberlity Sibirskoj platformy i kratona Slejv, Kanada, ih vazhnejshie osobennosti v svyazi s problemoj prognozirovaniya i poiskov almazov [Anomalous kimberlites of the Siberian platform and Slave Craton, Canada, their principal features in view ofdiamond exploration and prospecting] / N. P. Pokhilenko, N. V. Sobolev, N. N. Zinchuk // Collected papers: Almazy i almazonosnost Timano-Uralskogo regiona [Diamonds and Diamond Content of the Timan-Ural Region]. – Syktyvkar: Geoprint, 2001. – P. 19–21.
67. Rozen, O. M. Sostav i vozrast zemnoj kory severo-vostoka Sibirskoj platformy: izuchenie ksenolitov v kimberlitah i kernov glubokih skvazhin [Composition and age of the Earth's crust in the north-eastern part of the Siberian platform: studying xenoliths in kimberlites and core samples from deep wells] / O. M. Rozen, L. K. Levskiy, D. Z. Zhuravlev [et al.] // Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geology and Prospecting. – 2006. – № 4. – P. 18–28.
68. Savko, A. D. Almazonosnost Voronezhskoj anteklizy [Diamond bearing of the Voronezh anteclise] /A. D. Savko, N. N. Zinchuk, L. T. Shevyrev [et al.] // Materials of the Research Institute of Geology at the Voronezh SU. – Voronezh: VGU, 2003. – Iss. 17. – 121 p.
69. Serokurov, Yu. N. Space methods for forecasting and prospecting of diamond deposits / Yu. N. Serokurov, V. D. Kalmykov, V. M. Zuev. – M.: Nedra, 2001. – 198 p.
70. Tsyganov, V. A. O probleme ocenki generalnoj sovokupnosti po nesluchajnym vyborkam (na primere indikacionnyh harakteristik kimberlitov) [On the problem of estimating the general totality by non-random samples (on the ex-

ample of the indicative characteristics of kimberlites)] / V. A. Tsyganov, N. N. Zinchuk, V. P. Afanasyev // Reports of the USSR AS. – 1988. – № 301. – P. 672–677.
71. Clifford, T. N. A structural framework of Africa / T. N. Clifford // African Magmatism and Tectonics. – Edinburgh: Oliwer and Boyd, 1970. – P. 1–16.
72. Rosen, O. M. Yakutian kimberlite position in the Sibirian craton and composition of the upper and lower crust / O. M. Rosen, V. P. Serenko, Z. V. Spetsius [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2002. – Vol. 43. – № 1. – P. 3–26.

Информация об авторах:

Зинчук Николай Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик АН РС (Я), Председатель Западно-Якутского научного центра Академии наук Республики Саха (Якутия) (678170, Российская Федерация, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Тихонова, д. 5/1; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru).

Зинчук Мария Николаевна – научный сотрудник Западно-Якутского научного центра Академии наук Республики Саха (Якутия) (678170, Российская Федерация, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, ул. Тихонова, д. 5/1).

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), Chairman of the West-Yakutian Science Centre of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) (5/1 Tikhonova, Mirny, RS (Ya), Russian Federation 678170; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru).

Maria N. Zinchuk – Researcher at the West-Yakutian Research Centre of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) (5/1 Tikhonova, Mirny, RS (Ya), Russian Federation 678170).

Для цитирования:

Зинчук, Н. Н. Геолого-петрофизические и минералого-петрографические исследования кимберлитовых пород / Н. Н. Зинчук, М. Н. Зинчук // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 5–26.

For citation:

Zinchuk, N. N. Geologo-petrofizicheskie i mineralogo-petrograficheskie issledovaniya kimberlitovyh porod [Geological-petrophysical and mineralogic-petrographic studies of kimberlite rocks] / N. N. Zinchuk, M. N. Zinchuk // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 5–26.

Дата поступления статьи: 02.02.2025
Прошла рецензирование: 13.03.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 02.02.2025
Reviewed: 13.03.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 552.11: (470.11+470.13)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-27-39

Девонские базальты и долериты Тимана и полуострова Канин: петрография, минералогия, геохимия, изотопия

А. М. Шмакова, К. В. Куликова

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

alex.sch92@yandex.ru

Аннотация

В работе приведена обобщающая информация о петрографических, минералогических и изотопно-геохимических особенностях девонских базальтоидов п-ова Канин, Северного, Среднего и Южного Тимана. Основными породообразующими минералами являются клинопироксены и плагиоклазы, представленные как вкрапленниками, так и кристаллами основной массы. Из рудных минералов установлены титаномагнетит, редко встречается ильменит, пирит, халькопирит, галенит. Акцессорные минералы представлены апатитом и калиевым полевым шпатом (КПШ). Породы относятся преимущественно к нормально-щелочным базальтам и соответствуют толеитовой серии. Суммарные концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) имеют широкие вариации: п-ов Канин = 36,5–81,27 г/т, Северный Тиман = 35,6–64,2, Средний Тиман = 62,0–88,6, Южный Тиман = 44,82–52,41 г/т. Породы характеризуются геохимическими особенностями, типичными для магматических пород основного состава, сформированными в континентальной внутриплитной геодинамической обстановке. Мантийный источник, давший начало расплавам, был обогащен коровым компонентом. Наименее дифференцированные расплавы, более всего соответствующие первичным магмам, из которых формировались базальтоиды Тимана и п-ова Канин образовались при плавлении шпинелевого лерцолита, при степени плавления от 10 до 30 %.

Ключевые слова:

долериты, базальты, п-ов Канин, Тиман

Devonian basalts and dolerites of the Timan and the Kanin Peninsula: petrography, mineralogy, geochemistry, isotopy

A. M. Shmakova, K. V. Kulikova

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

alex.sch92@yandex.ru

Abstract

The paper presents general information on the petrographic, mineralogical and isotope-geochemical features of the Devonian basaltoids of the Kanin Peninsula, the Northern, Middle and Southern Timan. The main rock-forming minerals are clinopyroxenes and plagioclases represented by both phenocrysts and crystals of the groundmass. Among ore minerals, there are titanomagnetite, rarely ilmenite, pyrite, chalcopyrite, and galena. Accessory minerals are apatite and potassium feldspar. The rocks are mainly normal-alkaline basalts and correspond to the tholeiitic series. Total concentrations of rare-earth elements have wide variations: Kanin Peninsula = 36.5–81.27 ppm, Northern Timan = 35.6–64.2 ppm, Middle Timan = 62.0–88.6 ppm, Southern Timan = 44.82–52.41 ppm. The rocks are characterized by geochemical features typical of igneous rocks of basic composition, formed in a continental intraplate geodynamic setting. The mantle source, which gave rise to the melts, was enriched by the crustal component. The least differentiated melts, most closely corresponding to the primary magmas from which the basaltoids of Timan and the Kanin Peninsula were formed, were formed by spinel lherzolite melting with a melting degree from 10 to 30 %.

Keywords:

dolerites, basalts, Kanin Peninsula, Timan

Введение

Канино-Тиманский регион является северо-восточной окраиной Восточно-Европейской платформы и включает в себя п-ов Канин, Северный, Средний и Южный Тиман, которые формируют кулисообразную гряду, вытянутую в северо-западном направлении (1150х80 – 160 км). В пределах гряды фундамент сложен метаморфизованными верхнерифейскими породами, осадочный чехол представлен отложениями от нижнего силура до верхней перми (рис. 1) [2]. На территории региона известны большие площади девонских базальтов, а также дайки и силлы долеритов. Генезис данных пород до сих пор является предметом споров. По мнению одних исследователей [3–5], в девонском периоде, активно проходили процессы плюмового магматизма, который и обусловил появление базальтов трапповой формации, а также щелочных пород и трубок кимберлитов. По версии других [6–8], в пределах изучаемого региона в девонское время проходили процессы рифтогенеза, приведшие к излияниям базальтов,

внедрению даек и силлов долеритов. На сегодняшний день нет единой точки зрения на природу трапповых базальтов и их подводящих каналов – даек. Также отсутствует подробная вещественная характеристика этих пород на современном аналитическом уровне.

Цель работы – уточнение геодинамической обстановки формирования девонских базальтоидов Канино-Тиманского региона, определение типа и вещественного состава их мантийных источников.

Материалы и методы

Образцы базальтов Северного Тимана (реки Сула, Белая) были взяты из коллекции Б. А. Остащенко, В. В. Рожковой, Б. А. Малькова. Пробы пород Южного Тимана отобраны из керна скважины "С10" ООО "Тимано-Печорский научно-исследовательский центр". Описание и фотографирование петрографических шлифов пород проводили на поляризационном микроскопе Nicon Eclipse LV100ND. Химический состав минералов и растровые снимки получены с помощью сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсным спектрометром X-Max (аналитики: Е. М. Тропников, А. С. Шуйский). С помощью методов рентгенофлуоресцентного (аналитик: С. Т. Неверов) и классического химического (аналитики: О. В. Кокшарова, Н. В. Туленкова, Т. А. Прудова, Т. В. Осипова) анализов был получен химический состав пород. Концентрации элементов-примесей в базальтах были получены методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) (спектрометр Agilent 7700, аналитик: Г. В. Игнатьев), исследования проведены в ЦКП «Геонаука» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Исследования изотопного состава Sm, Nd, Rb и Sr (см. табл. 3) проведены в ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург.

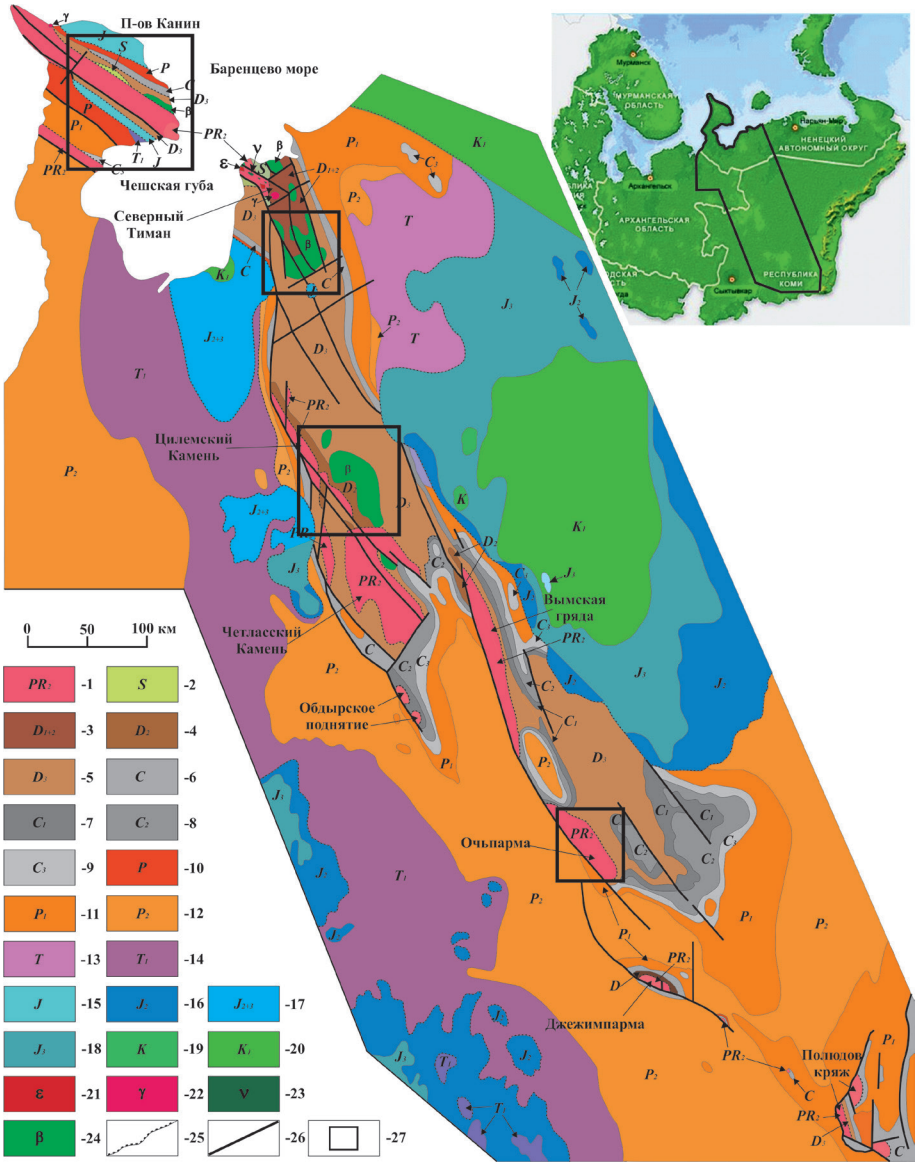


Рисунок 1. Геологическая карта-схема Тимана и п-ова Канин (по: [1]): 1 – верхний протерозой (PR_2); 2 – силур (S); 3 – нижний и средний девон (D_{2-3}); 4 – средний девон (D_2); 5 – верхний девон (D_3); 6 – карбон (C); 7 – нижний карбон (C_1); 8 – средний карбон (C_2); 9 – верхний карбон (C_3); 10 – пермь (P); 11 – нижняя пермь (P_1); 12 – верхняя пермь (P_2); 13 – триас (T); 14 – нижний триас (T_1); 15 – юра (J); 16 – средняя юра (J_2); 17 – средняя и верхняя юра (J_{2-3}); 18 – верхняя юра (J_3); 19 – мел (K); 20 – нижний мел (K_1); 21 – сиениты (ε); 22 – гранитоиды (γ); 23 – долериты (ν); 24 – базальты (β); 25 – несогласное залегание; 26 – разломы; 27 – районы исследований.

Figure 1. Geological sketch-map of the Timan and the Kanin Peninsula (according to [1]): 1 – Upper Proterozoic (PR_2); 2 – Silurian (S); 3 – Lower and Middle Devonian (D_{2-3}); 4 – Middle Devonian (D_2); 5 – Upper Devonian (D_3); 6 – Carboniferous (C); 7 – Lower Carboniferous (C_1); 8 – Middle Carboniferous (C_2); 9 – Upper Carboniferous (C_3); 10 – Permian (P); 11 – Lower Permian (P_1); 12 – Upper Permian (P_2); 13 – Triassic (T); 14 – Lower Triassic (T_1); 15 – Jurassic (J); 16 – Middle Jurassic (J_2); 17 – Middle and Upper Jurassic (J_{2-3}); 18 – Upper Jurassic (J_3); 19 – Cretaceous (K); 20 – Lower Cretaceous (K_1); 21 – syenites (ε); 22 – granitoids (γ); 23 – dolerites (ν); 24 – basalts (β); 25 – unconformable bedding; 26 – faults; 27 – research areas.

Геологическое строение района исследований

Девонские базальты Тимана и п-ова Канин выделяются в составе таврояхинской (D_3tv), кумушкинской ($D_3k\acute{s}$), валсовской (D_3vl) и джъерской (D_3dz) свит, а дайки и силлы долеритов – в составе канино-тиманского долеритового комплекса (βD_3kt) [9]. Распространение базальтоидов в регионе неравномерное, большие площади покровных базальтов установлены на Северном и Среднем Тимане. Самая большая мощность покровных базальтов зафиксирована на Северном Тимане (160–170 м), на Среднем Тимане мощность значительно меньше – 25–30 м [10]. Дайки долеритов чаще встречаются на п-ове Канин и Среднем Тимане и прорывают рифейские отложения. Преоблада-

ющее простирание даек субмеридиональное, мощность составляет 1,5–50 м.

Петрографические и минералогические особенности пород

Базальты п-ова Канин обладают миндалекаменной текстурой в сочетании с пойкилоофитовой и интерсертальной микроструктурами основной массы. Помимо видимых миндалин округлой и чечевицеобразной форм (1–10 мм), состоящих из хлорита и кальцита, в породе отмечаются мелкие амебовидные миндалины хлоритового состава размером около 0,2 мм. Содержание миндалин в породе варьирует от 1 до 20 %. Также встречаются секреции яйцевидной формы размером до 20 см, выполненные кварцем и аметистом. Вкрапленники представлены лейстами плагиоклаза (до 0,5 мм) (центр зерен – An_{83}–An_{87}, край зерен – An_{74}–An_{77}), в единичных случаях зернами клинопироксена (центр зерен – авгит, край зерен – ферроавгит) (0,25–0,35 мм). Основная масса сложена микролитами сохранившегося и измененного плагиоклаза (центр зерен – An_{67}–An_{76}, край зерен – An_{52}–An_{71}) с размером 100–200 мкм. В породе наблюдаются мелкие зерна часто замещенного пироксена (центр зерен – авгит, край зерен – ферроавгит) (размер 100–250 мкм) и изометричные зерна гомогенного (рис. 2 а) и скелетного титаномагнетита (80 мкм). Отмечаются зерна изометричного и шестоватого барита (100 мкм). Вулканическое стекло замещено вторичными минералами. Помимо миндалин отмечаются небольшие прожилки, заполненные кварцем (рис. 3 а, б).

У долеритов п-ова Канин выделяются следующие особенности. По размерности зерен структура долеритов делится на тонко- (0,25–0,6 мм) и мелкозернистую (1,0–1,5 мм). Текстура пород чаще всего массивная, в единичных случаях – миндалекаменная. Миндалины мелкие (до 1 мм), зональные, выполнены сидеритом, кальцитом и кварцем. Содержание миндалин в породе варьирует от 10 до 15 %. Микроструктура пород офитовая, реже – порфировая, пойкилоофитовая. Редкие порфировые вкрапленники (до 1,8 мм) представлены незональными лейстами плагиоклаза (центр зерен – An_{83}, край зерен – An_{71}). Основная масса породы сложена клинопироксенами и плагиоклазами. Плагиоклаз (центр зерен – An_{50}–An_{72}, край зерен – An_{30}–An_{60}) встречается в виде лейст размером от 0,5 до 1,5 мм, часто наблюдается замещение минерала поздним альбитом или олигоклазом. Клинопироксен представлен ксеноморфными, реже – гипидиоморфными кристаллами размером от 0,25 до 1,5 мм. В некоторых зернах отмечается структура распада твердого раствора, выраженная в виде наличия составов пижонита (центр зерен – авгит, субкальциевый авгит, магнезиальный и промежуточный пижонит, край зерен – авгит, ферроавгит, реже – субкальциевый ферроавгит и железистый пижонит). Рудные минералы – эвгедральные или скелетные кристаллы титаномагнетита со структурой распада (рис. 2 б) или без нее (размер – 0,5 мм, реже – 1 мм). Реже встречаются халькопирит, пирит, ильменит и галенит. Акцессорные минералы – скелетные изометричные или игольчатые кристаллы (размер – 0,01–0,03 мм) апатита иединичные зерна КПШ (размер – до 0,1 мм). Межзерновое пространство выполнено стеклом, чаще всего замещенное палагонитом (рис. 3 в, г).

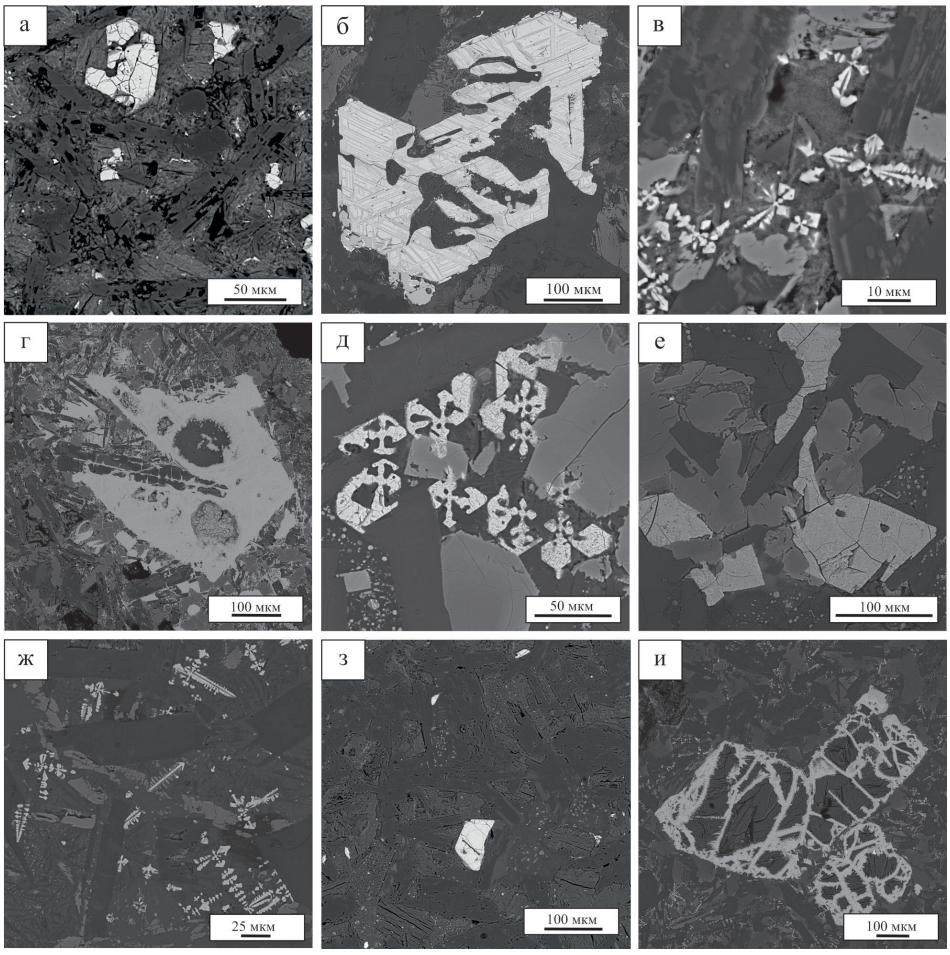


Рисунок 2. Кристаллы титаномагнетита: а, б – полуостров Канин: а – гомогенные эвгедральные кристаллы, б – скелетные кристаллы со структурой распада; в, г – Северный Тиман: в – скелетные кристаллы, г – гидроксиды железа; д, е – Средний Тиман: д – скелетные кристаллы, е – эвгедральные кристаллы; ж-и – Южный Тиман: ж – скелетные кристаллы, з – эвгедральные кристаллы, и – гидроксиды железа (фото в обратно рассеянных электронах).

Figure 2. Titanomagnetite crystals: а,б – Kanin Peninsula: а – homogeneous euhedral crystals, б – skeletal crystals with a structural chain; в, г – Northern Timan: в – skeletal crystals, г – iron hydroxides; д, е – Middle Timan: д – skeletal crystals, е – euhedral crystals; ж-и – Southern Timan: ж – skeletal crystals, з – euhedral crystals, и – iron hydroxides (photo in reverse-intelligent electrons).

Базальты Северного Тимана (реки Сула, Белая) представлены массивными и миндалекаменными разновидностями, с интерсертальной и порфировой структурами основной массы. Содержание миндалин варьирует от менее 1 до 20 %, форма округлая, амебовидная, размером от 0,1 до 4 мм. Миндалины выполнены хлоритом, кварцем, иногда с каймами карбонатов, реже анальцимом. Порфировые вкрапленники представлены преимущественно лейстами плагиоклаза с прямой зональностью (размер – 0,1–2 мм) (центр зерен – An_{63-81}– край зерен An_{49-68}), редко изометричными зернами пироксена (размер – 0,4–0,6 мм) (центр зерен – авгит, край зерен – ферроавгит). У некоторых вкрапленников плагиоклаза (р. Сула) отмечается замещение альбитом, КПШ и цеолитами. Основная масса базальтов сложена микролитами плагиоклаза (0,1–0,25 мм) (центр зерен An_{57}–An_{67}, край зерен An_{35}–An_{55}), иногда подверженного соссюритизации и изометричными зернами пироксена (0,1–0,25 мм) (центр зерен – авгит, магнезиальный пижонит, край зерен – ферроавгит, промежуточный пижонит). Рудные минералы – скелетные кристаллы титаномагнетита (размер – до 0,04 мм) (рис. 2 в), редкие зерна халькопирита (до 50 мкм) и гидроксиды железа (рис. 2 г), развивающиеся в межзерновом пространстве. Акцессорные минералы представлены титанитом, который образует изметричные зерна (размер – 0,1 мм) в интерстициях. Также в межзерновом пространстве установлены амебовидные агрегаты хлорита, редкие зерна сидерита и стекло (рис. 4 а, б).

Среднетиманские базальты (р. Цильма) имеют массивную или миндалекаменную текстуру и порфировую структуру с интерсертальной, реже – пойкилоофитовой основной массой. Содержание миндалин в породе варьирует от 10 до 15 %. Отмечается два типа миндалин. Первый тип – амебовидные миндалины, реже – округлые, размером 0,3–0,6 мм, выполненные хлоритом, с каймами карбонатов (железосодержащий доломит) и кварца. Второй тип – крупные трубчатые, реже – уплощенные миндалины агатов размером от 1 до 20 см. В миндалекаменных базальтах с миндалинами хлорита отмечаются измененный плагиоклаз, а также высокое содержание агрегатов карбонатов (железистого доломита). Порфировые вкрапленники наблюдаются в массивных, не измененных базальтах и представлены таблитчатыми кристаллами плагиоклаза (0,4–0,8 мм, реже – 1 мм) и удлиненными кристаллами клинопироксена (0,8 мм, реже – 1 мм) (центр зерен – авгит, край зерен – ферроавгит). У вкрапленников плагиоклаза отмечается прямая и «осцилляторная» зональность. Прямая зональность обусловлена понижением концентрации кальция от центра к краю. «Осцилляторная» зональность характеризуется сменой содержаний кальция от центра к краю: An_{71} –An_{80}– An_{68}–$An_{47.}$Основная масса породы представлена микролитами плагиоклаза (0,2 мм) (центр зерен – An_{52}–An_{80}, край зерен – An_{49}–An_{63}) и изометричными зернами клинопироксена (0,2 мм) (центр зерен – авгит, субкальциевый авгит, магнезиальный и промежуточный пижонит, край зерен – субкальциевый авгит, ферроавгит). В зернах пироксена наблюдаются структуры распада твердого раствора. Рудные минералы представлены мелкими эвгедральными (см. рис. 2 е) или скелетными (см. рис. 2 д) кристаллами титаномагнетита (0,05–0,15 мм), реже – зернами халькопирита и пирита. Межзерновое пространство заполнено стеклом или заместившим его палагонитом (10–20 %) (рис. 4 в, г).

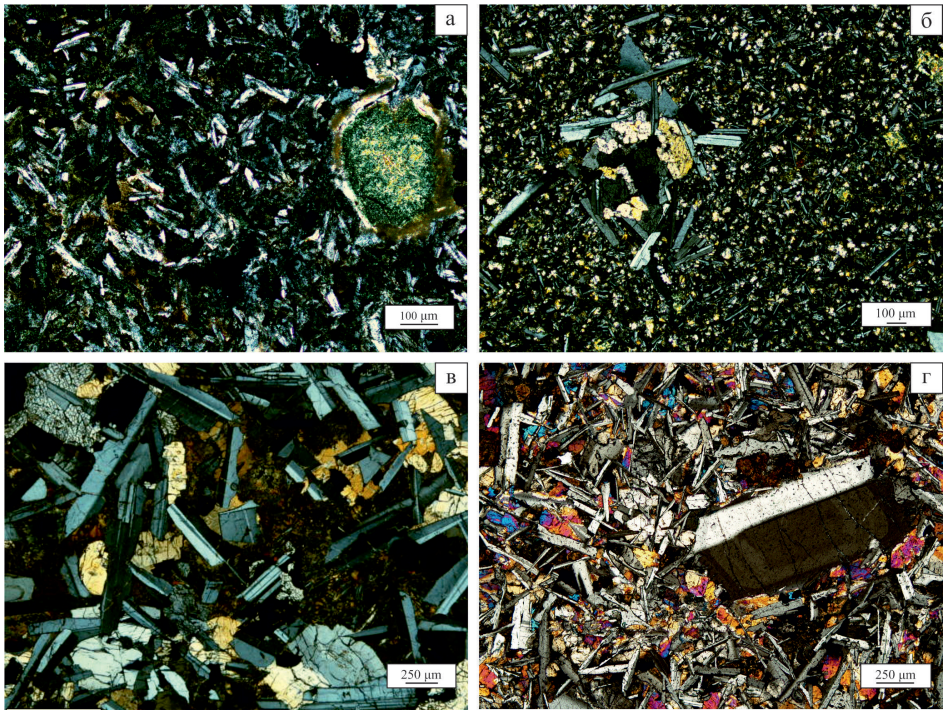


Рисунок 3. Микрофотографии шлифов пород полуострова Канин: а, б – базальты юго-восточной части: а – миндалекаменные базальты; б – пойкилоофитовая структура; в, г – долериты: в – порфировая структура в долеритах юго-восточной части; г – порфировые вкрапленники плагиоклаза в долеритах центральной части.
Figure 3. Micrographs of thin sections of rocks from the Kanin Peninsula: а, б – basalts of the southeastern part of the Kanin Peninsula: а – amygdaloidal basalts, б – poikilophitic structure; в, г – dolerites of the peninsula: в – porphyry structure in dolerites of the southeastern part of the peninsula, г – porphyry phenocrysts of plagioclase in dolerites of the central part of the peninsula.

Базальты Южного Тимана обладают миндалекаменной текстурой и порфировой структурой в сочетании с интерсертальной микроструктурой основной массы. Содержание миндалин в породе – от 2 до 15 %. Форма амебовидная, реже – округлая, размер – от 0,4–3 мм, миндалины выполнены хлоритом, иногда с каймами карбонатов. Также отмечаются кварцевые миндалины. Вкрапленники представлены пироксеном (до 1,25 мм), реже – плагиоклазом (до 0,8 мм). Порфировые вкрапленники пироксена зональные, в центре зерен соответствуют эндиопсиду или авгиту, по периферии – авгиту, реже – ферроавгиту. Вкрапленники плагиоклаза базальтов Южного Тимана также

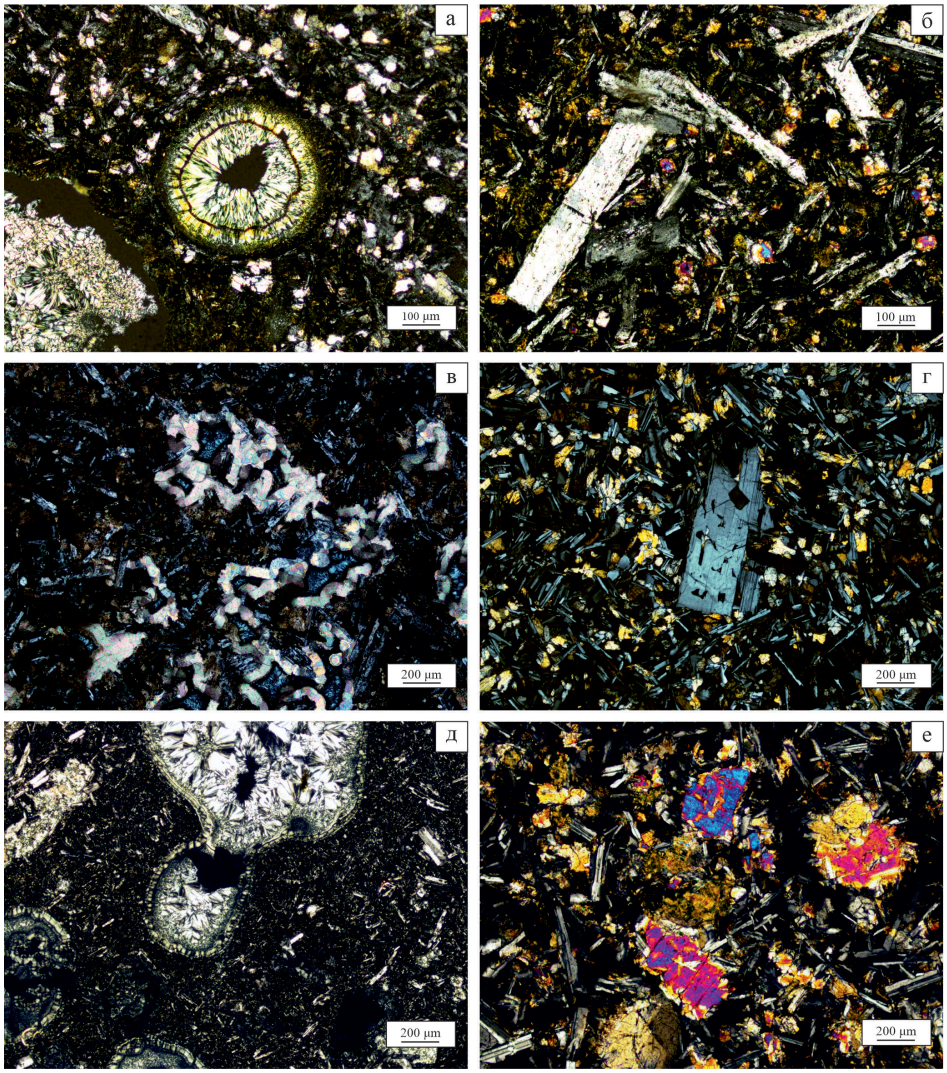


Рисунок 4. Микрофотографии шлифов: а, б – базальты Северного Тимана (реки Сула, Белая): а – миндалекаменные базальты, б – порфировые вкрапленники плагиоклаза; в, г – базальты Среднего Тимана (р. Цильма): в – амебовидные миндалины в базальтах, г – порфировые вкрапленники плагиоклаза; д, е – базальты Южного Тимана (скв. 10): д – миндалекаменные базальты, е – зерна пироксена и лейсты плагиоклаза в базальтах.
Figure 4. Micrographs of thin sections: а, б – basalts of the Northern Timan (Sula, Belaya rivers): а – amygdaloid basalts, б – porphyritic phenocrysts of plagioclase; в, г – basalts of the Middle Timan (Tsilma river): в – amoeboid amygdaloids in basalts, г – porphyritic phenocrysts of plagioclase; д, е – basalts of the Southern Timan (well 10): д – amygdaloid basalts, е – pyroxene grains and plagioclase laths in basalts.

обладают прямой и «осцилляторной» зональностью, как и базальты Среднего Тимана. «Осцилляторная» зональность в плагиоклазе характеризуется сменой содержаний кальция от центра к краю: An_{65}–An_{69}–An_{77}–An_{75}–An_{48}. Основная масса породы представлена зональными микролитами плагиоклаза (0,4 мкм) (центр зерен – An_{64}–An_{77}, край зерен – An_{38}–An_{68}) и зональными зернами пироксена (0,4 мкм) (центр зерен – авгит, край зерен – ферроавгит). Часто порода подвержена изменениям и основной плагиоклаз может быть замещен альбитом. К акцессорным минералам относятся мелкие округлые агрегаты апатита (0,004 мм). Из рудных минералов установлены эвгедральные (рис. 2 ж) и скелетные кристаллы титаномагнетита (размер – 0,5–0,8 мм) (рис. 2 з) в единичных случаях с более титановой каймой. Также отмечаются редкие изометричные зерна ильменита. Наблюдается метасоматическое замещение силикатных минералов оксидами железа, которые развиваются по ним в трещинах (рис. 2 и). Отмечается большое содержание хлорита в интерстициях. Межзерновое пространство заполнено стеклом, в редких – случаях карбонатом (рис. 4 д, е).

Изотопно-геохимические особенности пород

В химическом составе изученных пород были выделены следующие особенности. Содержание SiO_2 в основных породах Тимана и п-ова Канин варьирует в довольно широких пределах – от 47,08 до 57,01 мас. % (табл. 1) [11, 12]. По данным диаграммы TAS (рис. 5 а), породы тяготеют к области нормальнощелочных базальтов (Na_2O+K_2O=1,96–3,20). На общем фоне выделяются два образца Северного и Южного Тимана. Они попадают в поля щелочных разновидностей (Na_2O+K_2O=6,67–7,87), за счет высокого содержания Na_2O=5,03–6,17 мас. %. Большинство составов базальтов соответствуют натриевому типу, кроме одного образца Северного Тимана, который относится к натриево-калиевому типу. Коэффициент глиноземистости (al') варьирует от 0,64 до 1,29. Концентрация TiO_2 достигает 0,92–2,18 мас. %, P_2O_5=0,06–0,19, Mg#=0,17–0,52 (табл. 1). Судя по величинам отношений $FeO+Fe_2O_3/MgO$ относительно содержания (Na_2O+K_2O), породы относятся к толеитовой серии (рис. 5 б). По данным вариационной диаграммы TiO_2–Mg#, наиболее титанистыми и дифференцированными разновидностями являются породы районов рек Сулы и Белой (Северный Тиман) и Цильмы (Средний Тиман), а наименее – базальтоиды мыса Мал. Румяничный Северного Тимана и скв. 10 Южного Тимана (рис. 5 в).

Суммарные концентрации РЗЭ в базальтах Тимана и п-ова Канин имеют следующие значения: п-ов Канин = 36,5–81,27 г/т, Северный Тиман = 35,6–64,2, Средний Тиман = 62,0–88,6, Южный Тиман = 44,82–52,41 г/т. Базальты Тимана имеют однотипные распределения РЗЭ и элементов-примесей. Для исследуемых пород характерно не высокое обогащение легкими РЗЭ относительно тяжелых (La_N/Yb_N=1,44–2,65) (табл. 2) [11, 12, 15]. В базальтах и долеритах, по сравнению с базальтами СОХ нормального типа,

Таблица 1

Химический состав девонских базальтоидов Тимана и полуострова Канин, мас.%

Table 1

Chemical composition of Devonian basaltoids of the Timan and the Kanin Peninsula, wt.%

Номер образца	1					2			3				4		5	
	400201	400204	400207	351501	351404	400312	400402	400404	1676/2	1676/3	16771	1681/2	0-4064-7	553/298	C10/4	C10/5
SiO_2	48,70	48,14	48,44	49,42	49,72	47,24	48,28	48,68	50,55	49,89	50,19	51,18	51,23	48,72	48,19	57,01
TiO_2	2,63	1,48	1,26	1,46	1,45	2	2,03	2,12	1,28	1,39	1,36	1,60	1,67	1,99	1,25	1,42
Al_2O_3	16,36	15,11	15,05	14,34	14,08	14,08	14,5	14,07	16,08	16,17	16,75	15,5	15,01	17,11	13,93	16,46
Fe_2O_3 общ	14,55	10,97	11,66	12,5	12,6	14,18	14,28	14,39	11,03	11,37	11,37	12,09	13,5	14,03	11,33	6,66
MnO	0,14	0,15	0,19	0,25	0,23	0,24	0,19	0,19	0,16	0,18	0,18	0,18	0,19	0,23	0,25	0,09
MgO	3,18	8,20	7,57	6,76	6,69	6,52	5,93	6,55	5,34	4,63	4,41	4,72	2,93	2,79	7,25	6,35
CaO	3,38	8,73	10,92	10,53	10,99	9,95	8,63	8	10,89	8,71	12	10,00	5,02	11,74	12,42	1,75
Na_2O	3,09	2,85	1,9	1,8	1,87	2,15	2,73	2,95	2,46	4,08	2,06	2,35	5,03	2,31	2,14	6,17
K_2O	2,56	0,33	0,21	0,29	0,34	0,51	0,67	0,77	0,65	0,78	0,54	1,01	2,84	0,3	0,15	0,50
P_2O_5	0,30	0,12	0,13	0,13	0,14	0,17	0,18	0,17	0,1	0,11	0,11	0,11	0,11	0,14	0,10	0,12
п.п.п.	4,00	3,17	2,28	1,38	1,28	1,53	1,54	1,79	2,25	3,55	1,85	2,08	3	1,61	3,74	3,71
Сумма	94,89	96,08	97,33	97,48	98,11	97,04	97,42	97,89	98,54	97,31	98,97	98,74	97,53	99,36	97,02	96,52
Сумма с п.п.п.	98,89	99,25	99,61	98,86	99,39	98,57	98,96	99,68	100,79	100,86	100,82	100,82	100,53	100,97	100,76	100,23
FeO	8,10	5,81	6,92	8,27	8,61	8,75	8,75	8,76	7,17	7,82	7,33	7,48	4,84	8,83	6,87	2,13
H_2O	0,94	2,10	1,68	0,88	1,05	0,95	0,91	1,15	0,97	0,68	0,83	0,82	0,61	0,61	1,72	0,83
CO_2	0,88	0,10	0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	< 0,1	0,1	0,16	0,16	< 0,1	0,56	0,86
Mg#	0,19	0,45	0,42	0,37	0,37	0,34	0,31	0,33	0,35	0,31	0,3	0,3	0,19	0,18	0,41	0,51

Примечание. 1 – составы базальтов юго-восточной части полуострова Канин; 2 – составы долеритов юго-восточной части полуострова Канин; 3 – составы долеритов центральной части полуострова Канин; 4 – составы базальтов Северного Тимана (реки Сула и Белая); 5 – составы базальтов Южного Тимана (скв. 10). Mg# - коэффициент магнезиальности.

Note. 1 – compositions of basalts from the southeastern part of the Kanin Peninsula; 2 – compositions of dolerites from the southeastern part of the Kanin Peninsula; 3 – compositions of dolerites from the central part of the Kanin Peninsula; 4 – compositions of basalts from Northern Timan (Sula and Belaya rivers); 5 – compositions of basalts from Southern Timan (well 10). Mg# - magnesia ratio.

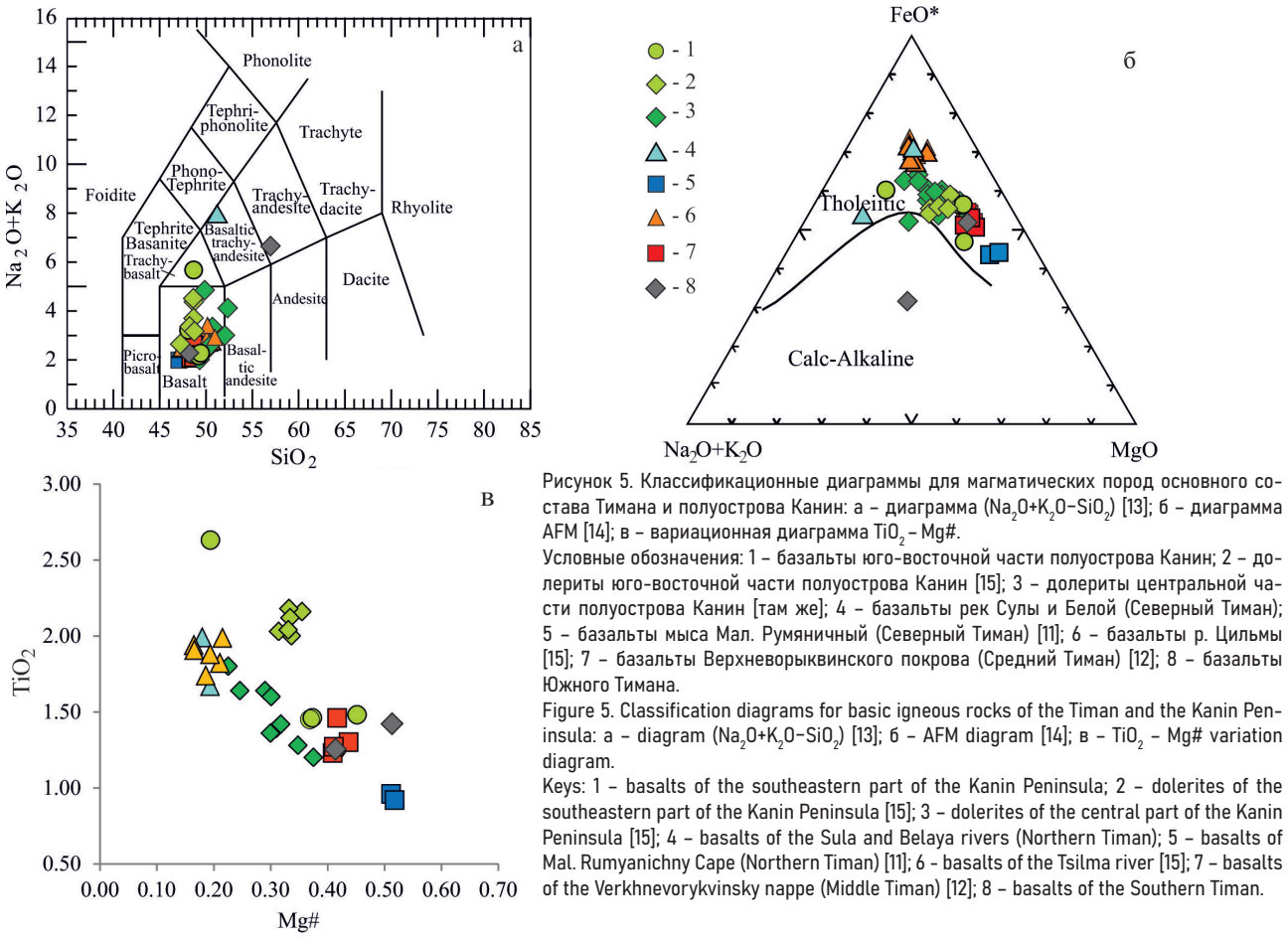


Рисунок 5. Классификационные диаграммы для магматических пород основного состава Тимана и полуострова Канин: а – диаграмма ($Na_2O+K_2O–SiO_2$) [13]; б – диаграмма AFM [14]; в – вариационная диаграмма TiO_2 – Mg#.

Условные обозначения: 1 – базальты юго-восточной части полуострова Канин; 2 – долериты юго-восточной части полуострова Канин [15]; 3 – долериты центральной части полуострова Канин [там же]; 4 – базальты рек Сулы и Белой (Северный Тиман); 5 – базальты мыса Мал. Румяничный (Северный Тиман) [11]; 6 – базальты р. Цильмы [15]; 7 – базальты Верхневорыквинского покрова (Средний Тиман) [12]; 8 – базальты Южного Тимана.

Figure 5. Classification diagrams for basic igneous rocks of the Timan and the Kanin Peninsula: a – diagram ($Na_2O+K_2O–SiO_2$) [13]; б – AFM diagram [14]; в – TiO_2 – Mg# variation diagram.

Keys: 1 – basalts of the southeastern part of the Kanin Peninsula; 2 – dolerites of the southeastern part of the Kanin Peninsula [15]; 3 – dolerites of the central part of the Kanin Peninsula [15]; 4 – basalts of the Sula and Belaya rivers (Northern Timan); 5 – basalts of Mal. Rumyanichny Cape (Northern Timan) [11]; 6 - basalts of the Tsilma river [15]; 7 – basalts of the Verkhnevorykvinsky nappe (Middle Timan) [12]; 8 – basalts of the Southern Timan.

наблюдаются относительно повышенные содержания крупноионных элементов Ba, Rb, Th, U и относительно пониженные концентрации высокозарядных элементов Zr, Hf, HREE (рис. 6). Также для пород не характерен дефицит европия и отмечается слабый ниобиевый минимум.

Для определения геодинамической обстановки формирования базальтоидов использовался ряд наименее подвижных элементов Zr, Nb, Y. По данным диаграммы отношений Zr/Y–Zr, все базальтоиды Канино-Тиманского региона можно отнести к внутриконтинентальным

Таблица 2

Содержание элементов-примесей в базальтах полуострова Канин, Северного и Южного Тимана, г/т

Table 2

Content of trace elements in basalts of the Kanin Peninsula, Northern and Southern Timan, ppm

Элемент	1		2		3	
	0-4064-7	553/298	C10/4	C10/5	351501	400207
Ba	270	99	30	31	140	101
Rb	43	5,5	1,7	2,2	5,3	1,7
Th	1,5	12	1,7	1,9	2,3	1,6
U	0,26	0,76	0,37	0,35	0,55	0,72
Nb	5,5	8,4	5,3	5,4	6	4,6
Ta	0,36	0,58	0,3	0,29	0,4	0,35
Sr	140	170	140	140	150	141
Hf	2,6	4,1	2,3	2,2	2,9	2,3
Zr	92	129	71	67	87	77
V	400	308	200	160	230	276
Co	38	46	36	35	34	45
Ni	54	42	61	67	41	91
Cr	110	97	130	130	43	217
La	7	11	6,5	5,6	8,2	6,8
Ce	19	27	16	13	20	16
Pr	2,8	3,7	2,2	1,9	2,7	2,2
Nd	13	17	9,8	8,7	12	10
Sm	4	4,8	2,9	2,6	3,4	2,8
Eu	1,6	1,7	1	0,93	1,2	1,2
Gd	5	5,8	3,6	3,2	4	3,7
Tb	0,79	1,0	0,64	0,55	0,69	0,64
Dy	4,7	5,9	3,9	3,3	4,2	3,6
Ho	0,95	1,2	0,82	0,69	0,88	0,76
Er	2,6	3,4	2,3	2	2,5	2,4
Tm	0,34	0,44	0,33	0,28	0,35	0,34
Yb	2,1	2,9	2,1	1,8	2,3	2,0
Lu	0,32	0,42	0,32	0,27	0,35	0,32
Y	24	27	19	15	20	20
∑REE	64,20	87,06	52,41	44,82	62,77	52,70
∑LREE	52,40	71,85	42,00	35,93	51,50	42,63
∑HREE	11,80	15,22	10,41	8,89	11,27	10,06
La_N/Yb_N	2,25	1,47	2,09	2,7	2,4	2,26
Nb/La	0,79	0,73	0,82	0,96	0,73	0,68
Gd_N/Yb_N	1,92	1,61	1,38	1,88	1,4	1,47

Примечание. 1 – составы базальтов Северного Тимана (реки Сула и Белая); 2 – составы базальтов Южного Тимана (скв. 10); 3 – составы базальтов юго-восточной части полуострова Канин.

Note. 1 – compositions of basalts of the Northern Timan (Sula and Belaya rivers); 2 – compositions of basalts of the Southern Timan (well 10); 3 – compositions of basalts of the southeastern part of the Kanin Peninsula.

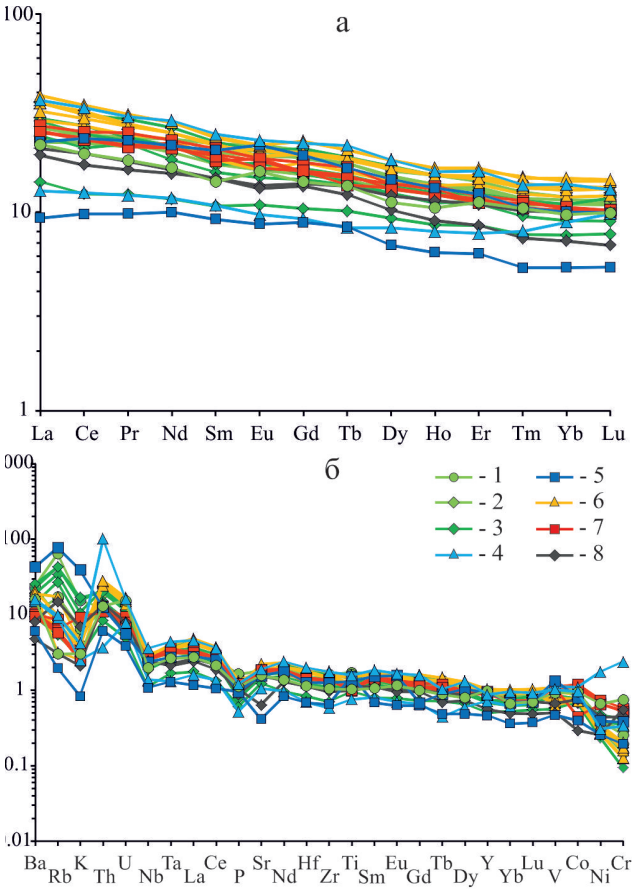


Рисунок 6. График распределения РЗЭ, нормированных к составу хондрита Cl (по: [16]) (а) и график распределения элементов-примесей, нормированных к составу базальтов СОХ (б) [17], для позднедевонских базальтоидов Канино-Тиманского региона).

Условные обозначения: 1 – базальты юго-восточной части полуострова Канин; 2 – долериты юго-восточной части полуострова Канин [15]; 3 – долериты центральной части полуострова Канин [15]; 4 – базальты рек Сулы и Белой (Северный Тиман); 5 – базальты мыса Мал. Румяничный (Северный Тиман) [11]; 6 – базальты р. Цильмы [там же]; 7 – базальты Верхневорыквинского покрова (Средний Тиман) [12]; 8 – базальты Южного Тимана.

Figure 6. Distribution graph of REE normalised to the composition of Cl chondrite (according to [16]) (a) and distribution graph of trace elements normalised to the composition of MOR basalts (б) [17] for the Late Devonian basaltoids of the Kanin-Timan region).

Keys: 1 – basalts of the southeastern part of the Kanin Peninsula; 2 – dolerites of the southeastern part of the Kanin Peninsula [15]; 3 – dolerites of the central part of the Kanin Peninsula [15]; 4 – basalts of the Sula and Belaya rivers (Northern Timan); 5 – basalts of the Mal. Rumyanichny Cape (Northern Timan) [11]; 6 – basalts of the Tsilma river [15]; 7 – basalts of the Verkhnevorykvinsky nappe (Middle Timan) [12]; 8 – basalts of the Southern Timan.

образованиям, с примесью базальтов СОХ (рис. 7 а). По соотношению Nb/Y–Zr/Y составы исследуемых базитов занимают области пересечения базальтов океанических плато и островодужных базальтов, тяготея к не плюмовым источникам (рис. 7 б).

Для определения источников базальтовых расплавов исследуемые породы были рассмотрены в системе Th–Nb-Ce [21]. На вариационной диаграмме Ce/Nb–Th/Nb точки составов большей части исследуемых пород формируют тренд, показывающий нарастание в источнике влияния коровой компоненты на исходный расплав (рис. 8 а). Судя по положению точек, наибольшее влияние коровой составляющей было оказано на базальтовую магму, из ко-

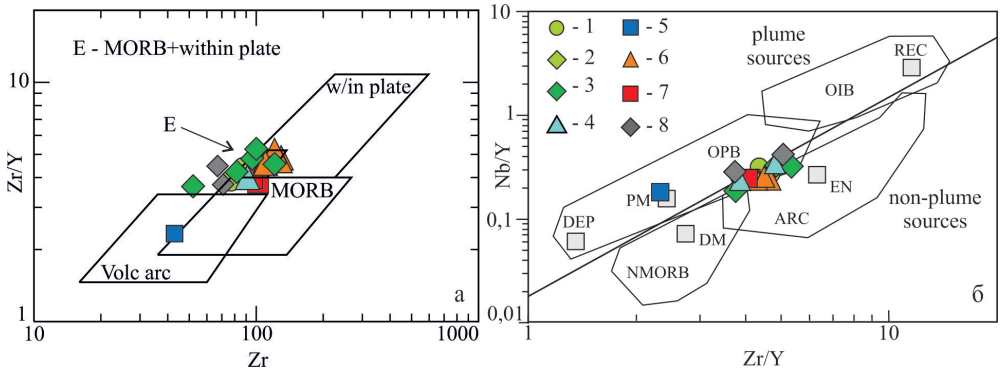


Рисунок 7. а – диаграмма Zr/Y – Zr: w/in plate – внутриплитные толеиты, MORB – базальты СОХ, E – внутриплитные толеиты и базальты СОХ, volc arc – островодужные базальты [18]; б – диаграмма Zr/Y–Nb/Y: DEP – деплетированная глубинная мантия, PM – примитивная мантия, OPB – базальты океанического плато, OIB – базальты океанических островов, REC – рециклинированный компонент, NMORB – нормальные базальты срединно-океанических хребтов, DM – верхняя деплетированная мантия, ARC – островодужные базальты, EN – обогащенный компонент [19, 20].
Условные обозначения: 1 – базальты юго-восточной части полуострова Канин; 2 – долериты юго-восточной части полуострова Канин [15]; 3 – долериты центральной части полуострова Канин [15]; 4 – базальты рек Сулы и Белой (Северный Тиман); 5 – базальты мыса Мал. Румяничный (Северный Тиман) [11]; 6 – базальты р. Цильмы [15]; 7 – базальты Верхневоркывинского покрова (Средний Тиман) [12]; 8 – базальты Южного Тимана.
Figure 7. a – Zr/Y – Zr diagram: w/in plate – intraplate tholeiites, MORB – MOR basalts, E – intraplate tholeiites and MOR basalts, volc arc – island-arc basalts [18]; б – Zr/Y – Nb/Y diagram: DEP – depleted deep mantle, PM – primitive mantle, OPB – oceanic plateau basalts, OIB – oceanic island basalts, REC – recycled component, NMORB – normal mid-ocean ridge basalts, DM – upper depleted mantle, ARC – island-arc basalts, EN – enriched component [19, 20].
Keys: 1 – basalts of the southeastern part of the Kanin Peninsula; 2 – dolerites of the southeastern part of the Kanin Peninsula [15]; 3 – dolerites of the central part of the Kanin Peninsula [15]; 4 – basalts of the Sula and Belaya rivers (Northern Timan); 5 – basalts of the Mal. Rumyanichny Cape (Northern Timan) [11]; 6 – basalts of the Tsilma River [15]; 7 – basalts of the Verkhnevorykvinsky nappe (Middle Timan) [12]; 8 – basalts of the Southern Timan.

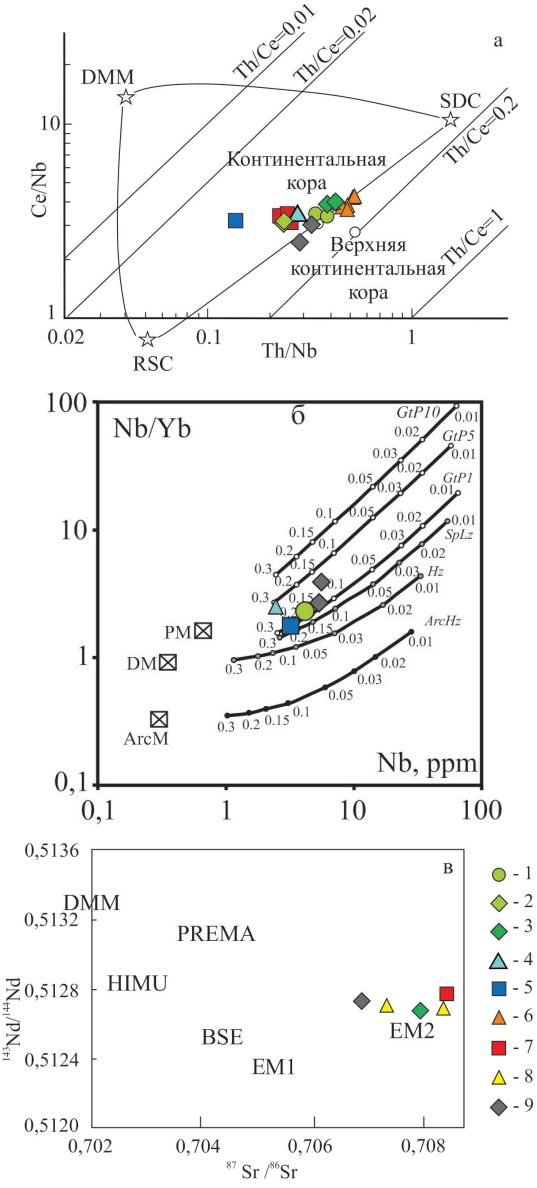


Рисунок 8. а – положение составов базальтоидов полуострова Канин и Тимана на диаграмме Ce/Nb – Th/Nb [21].
Примечание. DMM – деплетированная мантия; RSC – остаточный компонент рециклированной океанической коры; SDC – субдукционный компонент островных дуг; б – составы пород в сопоставлении с результатами численного моделирования частичного плавления разных мантийных источников в системе Nb – Nb/Yb [22]. Кривые показывают вычисленные соотношения при плавлении пород гранатового перидотита с содержанием граната 1, 5, 10 % (GtP1, GtP5, GtP10), шпинелевого лерцолита (SpLz) примитивной мантии (PM), умеренно деплетированного гарцбургита (Hz) деплетированной мантии (DM) и островодужного гарцбургита (ArcHz) поддуговой сильно деплетированной мантии (ArcM); в – $^{143}Nd/^{144}Nd$ – $^{87}Sr/^{86}Sr$ диаграмма [23–25] для базальтов Тимана и полуострова Канин. HIMU – мантия с высоким отношением U/Pb, PREMA – преобладающая мантия [26], BSE – валовый состав Земли [27, 28], EM1, EM2 – обогащенная мантия [там же].
Условные обозначения: 1 – базальты юго-восточной части полуострова Канин; 2 – долериты юго-восточной части полуострова Канин [15]; 3 – долериты центральной части полуомтрова Канин [там же]; 4 – базальты рек Сулы и Белой (Северный Тиман); 5 – базальты мыса Мал. Румяничный (Северный Тиман) [11]; 6 – базальты р. Цильмы [15]; 7 – базальты Верхневоркывинского покрова (Средний Тиман) [12], 8 – базальты Южного Тимана.
Figure 8. a – position of compositions of the Timan and Kanin Peninsula basaltoids on the Ce/Nb – Th/Nb diagram [21].
Note. DMM – depleted mantle; RSC – residual component of recycled oceanic crust; SDC – subduction component of island arcs; б – rock compositions compared with the results of numerical modeling of partial melting of different mantle sources in the Nb – Nb/Yb system [22]. The curves show the calculated ratios during melting of garnet peridotite rocks with garnet content of 1, 5, 10 % (GtP1, GtP5, GtP10), spinel lherzolite (SpLz) of the primitive mantle (PM), moderately depleted harzburgite (Hz) of the depleted mantle (DM) and island-arc harzburgite (ArcHz) of the subarc strongly depleted mantle (ArcM); в – $^{143}Nd/^{144}Nd$ – $^{87}Sr/^{86}Sr$ diagram [23-25] for basalts of the Timan and the Kanin Peninsula. HIMU – mantle with high U/Pb ratio, PREMA – dominant mantle [26], BSE – bulk composition of the Earth [27, 28], EM1, EM2 – enriched mantle [27, 28].
Keys: 1 – basalts of the southeastern part of the Kanin Peninsula; 2 – dolerites of the southeastern part of the Kanin Peninsula [15]; 3 – dolerites of the central part of the Kanin Peninsula [15]; 4 – basalts of the Sula and Belaya rivers (Northern Timan), 5 – basalts of the Mal. Rumyanichny Cape (Northern Timan) [11]; 6 – basalts of the Tsilma river [15]; 7 – basalts of the Verkhnevorykvinsky nappe (Middle Timan) [12]; 8 – basalts of the Southern Timan.

торой кристаллизовались базальтоиды Среднего Тимана (р. Цильма) и центральной части п-ова Канин. Влияние корового компонента подтверждается низким показателем Nb/La (0,54–0,96), который свидетельствует о влиянии на источник расплава древней континентальной литосферы [29].

Для определения условий выплавления магмы были использованы наименее дифференцированные составы исследуемых пород. По данным вариаций Nb–Nb/Yb [22], установлено, что расплавы, из которых формировались базальтоиды, образовались при плавлении шпинелевого лерцолита (рис. 8 б). На это указывают и низкие (Gd/Yb) n=1,04–1,92 [30].

Нами был изучена Sm–Nd и Rb–Sr изотопная система пород (табл. 3). Величины отношений $^{143}Nd/^{144}Nd$ минимальны в породах Валсовского покрова (Средний Тиман) (0,51269–0,51271), центральной части п-ова Канин (0,51268). Наиболее высокие отношения $^{143}Nd/^{144}Nd$ установлены для пород Северного Тимана (0,512849–0,512920) и базальтов юго-восточной части п-ова Канин (0,521282).

Величины ε_{Nd} имеют положительные значения и варьируют от +2,3 до +4,5 (см. табл. 1). Самые высокие значения ε_{Nd} установлены в породах Северного Тимана (+5,5), самые низкие – в центральной части п-ова Канин (+2,3). Такие значения ε_{Nd} характерны для пород мантийного происхождения.

Положение точек составов исследуемых базальтоидов на диаграмме $^{143}Nd/^{144}Nd–^{87}Sr/^{86}Sr$ сгруппированы вблизи мантийного тренда. Однако точки составов близки к области обогащенной мантии [23–25] (рис. 8 в). Высокие содержания $^{87}Sr/^{86}Sr$=0,70687–0,71167 могут быть связаны с поступлением в магму стронция из осадочных пород.

Заключение

В ходе проведенных исследований установлено, что основными породообразующими минералами базальтоидов Тимана и п-ова Канин являются зональные клинопироксены и плагиоклазы, представленные как вкрапленниками, так и кристаллами основной массы. Отмечается структура распада твердого раствора в долеритах п-ова Канин и базальтах Среднего Тимана. У вкрапленников плагиоклазов базальтов Среднего и Южного Тимана наблюдается прямая и «осцилляторная» зональность. Рудные минералы представлены преимущественно титаномагнетитом. В значительно меньшей степени (единичные зерна) встречаются ильменит, пирит, халькопирит, галенит. Акцессорные – апатит и КПШ. По данным диаграммы TAS, породы соответствуют преимущественно нормальнощелочным базальтам и относятся к толеитовой серии. Наиболее титанистыми и дифференцированными разновидностями являются породы районов рек Сулы и Белой (Северный Тиман) и Цильмы (Средний Тиман), а наименее – базальтоиды мыса Мал. Румяничный Северного Тимана и скв. 10 Южного Тимана (см. рис. 2 в). Суммарные концентрации РЗЭ в базальтах Тимана и п-ова Канин имеют широкие вариации: п-ов Канин = 36,5–81,27 г/т, Северный Тиман = 35,6–64,2, Средний Тиман = 62,0–88,6, Южный Тиман = 44,82–52,41 г/т. Базальтоиды характеризуются геохимическими особенностями, типичными для магматических пород основного состава, сформированными в континентальной внутриплитной геодинамической обстановке. Мантийный источник, давший начало расплавам, был обогащен коровой компонентой. Наименее дифференцированные расплавы, более всего соответствующие первичным магмам, из ко-

Таблица 3

Изотопный состав Sm–Nd и Rb–Sr в базальтоидах Тимана и полуострова Канин

Table 3

Isotopic composition of Sm-Nd and Rb-Sr in basaltoids of the Timan and the Kanin Peninsula

№/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ пробы	400207*	400504*	1678/1*	О-4064-8	232/А81	ЦИ-25*	С6/10	2А/11	12-2А/11	19/71	26/73	С10Т/4*
t, млн лет	419	419	419	389	389	295	389	389	389	389	389	389
Sm. мкг/г	2,96	4,41	3,40	3,91	2,00	4,524	4,2	3,9	3,9	4,53	4,38	3,40
Nd. мкг/г	10,64	15,11	12,29	13,05	6,14	16,55	14,6	13,69	13,6	17,02	16,18	11,65
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0,1681	0,1762	0,1670	0,1810	0,1968	0,1643	0,1729	0,1719	0,1748	0,1607	0,1637	0,1763
$^{143}Nd/^{144}Nd$	0,51271	0,51282	0,51268	0,512849	0,51292	0,51272	0,51279	0,51277	0,51279	0,51269	0,51271	0,512733
$e_{Nd}(T)$	+2,9	+4,6	+2,3	+4,9	+5,5	+2,7	+4,1	+3,8	+4	+2,8	+3	+2,9
$T_{DM\ (млн\ лет)}$	940	797	985	746	692	850	813	834	820	921	900	914
Rb	-	-	18,33	-	3,7	-	9,6	22,6	-	6,6	3,9	2,17
Sr	-	-	158	-	104,8	-	166,2	200,5	-	203,2	192,3	171
$^{87}Rb/^{86}Sr$	-	-	0,3379	-	0,101	-	0,167	0,033	-	0,094	0,059	0,0369
$^{87}Sr/^{86}Sr$	-	-	0,70793	-	0,7102	-	0,71167	0,70841	-	0,70833	0,70732	0,70687
+/-2s	-	-	5	-	17	-	15	3	-	18	11	5

Примечание. Пробы: 1 – базальты полуострова Канин (Чёшская губа); 2 – долериты полуострова Канин (Чёшская губа); 3 – долериты полуострова Канин (р. Тальбей); 4, 5 – базальты Северного Тимана: 4 – район р. Сулы, 5 – мыс. Бол. Румяничный [12]; 6–10 – базальты Среднего Тимана: 6 – район р. Цильмы; 7-9 – Верхневорыквинский покров [12], 10, 11 – Валсовский покров [12], 11 – Южный Тиман (скв. 10).

Условное обозначение. * авторские данные.

Note. Samples: 1 – basalts of the Kanin Peninsula (Cheshskaya Guba); 2 – dolerites of the Kanin Peninsula (Cheshskaya Guba); 3 – dolerites of the Kanin Peninsula (Talbey River); 4, 5 –basalts of the Northern Timan: 4 – Sula River area, 5 –Bol. Rumyanichny Cape [12]; 6–10 – basalts of the Middle Timan: 6 – Tsilma River area, 7–9 – Verkhnevorykvinsky nappe [12]; 10–11 – Valsovsky nappe [12], 11 — Southern Timan (well 10).

Symbol: * means the author's data.

торых формировались базальтоиды Тимана и п-ова Канин, образовались при плавлении шпинелевого лерцолита, при степени плавления от 20 до 30 %.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Оловянишников, В. Г. Геологическое развитие Северного Тимана и п-ова Канин / В. Г. Оловянишников. – Сыктывкар: Геопринт, 2004. – 80 с.
2. Тимонин, Н. И. Печорская плита: история геологического развития в фанерозое / Н. И. Тимонин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 239 с.
3. Nikishin, A. M. Late Precambrian to Triassic history of the East European craton: dynamics of sedimentary basin evolution / A. M. Nikishin, P. A. Ziegler, R. A. Stephenson [et al.] // Tectonophysics. – 1996. – Vol. 268. – P. 23–63.
4. Лобковский, Л. И. Современные проблемы геотектоники и геодинамики / Л. И. Лобковский, А. М. Никишин, В. Е. Хаин. – М.: Научный мир, 2004. – 612 с.
5. Степаненко, В. И. Канино-Тимано-Печорская провинция позднедевонского внутриплитного магматизма (положение и размеры) / В. И. Степаненко // Доклады академии наук. – 2016. – Т. 467, № 5. – С. 572—575.
6. Гецен, В. Г. Тектоника Тимана / В. Г. Гецен. – Л.: Наука, 1987. – 172 с.
7. Пучков, В. Н. Тектоника Урала. Современные представления / В. Н. Пучков // Геотектоника. – 1997. – № 4. – С. 42–61.
8. Малышев, Н. А. Геодинамическая эволюция Европейского северо-востока в девоне / Н. А. Малышев, Э. В. Шипилов // Вестник. – 2002. – № 11. – С. 2–4.
9. Опаренкова, Л. И. Легенда Тиманской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (издание второе) / Л. И. Опаренкова, Н. Ф. Иванов. – Ухта, 1999. – 150 с.
10. Тиманский кряж. Т. 2. Литология и стратиграфия, геофизическая характеристика Земной коры, тектоника, минерально-сырьевые ресурсы: монография. – Ухта: УГТУ, 2010. – 437 с.
11. Анферова, Е. А. Особенности химического состава минералов базальтов нижней части Верхне-Ворыквинского покрова (Средний Тиман) / А. Е. Анферова. // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента. Мат-лы 21-й науч. конф. – Сыктывкар; Геопринт, 2011. – С. 8–12.
12. Удоратина, О. В. Базальты Среднего Тимана: Rb-Sr, Sm-Nd, и Ar-Ar данные / О. В. Удоратина, В. Л. Андреичев, А. В. Травин [и др.] // Геология и минеральные ресурсы Европейского Северо-Востока России: материалы XVI Геологического съезда Республики Коми. Т.II. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. – 384 с.
13. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences. Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (2nd edition). Edited by R. W. LeMaitre. – Cambridge University Press, 2002. – 236 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581.
14. Irvine, T. N. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks / T.N. Irvine, W.R.A. Baragar // Canada. J. Earth Sci. – 1971. – Vol. 8. – P. 523–548.
15. Шмакова, А. М. Геохимическая характеристика позднедевонских базальтоидов полуострова Канин и Среднего Тимана / А. М. Шмакова, К. В. Куликова // Известия Коми научного центра УрО РАН. Серия «Науки о Земле». – Сыктывкар, 2021. – №3 (49). – С. 22–31. DOI 10.19110/1994-5655-2021-3-14-21.
16. Boynton, W. V. Geochemistry of rare-earth elements: Meteorite studies / W. V. Boynton // Rare Earth Element Geochemistry. – Amsterdam. – 1984. – P. 63–114.
17. Pearce, J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries / Pearce, J. A. // In: Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. Ed. R. S. Thorpe. – John Wiley and Sons, 1982. – P. 525–548.
18. Pearce, J. A., Norry M. J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb. Variations in volcanic rocks / J. A. Pearce, M. J. Norry // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1979. – Vol. 69. – P. 33–37.
19. Fitton, J. G. Thermal and chemical structure of the Iceland plume / J. G. Fitton, A. D. Saunders, M. J. Norry [et al.] // Earth Planet. Sci. Lett. – 1997. – Vol. 153. – P. 197–208. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00170-2.
20. Condie, K. C. The 1.75-Ga Iron King Volcanics in west-central Arizona: a remnant of an accreted oceanic plateau derived from a mantle plume with a deep depleted component / K. C. Condie, B. A. Frey, R. Kerrich // Lithos. – 2002. – Vol. 64. – P. 49–62. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00158-5.
21. Saunders, A. D. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints / A. D. Saunders, M. J. Norry, J. Tarney // Journal of Petrology. Special Lithosphere Issue. – 1988. – P. 415–445.
22. Yang, G. Early Carboniferous volcanic rocks of West Junggar in the western Central Asian Orogenic Belt: implications for a supra-subduction system / G. Yang, Y. Li, I. Safonova [et al.] // International Geology Review. – 2014. – Vol. 56. – P. 823–844.
23. Ivanov, A. V. Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemical and petrologic data // Geodynamics & Tectonophysics. – 2010. – Vol. 1, № 1. – P. 87–102.
24. Hofmann, A. W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism / A. W. Hofmann // Nature. – 1997. – Vol. 385. – P. 219–229.
25. Tackley, P. J. Mantle convection and plate tectonics: toward an integrated physical and chemical theory / P. J. Tackley // Science. – 2000. – Vol. 288, № 5473. – P. 2002–2007.
26. Zindler, A. Chemical geodynamics / A. Zindler, S. R. Hart // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 1986. – Vol. 14. – P. 493–571.

27. Armienti, P. Do we really need mantle components to define mantle composition? / P. Armienti, D. Gasperini // Journal of Petrology. – 2007. – Vol. 48. – P. 693–709.
28. Stracke, A. FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo / A. Stracke, A. W. Hofmann, S. R. Hart // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2005. – Vol. 6. Q05007. doi:10.1029/2004GC000824.
29. Lightfoot, P. C. Remobilization of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia / P. C. Lightfoot, C. J. Howkesworth, J. Hergt [et al.] // Contrib Mineral Petrol. – 1993. – Vol. 114. – P. 171–188.
30. Hirschmann, M. M. A possible role for garnet pyroxinite in the origin of the "garnet signature" in MORB / M. M. Hirschmann, E. M. Stolper // Contrib. Mineral. Petrol. – 1996. – Vol. 124. – P. 185–208. https://doi.org/10.1007/S004100050184.

References

1. Olovyanishnikov, V. G. Geologicheskoe razvitie Severnogo Timana i p-ova Kanin [Geological development of the Northern Timan and the Kanin Peninsula] / V. G. Olovyanishnikov. – Syktyvkar: Geoprint, 2004. – 80 p.
2. Timonin, N. I. Pechorskaya plita: istoriya geologicheskogo razvitiya v fanerozoe [The Pechora plate: history of geological development in the Phanerozoic] / N. I. Timonin. – Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998. – 239 p.
3. Nikishin, A. M. Late Precambrian to Triassic history of the East European craton: dynamics of sedimentary basin evolution / A. M. Nikishin, P. A. Ziegler, R. A. Stephenson [et al.] // Tectonophysics. – 1996. – Vol. 268. – P. 23–63.
4. Lobkovsky, L. I. Sovremennye problemy geotektoniki i geodinamiki [Modern problems of geotectonics and geodynamics] / L. I. Lobkovsky, A. M. Nikishin, V. E. Khain. – M.: Nauchny mir, 2004. – 612 p.
5. Stepanenko, V. I. Kanino-Timano-Pechorskaya provinciya pozdnedevonskogo vnutriplitnogo magmatizma (polozhenie i razmery) [Kanin-Timan-Pechora province of late Devonian intraplate magmatism (position and dimensions)] / V. I. Stepanenko // Reports of the Academy of Sciences. – 2016. – Vol. 467, № 5. – P. 572–575.
6. Getsen, V. G. Tektonika Timana [Tectonics of the Timan] / V. G. Getsen. – Leningrad: Nauka, 1987. – 172 p.
7. Puchkov, V. N. Tektonika Urala. Sovremennye predstavleniya [Tectonics of the Urals. Modern concepts] / V. N. Puchkov // Geotektonika [Geotectonics]. – 1997. – № 4. – P. 42–61.
8. Malyshev, N. A. Geodinamicheskaya evolyuciya Evropejskogo severo-vostoka v devone [Geodynamic evolution of the European northeast in the Devonian] / N. A. Malyshev, E. V. Shipilov // Bulletin. – 2002. – № 11. – P. 2–4.
9. Oparenkova, L. I. Legenda Timanskoj serii listov Gosudarstvennoj geologicheskoj karty Rossijskoj Federacii masshtaba 1:200 000 (izdanie vtoroe) [Legend of the Timan series of sheets of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:200,000 (second edition)] / L. I. Oparenkova, N. F. Ivanov. – Ukhta, 1999. – 150 p.
10. Timanskij kryazh. T. 2. Litologiya i stratigrafiya, geofizicheskaya harakteristika Zemnoj kory, tektonika, mineralno-syr'evye resursy: monografiya [Timan Ridge. Vol. 2. Lithology and stratigraphy, geophysical characteristics of the Earth's crust, tectonics, mineral resources: monograph]. – Ukhta: USTU, 2010. – 437 p.
11. Anferova, E. A. Osobennosti himicheskogo sostava mineralov bazaltov nizhnej chasti Verhne-Vorykvinskogo pokrova (Srednij Timan) [Features of chemical composition of minerals of basalts of the lower part of the Verkhne-Vorykvinsky nappe (Middle Timan)] / E. A. Anferova // Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severouralskogo segmenta [Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-Severouralsk Segment]. Proc. 21st Scientific Conf. – Syktyvkar: Geoprint, 2011. – P. 8–12.
12. Udoratina, O. V. Bazalty Srednego Timana: Rb-Sr, Sm-Nd, i Ar-Ar dannye [Basalts of the Middle Timan: Rb-Sr, Sm-Nd, and Ar-Ar data / O. V. Udoratina, V. L. Andreichev, A. V. Travin [et al.] // Geologiya i mineralnye resursy Evropejskogo Severo-Vostoka Rossii [Geology and Mineral Resources of the European North-East of Russia]: Proc. of the XVI Geological Congress of the Komi Republic. Vol. II. – Syktyvkar: IG Komi Science Centre Ural Branch RAS, 2014. – 384 p.
13. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences. Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks (2nd edition). Edited by R. W. LeMaitre. – Cambridge University Press, 2002. – 236 p. https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581.
14. Irvine, T. N. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks / T.N. Irvine, W.R.A. Baragar // Canada. J. Earth Sci. – 1971. – Vol. 8. – P. 523–548.
15. Shmakova, A. M. Geohimicheskaya harakteristika pozdnedevonskih bazaltoidov poluostrova Kanin i Srednego Timana [Geochemical characteristics of the Late Devonian basaltoids of the Kanin Peninsula and the Middle Timan] / A. M. Shmakova, K. V. Kulikova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – Syktyvkar. – 2021. – № 3 (49). – P. 22–31. DOI 10.19110/1994-5655-2021-3-14-21.
16. Boynton, W. V. Geochemistry of rare-earth elements: Meteorite studies / W. V. Boynton // Rare Earth Element Geochemistry. – Amsterdam. – 1984. – P. 63–114.
17. Pearce, J. A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries / Pearce, J. A. // In: Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. Ed. R. S. Thorpe. – John Wiley and Sons, 1982. – P. 525–548.
18. Pearce, J. A., Norry M. J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb. Variations in volcanic rocks / J. A. Pearce,

M. J. Norry // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1979. – Vol. 69. – P. 33–37.
19. Fitton, J. G. Thermal and chemical structure of the Iceland plume / J. G. Fitton, A. D. Saunders, M. J. Norry [et al.] // Earth Planet. Sci. Lett. – 1997. – Vol. 153. – P. 197–208. https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00170-2.
20. Condie, K. C. The 1.75-Ga Iron King Volcanics in west-central Arizona: a remnant of an accreted oceanic plateau derived from a mantle plume with a deep depleted component / K. C. Condie, B. A. Frey, R. Kerrich // Lithos. – 2002. – Vol. 64. – P. 49–62. https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00158-5.
21. Saunders, A. D. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints / A. D. Saunders, M. J. Norry, J. Tarney // Journal of Petrology. Special Lithosphere Issue. – 1988. – P. 415–445.
22. Yang, G. Early Carboniferous volcanic rocks of West Junggar in the western Central Asian Orogenic Belt: implications for a supra-subduction system / G. Yang, Y. Li, I. Safonova [et al.] // International Geology Review. – 2014. – Vol. 56. – P. 823–844.
23. Ivanov, A. V. Deep-level geodynamics: boundaries of the process according to geochemical and petrologic data // Geodynamics & Tectonophysics. – 2010. – Vol. 1, № 1. – P. 87–102.
24. Hofmann, A. W. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism / A. W. Hofmann // Nature. – 1997. – Vol. 385. – P. 219–229.
25. Tackley, P. J. Mantle convection and plate tectonics: toward an integrated physical and chemical theory / P. J. Tackley // Science. – 2000. – Vol. 288, № 5473. – P. 2002–2007.
26. Zindler, A. Chemical geodynamics / A. Zindler, S. R. Hart // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. – 1986. – Vol. 14. – P. 493–571.
27. Armienti, P. Do we really need mantle components to define mantle composition? / P. Armienti, D. Gasperini // Journal of Petrology. – 2007. – Vol. 48. – P. 693–709.
28. Stracke, A. FOZO, HIMU, and the rest of the mantle zoo / A. Stracke, A. W. Hofmann, S. R. Hart // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2005. – Vol. 6. Q05007. doi: 10.1029/2004GC000824.
29. Lightfoot, P. C. Remobilization of the continental lithosphere by a mantle plume: major-, trace-element, and Sr-, Nd-, and Pb-isotopic evidence from picritic and tholeiitic lavas of the Noril'sk District, Siberian Trap, Russia / P. C. Lightfoot, C. J. Howkesworth, J. Hergt [et al.] // Contrib Mineral Petrol. – 1993. – Vol. 114. – P. 171–188.
30. Hirschmann, M. M. A possible role for garnet pyroxinite in the origin of the "garnet signature" in MORB / M. M. Hirschmann, E. M. Stolper // Contrib. Mineral. Petrol. – 1996. – Vol. 124. – P. 185–208. https://doi.org/10.1007/S004100050184.

Благодарность (госзадание):

Исследования выполнены в рамках государственного задания Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Acknowledgements (state task)

The research was carried out within the frames of the state task of the Institute of Geology Komi SC UB RAS.

Информация об авторах:

Шмакова Александра Михайловна – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Федерального исследовательского центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; https://orcid.org/0000-0002-9770-6696 (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: alex.sch92@yandex.ru).

Куликова Ксения Викторовна – ведущий научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Федерального исследовательского центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; https://orcid.org/0000-0003-1714-824X (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: fopolina1@yandex.ru).

About the authors:

Alexandra M. Shmakova – Junior Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ORCID (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: alex.sch92@yandex.ru).

Kseniya V. Kulikova – Leading Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ORCID (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: fopolina1@yandex.ru).

Для цитирования:

Шмакова, А. М. Девонские базальты и долериты Тимана и полуострова Канин: петрография, минералогия, геохимия, изотопия / А. М. Шмакова, К. В. Куликова // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 27–39.

For citation:

Shmakova, A. M. Devonskie bazalty i dolerity Timana i p-ova Kanin: petrografiya, mineralogiya, geohimiya, izotopiya [Devonian basalts and dolerites of the Timan and the Kanin Peninsula: petrography, mineralogy, geochemistry, isotopy] / A. M. Shmakova, K. V. Kulikova // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 27–39.

Дата поступления статьи: 04.03.2024
Прошла рецензирование: 25.03.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 04.03.2024
Reviewed: 25.03.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 552.321.1(234.851)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-40-52

Гранитоиды евъюганского комплекса Харбейского блока (Полярный Урал): новые геохронологические данные

И. И. Голубева*, А. В. Травин,***, В. Б. Хубанов****, А. С. Шуйский***

* Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Сыктывкар
** Институт геологии и минералогии имени В. С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск
*** Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск
**** Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ
iigolybeva2@yandex.ru

Аннотация

Впервые проведенные $^{40}Ar/^{39}Ar$-изотопно-геохронологические исследования породообразующих минералов мусковита (345±4 млн лет) и порфиробластического микроклина (347±14 млн лет) в гнейсо-гранитах евъюганского комплекса Харбейского блока Харбейского антиклинория показали, что они являются синкинематическими и образовались в условиях Уральского орогенеза, так как полученные возрастные данные практически совпадают с возрастами глаукофанового метаморфизма (347±72 млн лет) и эксгумации эклогитов – (360 млн лет) на Полярном Урале. Новые определения радиологического U/Pb возраста гнейсо-гранитов методом лазерной абляции (494±2 млн лет) с двойственной природой гнейсовидности гранитов (реликтовой и динамической) способствуют пониманию геологии становления сложного полигено-реоморфического евъюганского комплекса. Формирование гнейсо-гранитов евъюганского комплекса укладывается предположительно в период от позднего кембрия до раннего карбона.

Ключевые слова:

гнейсо-граниты, евъюганский комплекс, Полярный Урал, Харбейский антиклинорий, U/Pb и $^{40}Ar/^{39}Ar$-методы

Granitoids of the Evyugan complex of the Kharbey block (Polar Urals): new geochronological data

I. I. Golubeva*, A. V. Travin,***, V. B. Khubanov****, A. S. Shuisky***

* 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 and Mineralogy named after V. S. Sobolev of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk
***Novosibirsk State University, Novosibirsk
****Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude
iigolybeva2@yandex.ru

Abstract

By the first conducted $^{40}Ar/^{39}Ar$-isotope-geochronological studies of muscovite (345±4 Ma) and porphyroblastic microcline (347±14 Ma) in gneissogranites of the Evyugan complex of the Kharbey block of the Kharbey anticlinorium, these rock-forming minerals are synkinimatic and formed under the conditions of the Ural orogeny. The obtained ages practically coincide with the ages of glaucophane metamorphism (347±72 Ma) and eclogite exhumation (360 Ma) in the Polar Urals. New determinations of radiological U/Pb age of gneissogranites using the laser ablation method (494±2 Ma) with the dual nature of granite gneissic banding (relict and dynamic) contribute to the understanding the formation geology of the polygenic-rheomorphic Evyugan complex. The formation of gneissogranites of the Evyugan complex presumably matches with the period from the Late Cambrian to the Early Carboniferous.

Keywords:

gneissogranites, Evyugan complex, Polar Urals, Kharbey anticlinorium, U/Pb and $^{40}Ar/^{39}Ar$ methods

Введение

На Полярном Урале в Харбейском антиклинории (Центрально-Уральская зона), представляющем блок допалеозойского фундамента, выделяются Марункеуский и Харбейский (Ханмехойский по В. А. Душину [1]) высокометаморфизованные блоки (рис. 1 а). Харбейский блок, сложенный метаморфизованными вулканогенно-осадочными толщами – амфиболитами, пара- и ортогнейсами, кристаллическими ставролит-гранатовыми сланцами, зелеными сланцами (относимыми к ханмехойской, лаптоюганской, париквасьшорской свитам) нижнего протерозоя [2], выделяется в структурном плане северо-западным простиранием, отличающимся от уральского северо-восточного и высокой насыщенностью территории многочисленными мелкими телами гнейсо-гранитов (рис. 1 б). В **Харбейском**

блоке Г. А. Кейльманом [3] выделены две брахиформные антиклинальные структуры – *Лаптаюганский* и *Евъюганский* гранитно-мигматитовые купола, образовавшиеся в результате вздымания гранитизированных толщ в центре многочисленных автохтонных пластообразных тел гнейсо-гранитов (рис. 1 б). Гнейсо-граниты как продукты ультраметаморфизма формируют согласные с вмещающими сланцами вытянутые или линзовидные тела с унаследованными от докембрийского материнского субстрата текстурными и минеральными особенностями. Учитывая пластообразные формы гранитных тел и гнейсовидные структуры пород, В. Н. Охотников [4] предложил модель образования комплекса, заключающуюся в интрузивном синскладчатом становлении гнейсо-гранитов.

По его мнению, граниты приобретают гнейсовидную текстуру и своеобразные формы пластообразных тел в результате «внедрения гранитоидов в условиях проявления интенсивных динамических нагрузок», а направление полосчатости «подчинялось как общей линейной ориентированности интрузий, так и субмеридиальному простиранию осевых плоскостей складчатых структур» [там же, с. 32], что предполагает их интрузивный характер и интервал формирования, относимый к раннему ордовику, подтверждаемый наличием гранитных галек в конгломератах нижнего карбона.

Согласно легенде Государственной геологической карты 1:1 000 00 масштаба третьего поколения [2], рассматриваемые гнейсо-граниты отнесены к евъюганскому комплексу поздневендско-кембрийского возраста, включающего породы в полях развития метаморфитов в Харбейском и Марункеуском блоках (рис. 1 б). Ранее эти гранитоиды картировались под названием полярноуральского или харбейского магматических комплексов [6, 7]. В. А. Душин разделил гнейсо-граниты на два магматиче-

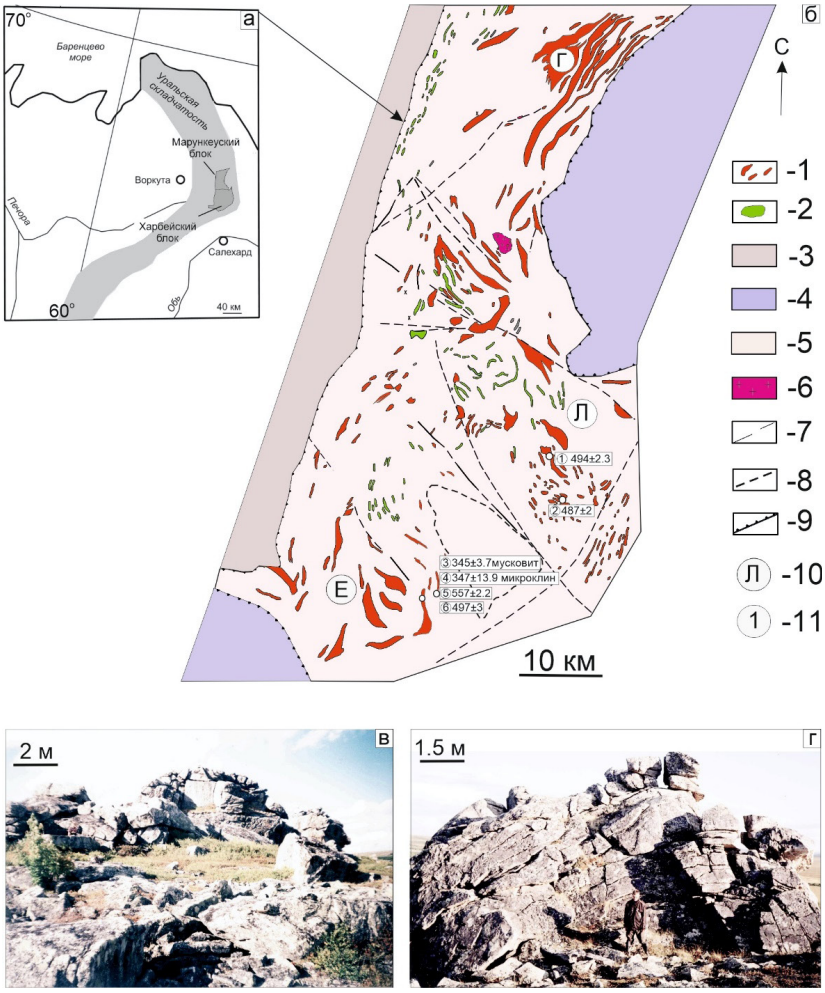


Рисунок 1. Схема геологического строения Харбейского антиклинория и обнажения гнейсо-гранитов: а – расположение Харбейского антиклинория в Уральской складчатой системе, сложенного Харбейским и Марункеуским блоками; б – схема геологического строения Харбейского антиклинория по В. Н. Охотникову [4], Г. А. Кейльману [3], Л. И. Зылевой и др. [2].

Условные обозначения: 1 – гнейсо-граниты; 2 – метадолериты; 3 – метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения (филлиты, серицит-альбит-хлоритовые сланцы, мраморизованные известковистые песчаники, измененные толеитовые базальты, туффиты) палеозойского возраста (орангский аллохтон); 4 – сутурная зона палеозойского возраста; 5 – метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения нижнего протерозоя (амфиболиты, пара- и ортогнейсы, кристаллические ставролит-гранатовые сланцы, зеленые парасланцы); 6 – эклогиты и метаморфиты высоких давлений (марункеуский комплекс); 7 – разломы; 8 – граница париквасьшорской свиты по В. Н. Охотникову [4]; 9 – надвиги; 10 – заглавными буквами «Л», «Е» обозначены гранитные купола по Г. А. Кейльману [3]: Л – Лаптаюганский, Е – Евъюганский; Г – Гердизский массив; 11 – цифрами обозначены места отобранных проб гнейсо-гранитов и породообразующих минералов для определения возрастов: 1 – образец Вз 703 (цирконы, 494± 2,3 млн лет, U/Pb метод); 2 – образец ПВГ 71 (цирконы, 487± 2 млн лет, U/Pb метод [5]); 3 – образец ПВГ 33–22 (мусковит, 345± 3,7 млн лет, $^{40}Ar/^{39}Ar$ метод); 4 – образец ПВГ 33-22 (микроклин, 347± 13,9 млн лет, $^{40}Ar/^{39}Ar$ метод); 5 – образец ПВГ 33-22 (цирконы, 557±2 млн лет, U/Pb метод [там же]); 6 – ПВГ 40 (цирконы, 497±лет, U/Pb метод, [там же]). в – скальный выход гнейсо-гранитов Лаптаюганского купола; г – складка в массиве гнейсо-гранитов Лаптаюганского купола.

Figure 1. Geological structure of the Kharbey anticlinorium and outcrops of gneissogranites: a – location of the Kharbey anticlinorium within the Uralian fold system, composed of the Kharbey and Marunkeu blocks; б – geological structure of the Kharbey anticlinorium according to V. N. Okhotnikov [4], G. A. Keilman [3], L. I. Zyleva et al. [2]; в – rock outcrop of gneissogranites in the Laptayugan dome; г – fold in the gneissogranite massif of the Laptayugan dome.

Symbols: 1 – gneissogranites, 2 – metadolerites, 3 – metamorphosed volcanogenic-sedimentary deposits (phyllites, sericite-albite-chlorite schists, marbleised calcareous sandstones, altered tholeiitic basalts, tuffites) of Paleozoic age (Orang allochthon), 4 – Paleozoic suture zone, 5 – metamorphosed metamorphosed volcanogenic-sedimentary deposits of the Lower Proterozoic (amphibolites, para- and orthogneisses, crystalline staurolite-garnet schists, green paraschists), 6 – eclogites and high-pressure metamorphic rocks (Marunkeu complex); 7 – faults, 8 – boundary of the Parikvashor formation according to V. N. Okhotnikov [4]; 9 – thrusts, 10 – uppercase letters ‘Л’, ‘E’ indicate granite domes by G. A. Keilman [3]: Л – Laptayugan, E – Evyugan; Г – Gerdizsky massif; 11 – figures indicate sampling locations of gneissogranites and rock-forming minerals for age determination: 1 – Вз 703 (zircons, 494 ± 2.3 Ma, U-Pb method), 2 –ПВГ 71 (zircons, 487 ± 2 Ma, U-Pb method [5]), 3 – ПВГ 33-22 (muscovite, 345 ± 3.7 Ma, 40Ar/39Ar method), 4 – ПВГ 33-22 (microcline, 347 ± 13.9 Ma, 40Ar/39Ar method), 5 – ПВГ 33-22 (zircons, 557 ± 2 Ma, U/Pb method [5]), 6 – ПВГ 40 (zircons, 497 ± Ma, U/Pb method [5]).

ских комплекса: раннепротерозойский евъюганский мигматит-плагиогранитовый и вендско-раннекембрийский сядатаяхинский гранитовый [1].

Изотопные датировки цирконов из полигенных гнейсо-гранитов евъюганского комплекса Харбейского блока формируют временной интервал – 639–487 млн лет [1, 2, 5]. Возрастные данные (577–685 млн лет) цирконов из вмещающих амфиболитов ханмехойской свиты, по которым развивались гнейсо-граниты [8, 9], предполагают их частичную унаследованность из субстрата.

Полученные в последнее время Sm/Nd методом палеозойские возраста породообразующих минералов гранитизированных амфиболитов ханмехойской свиты – граната, плагиоклаза и породы в целом (392±23 – 367±40 млн лет), роговой обманки, продатированной $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом (345,8±4,7 млн лет) [9, 10], а также новые (представленные в нашей статье) авторские U/Pb геохронологические данные для цирконов из гранитов (образец Вз 703) и $^{40}Ar/^{39}Ar$ датировки породообразующих минералов – калиевого полевого шпата и мусковита из ранее датированного нами 494±2,3 млн лет (SHRIMP-II) гранита (рис. 1 б, образец ПВГ 33-22) [5], подтверждают правомерность вышеприведенных гипотез и многоэтапность становления полингенно-реоморфных гнейсо-гранитов Харбейского блока Харбейского антиклинория.

В работе приведены новые U/Pb геохронологические данные для цирконов из гнейсо-гранитов Харбейского блока Харбейского антиклинория, полученные методом ИСП масс-спектрометрии с лазерной абляцией (образец Вз 703), а также $^{40}Ar/^{39}Ar$ датировки породообразующих минералов – калиевого полевого шпата и мусковита из ранее датированного нами U/Pb методом (SHRIMP-II) катаклазированного гнейсо-гранита (рис. 1 б, образец ПВГ 33-22) [там же].

Материалы и методы

Объект изучения – гнейсо-граниты, отобранные на Полярном Урале в южном районе Харбейского блока в ходе экспедиционных работ 2004 и 2007 гг. Петрографические исследования проводили в лаборатории петрографии ИГ Коми НЦ УрО РАН (оптический микроскоп OLYMPUS BX 51).

Определение содержаний породообразующих элементов производили на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре Shimadzu XRF-1800 и методом классической химии. Содержание FeO получено методом титрометрии, Na_2O и K_2O – методом пламенной фотометрии. Корректировку полученных результатов осуществляли по стандартным образцам.

Состав минералов и растровые снимки получены с помощью сканирующего микроскопа Tescan Vega 3 с энергодисперсионным спектрометром X-Max (ЦКП «Геонаука» г. Сыктывкар).

Трасс-элементы в гнейсо-гранитах и плагиогнейсах определяли методом ИСП-МС на квадрупольном масс-спектрометре ELAN 9000 (PerkinElmer Instruments) в ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) по методике [11].

Определение U/Pb изотопного возраста цирконов проводили методом лазерной абляции с использованием УФ лазера UP-213 (NewVawe Research) и одноколлекторного магнитно-секторного масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Element XR (Thermo Science) (LA-ICP MS метод) в ЦКП "Геоспектр" ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) по методике В. Б. Хубанова и др. [12]. Монофракции калиевого полевого шпата и мусковита выделены из гнейсо-гранитов по стандартной методике. $^{40}Ar/^{39}Ar$ датирование выполнено в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН методом ступенчатого нагрева по методике А. В. Травина и др. [13].

Гнейсо-граниты Харбейского блока

Вещественный состав гнейсо-гранитов. Гнейсо-граниты Харбейского блока Харбейского антиклинория, входящие в евъюганский комплекс [1], представлены элювиальными развалами среди амфиболитов и их альбитизированных разностей, эпидот-амфиболовых и биотит-амфиболовых плагиогнейсов и пегматитов в виде плит размерами до 1 м и более и редкими останцами высотой до 1–4 м (рис. 1 в, г). Гнейсо-граниты занимают многочисленные, относительно небольшие изолированные вытянутой миндалевидной формы поля, расположенные среди задернованных участков. Граниты серого, розового или кремового цвета характеризуются гнейсовидной текстурой (рис. 2), обусловленной унаследованным от материнского субстрата ориентированным ростом чешуек биотита или распределением клиноцоизита в виде цепочек согласно сланцеватости. Среди развалов гнейсо-гранитов отмечаются плитки лейкократовых эпидот-биотитовых и биотитовых плагиогнейсов, реже – амфиболитов или биотит-амфиболовых сланцев ханмехойской свиты. В сланцах и плагиогнейсах обнаруживается начальная стадия гранитизации, проявляющаяся в виде порфиробластеза альбита, нередко с шахматной структурой, и развития интерстиционного микроклина. В гнейсо-гранитах, в отличие от гранитизированных амфиболитов и биотит-амфиболовых сланцев и гнейсов, появляется биотит на фоне полного исчезновения роговой обманки. Отличительной особенностью гнейсо-гранитов Харбейского блока Харбейского антиклинория является кристаллизация минеральной фазы алланита. Отсутствие коренных выходов не позволяет проследить на местности контакты гнейсо-гранитов с вмещающими породами, но во всех случаях отмечаются признаки проявленного в разной степени катаклаза, сопровождающегося перекристаллизацией кварца и вторичной полевошпатизацией.

Петрохимические характеристики выборочных образцов гнейсо-гранитов Харбейского блока варьируют из-за нестабильного минерального состава, зависимого от степени гранитизации субстрата, первичных особенностей последнего и влияния вторичных изменений. Породы характеризуются относительно высокой кремнеземистостью (масс. %): 72,4–78,0, умеренной щелочностью (7,7–8,1) и относительно высокой глиноземистостью Al_2O_3=10,95–14,46 (табл. 1, рис. 3 а). Наиболее значимые колебания содержаний породообразующих компонентов в гнейсо-гранитах

установлены для CaO=0,35–1,79 масс. % и коэффициента железистости ($FeO+Fe_2O_3$)\MgO=0,0–5,0, обусловленные варьирующими количеством биотита, клиноцоизита, роговой обманки и их процентным соотношением, а также степенью гранитизации.

Концентрация трасс-элементов характеризуется широким интервалом (г/т) Rb=54,8–137; Y=0.0–54,0; Sr=20–470, Nb 5,0–15,81 (табл. 1). Отмечается необычное для гранитов в целом весьма низкое содержание Zr 12–70 (г/т), меньшее в десятки раз кларковых значений для кислых пород. Несмотря на значительные вариации концентраций элементов-примесей, их нормированные на хондрит спектры (кроме сланцев и гнейсов) характеризуются высокой степенью подобия, что отражает их генетическое единство (рис. 2 б). Для гнейсо-гранитов характерны повышенные концентрации легких редкоземельных элементов и наличие европиевой аномалии, отсутствующей в плагиогнейсах и сланцах (рис. 2 а, б). На классификационной диаграмме субстратно-генетической принадлежности гранитов [15] (табл. 1, рис. 3 б) дискриминационные точки анализов гнейсо-гранитов расположены в основном в полях I и S, что создает неопределенность в их генетической интерпретации. Можно предположить принадлежность гранитов к апобазитовому (I–граниту) изолитогенному ряду, учитывая глиноземистость биотита Al_2O_3=15,36–17,44 масс. % (табл. 2), указывающую на установленный ранее базитовый субстрат плагиогнейсов ханмехойской свиты [9]. Глиноземистость биотита в гней-

Таблица 1

Петрохимические (масс. %) и геохимические (г/т) составы гнейсо-гранитов Харбейского блока

Table 1

Petrochemical (wt. %) and geochemical (ppm) compositions of gneiss-granites from the Kharbey block

Компоненты	ПВГ70	**ПВГ71**	ПВГ73а	ПВГ75	**Вз703**	Вз700	ПВГ65а	ПВГ66	ПВГ 66б	ПВГ 67	**ПВГ 40**	ПВГ 38-3	ПВГ 48	**ПВГ 33-22**	ПВГ 75
SiO_2	72,4	75,86	77,26	76,34	77,06	77,06	78,6	75,48	77,41	75,8	77,68	77,56	63,21	74,75	76,34
TiO_2	0,24	0,13	0,04	0,12	0,14	0,14	0,09	0,2	0,11	0,1	0,13	0,08	0,8	0,17	0,12
Al_2O_3	14,46	12,07	12,6	12,35	11,57	14,01	12,67	13,29	13,04	12,1	10,95	11,88	14,89	13,84	12,35
Fe_2O_3	0,91	0,67	0,14	0,71	1,08	0,68	0,4	0,95	0,57	0,6	1,19	0,65	2,43	0,48	0,71
FeO	1,18	0,75	0,28	0,67	0,58	0,61	0,65	0,84	0,71	0,69	0,61	0,58	2,22	0,43	0,67
MnO	0,07	0,01	0,01	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,07	0,01	0,03
MgO	0,6	0,5	0,5	0,5	0,32	0,25	0,56	0,68	0,00	0,5	0,0	0,0	4,65	0,0	0,5
CaO	1,79	0,91	0,67	0,56	0,93	0,75	0,5	1,7	0,94	0,67	0,35	0,78	3,46	1,2	0,56
Na_2O	4,83	4,78	4,7	4,15	2,42	3,99	6,47	4,56	5,59	4,34	2,94	3,44	3,86	2,81	4,15
K_2O	3,61	3,46	4,5	4,25	5,34	5,02	0,48	1,44	1,11	4,01	5,26	4,81	1,99	5,32	4,26
P_2O_5	0,08	0,043	0,02	0,02	0,1	0,1	0,02	0,09	0,06	0,02	0,05	0,02	0,2	0,01	0,02
п.п.п.	0,35	0,5	0,39	0,35	0,53	0,53	0,28	0,76	0,44	0,23	0,81	0,76	2,19	0,98	0,35
сумма	100,52	100,68	100,11	100,05	100,09	103,16	100,73	100,01	100,0	99,09	99,99	100,58	99,97	100,0	100,06
La	13,3	25,98	0,62	18,4	30	20	14,4	39,30	9,16	27,7	21,78	23,3	13,32	23,3	18,4
Ce	24,0	70,65	1,92	30,8	90	50	22,6	67,10	17,10	46,7	81,96	79,34	22,8	51,1	30,8
Pr	2,49	6,32	0,35	3,08	7,0	5,7	2,21	6,8	1,95	4,6	4,8	6,162	2,7	5,7	3,08
Nd	9,0	22,87	2,26	10,8	27	22	7,22	22,6	7,12	15,0	16,4	21,99	9,7	21,66	10,8
Sm	2,15	3,98	0,97	2,47	6,0	4,8	1,61	5,05	1,81	3,4	2,5	3,39	1,61	3,5	2,47
Eu	0,75	0,39	0,06	0,08	0,6	0,35	0,01	1,1	0,43	0,21	0,14	0,123	0,56	0,948	0,07
Gd	3,02	2,8	1,37	3,5	6,96	5,57	2,24	6,5	2,81	4,6	2,00	2,183	1,07	2,6	3,5
Tb	0,52	0,45	0,22	0,58	0,9	0,7	0,37	1,06	0,51	0,73	0,42	0,401	0,16	0,33	0,58
Dy	3,21	30	1,31	3,6	6,0	5,0	2,48	6,5	3,30	4,59	3,2	3,2	0,94	2,02	3,6
Ho	0,75	0,57	0,31	0,85	1,4	1,1	0,58	1,5	0,80	1,1	0,7	0,74	0,19	0,35	0,85
Er	2,25	1,7	0,86	2,59	5,5	3,0	1,76	4,33	2,5	3,2	2,3	2,44	0,54	0,91	2,59
Tm	0,37	0,27	0,13	0,43	0,7	0,6	0,26	0,64	0,43	0,49	0,388	0,39	0,08	0,126	0,43
Yb	2,0	2,11	0,74	2,5	4,7	3,9	1,71	3,8	2,60	2,83	2,49	2,768	0,58	0,728	2,5
Lu	0,39	0,31	0,13	0,44	0,7	0,6	0,29	0,63	0,48	0,5	0,37	0,419	0,09	0,11	0,44
Rb	4,69	61,07	104,9	137,7	160	160	6,34	4,51	30,10	124,8	151,1	172,0	166,9	54,8	137,7
Sr	470	53,7	43	51	100	20	65,00	310,0	0,0	120	52,3	12,98	186,1	381,79	51,0
Ni	30	0,0	30	60	6,0	8,0	0,0	40,0	3,37	0,0	0,25	–	–	18,1	60,0
Hf	2,96	2,14	2,19	3,25	1,3	1,9	2,85	4,8	0,0	4,05	2,3	2,79	1,1	0,44	3,2
Ta	1,62	0,93	2,91	1,73	1,6	1,5	1,05	1,0	12,0	1,79	1,2	1,5	0,25	0,59	1,73
Zr	30	57,86	10	35	67	81	70	35	34	40	63,5	72,99	36,4	12,2	35
Y	23	12,15	0,0	59	70	50	12,0	41,0	0,0	54,0	19,2	18,5	4,7	8,6	59,0
Nb	10	11,97	5,0	8,0	42	38	0,0	5	0,0	15,0	14,3	15,3	3,4	9,2	8,0
Ga	13,67	13,67	15,81	13,7	22	18	н.о	н.о	н.о	н.о	13,7	14,35	12,2	15,8	н.о

Примечание. Жирным шрифтом обозначены образцы с продатированными цирконами U/Pb методом.
Note. Samples with U/Pb dated zircons are highlighted in bold.

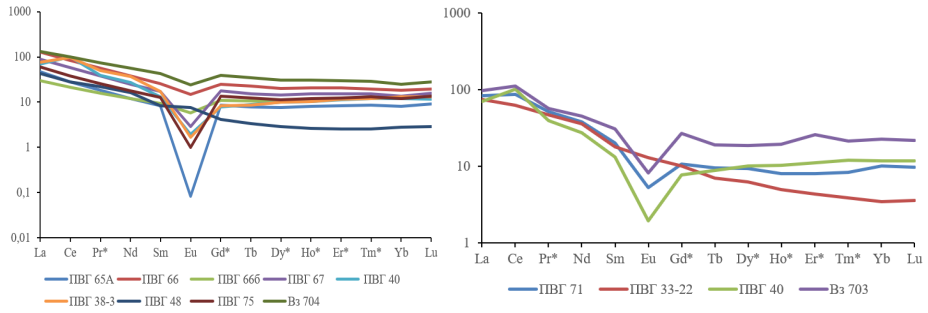


Рисунок 2. Графики нормированных редкоземельных элементов на хондрит [14] гнейсо-гранитов Харбейского блока Харбейского антиклинория: а – гнейсо-граниты с продатированными цирконами (образцы ПВГ 71, ПВГ 33-22, ПВГ 40, Вз 703); б – гнейсо-граниты и плагиогнейсы.

Figure 2. Chondrite-normalised rare earth element (REE) graphs [14] for gneiss-granites of the Kharbey block of the Kharbey anticlinorium: a – gneiss-granites with dated zircons (samples ПВГ 71, ПВГ 33-22, ПВГ 40, Вз 703); б – gneiss-granites and plagiogneisses.

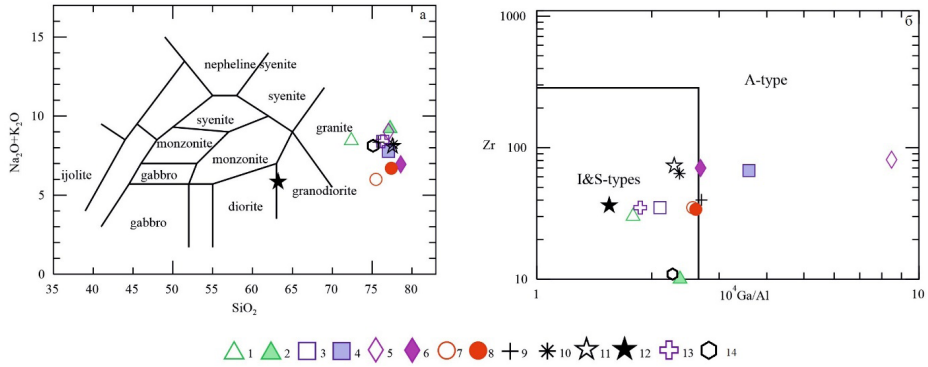


Рисунок 3. Петрогеохимические диаграммы для гранитоидов: а – диаграмма TAS; б – субстратно-генетическая классификационная диаграмма Zr–10^4Ga/Al [15].

Условные обозначения: 1 – ПВГ 70; 2 – ПВГ 73; 3 – ПВГ 75; 4 – Вз 703; 5 – Вз 700; 6 – ПВГ 65а; 7 – ПВГ 66; 8 – ПВГ66б; 9 – ПВГ 67; 10 – ПВГ 40; 11 – ПВГ 38-3; 12 – ПВГ 48; 13 – ПВГ 75; 14 – ПВГ 33-22.

Figure 3. Petrogeochemical diagrams for granitoids. a – TAS diagram, б – source-genetic classification diagram Zr–10^4Ga/Al [15].

Symbols: 1 – ПВГ 70; 2 – ПВГ 73; 3 – ПВГ 75; 4 – Вз 703; 5 – Вз 700; 6 – ПВГ 65а; 7 – ПВГ 66; 8 – ПВГ 66б; 9 – ПВГ 67; 10 – ПВГ 40; 11 – ПВГ 38-3; 12 – ПВГ 48; 13 – ПВГ 75; 14 – ПВГ 33-22.

со-граните наследуется от материнского субстрата, так как его содержание определяется химической характеристикой метаморфизуемой породы и не зависит от степени метаморфизма в ходе ультраметаморфогенных преобразований [1–17].

Наиболее лейкократовые разновидности гнейсо-гранитов с петрохимическими характеристиками А-гранитов (рис. 2 б), образующиеся за счет корового анатексиса по субстрату, претерпевшего ранее ультраметаморфические преобразования [18], характеризуются преобладанием калия над натрием и самыми высокими содержаниями редкоземельных элементов (табл. 1, рис. 3 а, б).

^{40}Ar/ ^{39}Ar, U/Pb датирование гнейсо-гранитов и обсуждение результатов. Гнейсо-граниты евъюганского комплекса Харбейского блока Харбейского антиклинория являются полигенными образованиями, формирующимися с большим возрастным разрывом между началом гранитизации и завершения их становления. Поэтому была поставлена задача изучить возрастные данные не только цирконов, но и породообразующих минералов пород.

Выбранный для изотопного ^{40}Ar/^{39}Ar исследования методом ступенчатого прогрева по мусковиту и порфиробласту микроклина образец гранита ПВГ 33–22 (рис. 4 б) характеризуется среди ранее изученных нами гранитов [5] более древней U/Pb датировкой по циркону (557±2 млн лет, левый борт р. Евъюган, Евъюганский купол) и отличающимся минеральным составом, а также структурными особенностями.

Гнейсо-граниты пробы ПВГ 33–22 имеют лейкократовый облик при содержании темноцветных минералов (клиноцоизита) меньше 1 % и характеризуются относительно крупнозернистой, порфиробластовой структурой (рис. 4 б). В гнейсо-граните на макроуровне хорошо диагностируются порфиробласты калиевого полевого шпата линзовидной (деформированной) формы размером 1–2 см, ориентированные согласно сланцеватости. Их количество не превышает 2–3 % относительно объема породы. В основной массе микроклин с размерностью в среднем 4–5 мм несет следы деформации в виде трещин, по которым развиваются мелкозернистый гранулированный кварц и вторичный микроклин (рис. 5 а). Перекристаллизованный постдеформационный кварц образует относительно крупные гипидиоморфные зерна с размерностью около 0,5–0,8 мм, слагающие линзовидные обособления или прожилки, вытянутые согласно сланцеватости. Мусковит, подчеркивая гнейсовидность породы, развивается в виде чешуек с размерностью 0,6–0,8 мм вдоль плоскостей сближенных параллельных трещин.

Проведенное исследование показало, что в ^{40}Ar/^{39}Ar спектре мусковита из пробы ПВГ 33–22 наблюдается возрастное плато из семи последовательных ступеней, характеризующееся значением возраста 345±4 млн лет, СКВО=0,41 и долей выделенного ^{39}Ar 95,5 % (рис. 6 а). В спектре микроклина также выделяется кондиционное плато из трех ступеней, характеризующееся значением возраста 342±14 млн лет, СКВО=2,3 и долей выделенного ^{39}Ar 78,6 %.

Температура закрытия изотопной системы мусковита порядка 370° С [19], что сопоставимо с температурой хрупко-пластических деформаций. Вероятно, формирование синдеформационного мусковита произошло 345±4 млн лет назад. Очевидно, что формирование порфиробластов калиевого полевого шпата произошло в это же время. Температура закрытия изотопной системы микроклина значительно ниже – порядка 220° С [там же]. Согласованность

Таблица 2

Химический состав биотитов в гнейсо-гранитах

Table 2

Chemical composition of biotites in gneiss-granites

Образец	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	сумма
ПВГ 68	37,43	1,7	15,87	28,78	0,72	6,22	0,0	–	9,28	100
	36,82	2,71	17,07	24,13	0,5	8,92	0,15	–	9,49	99,79
	37,42	2,46	16,03	23,84	0,6	9,31	0,21	–	9,57	99,44
	37,96	2,51	17,51	22,54	0,45	9,09	0,0	–	9,35	99,47
ПВГ 67	36,56	2,97	16,06	29,68	0,72	5,32	0,16	–	8,23	99,14
	36,9	2,26	16,08	28,68	1,11	5,2	0,15	–	9,41	99,72
	36,32	3,05	15,36	29,85	0,61	5,06	–	0,25	9,13	99,72
ПВГ 65а	38,44	2,73	16,66	20,25	0,74	7,67	0,0	0,16	9,82	101,06
	36,45	3,3	15,22	28,74	0,9	6,15	0,03	0,72	9,1	99,26
	35,75	3,45	15,5	28,67	0,56	6,16	–	0,02	9,24	99,55
	36,48	2,85	15,83	28,74	0,43	5,80	0,10	0,38	9,13	96,61
ПВГ 69б	37,97	2,77	17,44	20,32	0,57	11,12	–	0,03	8,23	99,62
	38,57	2,65	17,55	19,99	0,32	10,81	–	0,3	9,41	99,24
	38,03	3,21	17,14	20,05	0,86	10,78	0,21	0,18	9,13	99,6
ПВГ 76	37,57	2,98	15,83	24,86	0,76	7,61	0,0	0,0	9,73	100,42
	38,18	2,96	16,11	24,4	0,74	7,77	0,12	0,0	9,42	99,95
	37,97	3,04	15,65	24,82	0,43	7,64	–	0,3	9,58	99,63
Вз 703	36,78	2,24	15,81	20,54	0,3	10,7	–	–	10,7	96,27
	36,62	1,89	15,57	19,73	0,2	10,74	–	–	10,74	94,12
	36,98	2,05	15,64	20,54	–	10,97	–	–	10,97	96,16
	37,0	2,17	15,43	20,80	0,24	10,65	–	–	10,65	95,93

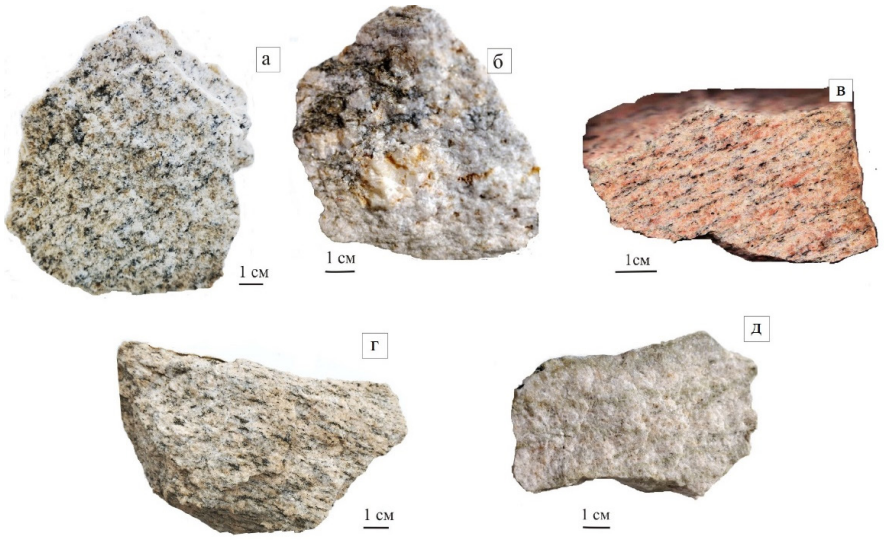


Рисунок 4. Гнейсо-граниты евъюганского комплекса Харбейского блока Харбейского антиклинория: а – гнейсовая структура гнейсо-гранитов (образец ПВГ 68); б – гнейсо-гранит с порфиробластами микроклина и чешуйками мусковита (образец ПВГ 33–22), продатированными $^{40}Ar/^{39}Ar$ методом ступенчатого прогрева. Результаты определения представлены в данной статье (калиевый полевой шпат – 347±13,9 млн лет; мусковит - 345±3,7 млн лет). В этом же образце ранее продатирован U/Pb методом циркон – 557±2,2 млн лет [5]; в – полосчатая текстура, обусловленная чередованием слойков микроклина, альбита и чешуек биотита (образец ПВГ 71); г – гнейсо-гранит Евъюганского купола (образец ПВГ 67); д – лейкократовый гранит Вз 703, продатированный U/Pb методом по циркону – 494±2,3 млн лет (результаты определения представлены в данной статье).

Figure 4. Gneiss-granites of the Evyugan complex of the Kharbey block of the Kharbey anticlinorium: a – gneiss structure of gneiss-granites (sample ПВГ 68); б – gneiss-granite with microcline porphyroblasts and muscovite flakes (ПВГ 33-22), dated by the stepwise heating $^{40}Ar/^{39}Ar$ method. The age determination results are presented in this article: potassium feldspar – 347 ± 13.9 Ma; muscovite – 345 ± 3.7 Ma. In this sample, zircon was previously dated by the U/Pb method at 557 ± 2.2 Ma [5]; в – banded texture caused by alternating layers of microcline, albite, and biotite flakes (ПВГ 71); г – gneiss-granite of the Evyugan dome (ПВГ 67); д – leucocratic granite (Вз 703), zircon-dated by the U/Pb method at 494 ± 2.3 Ma (determination results are presented in this article).

в пределах ошибки $^{40}Ar/^{39}Ar$ датировок двух выделенных из гнейсо-гранита проб ПВГ 33–22 минералов, а также – $^{40}Ar/^{39}Ar$ датировок по мусковиту (350±2,7 млн лет), развивающемуся по плоскостным трещинам деформации гранита Гердизского массива (см. рис. 1 б), расположенного в Марункеуском блоке Харбейского антиклинория, [20, 21] и порфиробластическому калиевому полевому шпату (351±12 млн лет) из амфиболита ханмехойской свиты [22] свидетельствуют о процессе тектонического выведения пород Харбейского антиклинория к поверхности.

Полученные нами датировки совпадают с датировками глаукофанового метаморфизма (347±72 млн лет), эксгумации эклогитов (360 млн лет), диафтореза (346±5 млн лет) на Полярном Урале [10] палеозойского коллизионного этапа формирования уральского орогена.

Возрастные значения цирконов (557±2,2 млн лет, образец ПВГ 33–22), полученные ранее [5], исследованного нами этого же гнейсо-гранита на предмет возраста породообразующих минералов мусковита и микроклина согласуются с датировками таковых, извлеченных из гранитизированных амфиболитов, альбитовых амфиболитов и плагиогнейсов ханмехойской свиты – 577–685 млн лет [8, 9, 23], что предполагает их унаследованность. Изотопные датировки цирконов и метасоматических минералов свидетельствуют о полигенной природе данного массива, являющегося, скорее всего, автохтонным образованием, практически не утратившим признаки докембрийского материнского метабазитового субстрата, о чем свидетельствует спектр нормированных редкоземельных элементов. На рис. 3 а отмечаются отсутствие европиевого минимума и низкая степень дифференциации редкоземельных элементов (образец ПВГ 33–22), подобно спектрам плагиогнейсов (образец ПВГ 66) и эпидот-амфиболовых сланцев (образец ПВГ 48) ханмехойской свиты, представленных для сравнения на рис. 3 б.

Совершенно иная картина наблюдается для гнейсо-гранитов Харбейского блока с полученными ранее возрастами цирконов 487±2 млн лет (образец ПВГ 71)

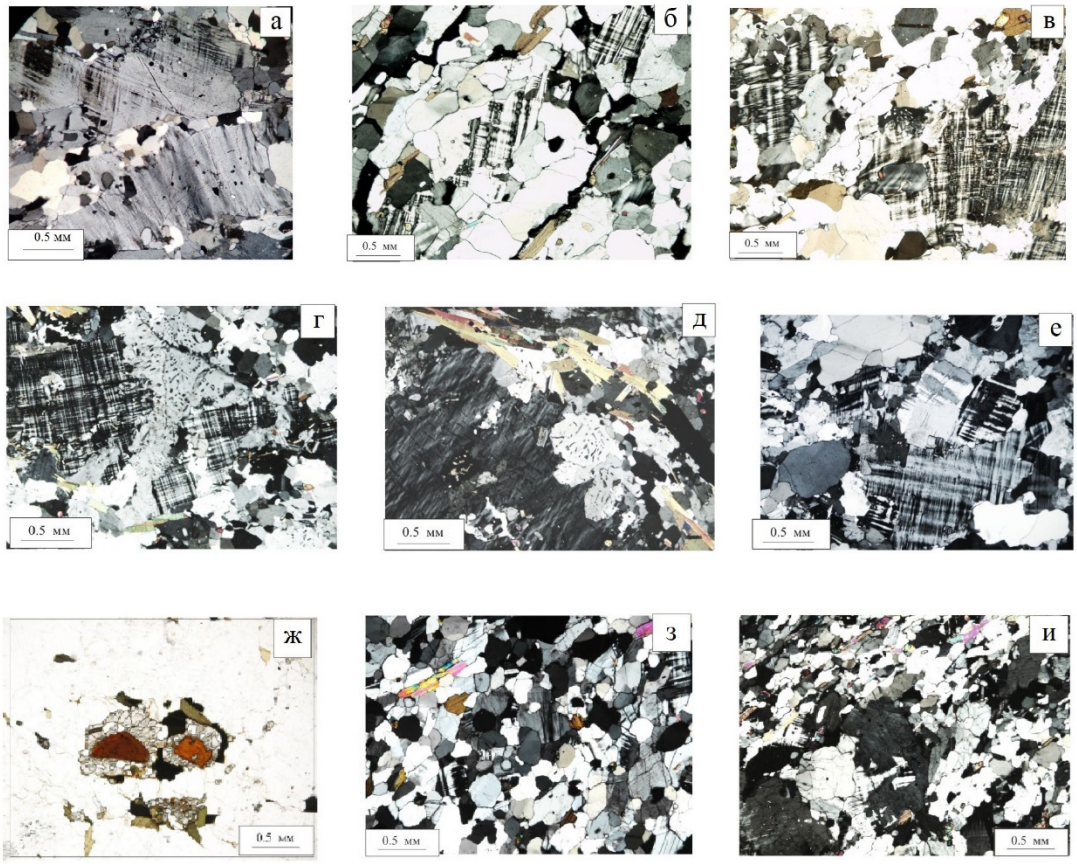


Рисунок 5. Петрографические особенности гнейсо-гранитов евъюганского комплекса Харбейского блока Харбейского антиклинория: а – расколотое зерно микроклина (образец ПВГ 33-22); б – синкинематическая кристаллизация микроклина в полосчатом гнейсо-граните (образец ПВГ 71); в – катакластическая структура (образец ПВГ 70); г – развитие посткинематических мирмекитов (образец ПВГ 70); д – обломок калиевого полевого шпата с мирмекитами (образец ПВГ 70); е – реликтовый некатаклазированный участок гнейсо-гранита (образец ПВГ 70); ж – алланит в агрегате клиноцоизита (образец Вз 703); з – реликтовый недеформированный участок гранита (Вз 703); и – синкинематический кварц-полевошпатовый агрегат, обтекающий обломки первичного гранита (Вз 703).

Figure 5. Petrographic features of gneiss-granites of the Evyugan complex of the Kharbey block of the Kharbey anticlinorium: a – split grain of microcline (sample ПВГ 33–22); б – synkinematic crystallization of microcline in banded gneiss-granite (sample ПВГ 71); в – cataclastic texture (sample ПВГ 70), г – development of postkinematic myrmekites (sample ПВГ 70); д – fragment of potassium feldspar with myrmekites (sample ПВГ 70), е – relict non-cataclased domain of gneiss-granite (sample ПВГ 70), ж – allanite in a clinozoisite aggregate (sample Вз 703), з – relict undeformed granite domain (Вз 703), и – synkinematic quartz-feldspar aggregate surrounding fragments of primary granite (Вз 703).

и 497±3 млн лет (образец ПВГ 40), отобранных в пределах Евъюганского и Лаптаюганского гранитно-мигматитовых куполов (см. рис. 1 б).

Возраста значительно отличаются от U/Pb датировок по циркону из вмещающих плагиогнейсов ханмехойской свиты. В связи с этим в ранних работах [5] мы предположили модель их параавтохтонного или протрузивного становления, т. е. граниты, сохраняя реликтовые текстурные особенности, претерпели ранее процессы реоморфизма [16]. Следует отметить, что гнейсовидность гранитов имеет двойственный характер, так как помимо унаследованной директивной текстуры проявляются вторичные деформационные признаки за счет протоклаза или катаклаза.

На унаследованные текстурные особенности, обусловленные ориентированным ростом биотита и распределением клиноцоизита в виде вытянутых цепочек, накладывается развитие гранулированного кварца, образующего пересекающиеся между собой системы тонких лентикулярных жил, разделяющих породу на линзы. Вдоль участков рассланцевания кристаллизуются синкинематические вытянутые зерна решетчатого микроклина, обуславливающего совместно с лентикулярным кварцем своеобразную полосчатую текстуру (рис. 5 б; в). Наиболее крупные зерна микроклина, подвергшиеся катаклазу, раскалываются и растаскиваются в виде обломков вдоль плоскостей смещения (рис. 5 е). По трещинам микроклина развивается гранулированный кварц или вторичный альбит, в котором в отдельных случаях отмечаются кварцевые вростки, подобные мирмекитовым (рис. 5 г). Кварц имеет несколько генераций, зависящих от наличия или отсутствия внешних деформационных условий. Синкинематический кварц кристаллизуется в виде лентикулярных слоев, сложенных удлиненными зернами, а в случае снятия напряжения минерал образует полигональные кристаллы. В породе тем не менее сохраняются реликтовые участки, сложенные кварц-полевошпатовым относительно крупнозернистым агрегатом, не затронутые какой-либо деформацией (рис. 5 з).

Подобные структурные особенности пород могут возникать и при протоклазе гранитного материала за счет его реоморфного течения при становлении параавтохтонного массива [там же]. В этом случае очень важно определить

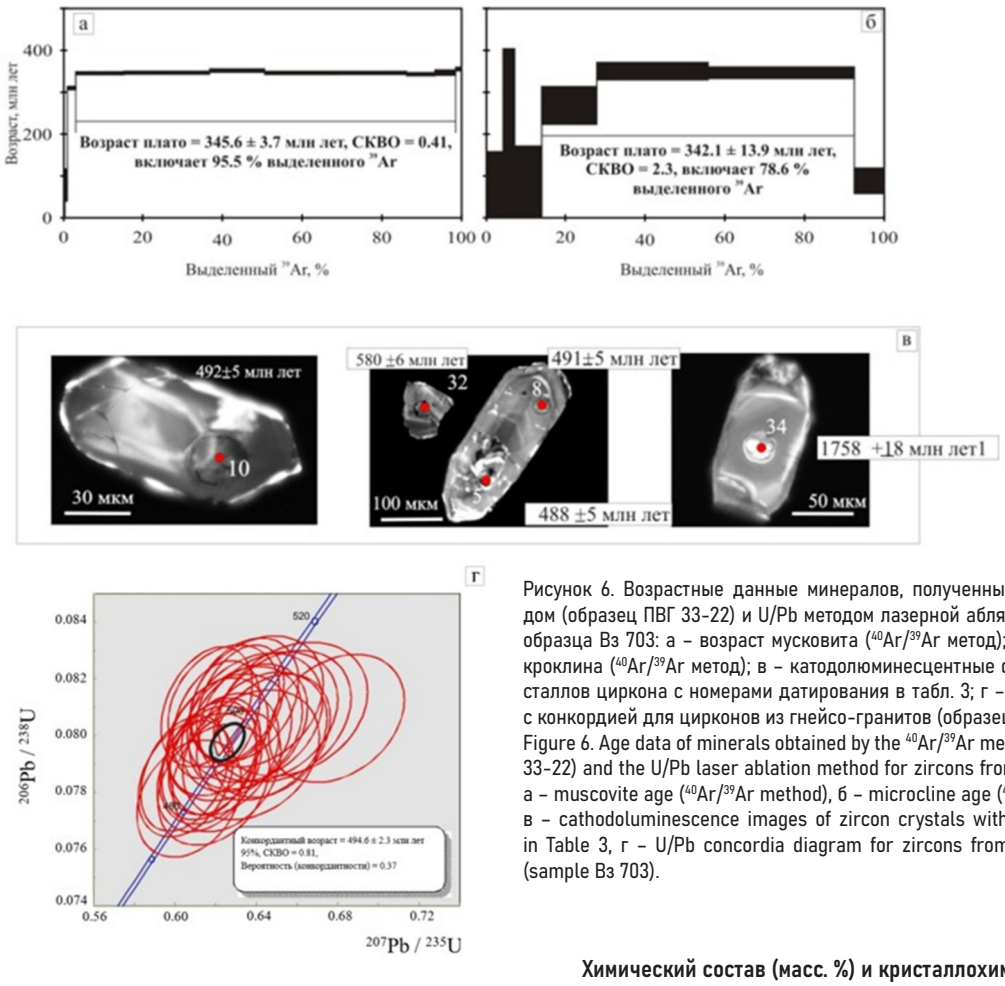


Рисунок 6. Возрастные данные минералов, полученные ^{40}Ar/^{39}Ar методом (образец ПВГ 33-22) и U/Pb методом лазерной абляции цирконов из образца Вз 703: а – возраст мусковита (^{40}Ar/^{39}Ar метод); б – возраст микроклина (^{40}Ar/^{39}Ar метод); в – катодолюминесцентные фотографии кристаллов циркона с номерами датирования в табл. 3; г – U/Pb диаграмма с конкордией для цирконов из гнейсо-гранитов (образец Вз 703).

Figure 6. Age data of minerals obtained by the ^{40}Ar/^{39}Ar method (sample ПВГ 33-22) and the U/Pb laser ablation method for zircons from sample Вз 703: а – muscovite age (^{40}Ar/^{39}Ar method), б – microcline age (^{40}Ar/^{39}Ar method), в – cathodoluminescence images of zircon crystals with dating numbers in Table 3, г – U/Pb concordia diagram for zircons from gneiss-granites (sample Вз 703).

возрастные данные синкинематического новообразованного микроклина, которые согласовали бы его развитие с геодинамическими режимами становления складчатой системы Полярного Урала, и время образования полосчатых гнейсо-гранитов в целом, на которые в свое время обратил внимание В. Н. Охотников [4], предполагая их палеозойский возраст.

Новые возрастные данные для гнейсо-гранитов Харбейского блока Харбейского антиклинория были получены для пород, расположенных в левом борту р. Лаптоюган и публикуются впервые (см. рис. 1 б, образец Вз 703). На макроуровне данные гнейсо-граниты на обозначенном участке различаются степенью меланократовости и текстурно-структурными особенностями. Наиболее меланократовые разности имеют гнейсовидную текстуру за счет ориентированного роста биотита и цепочечного вытянутого агрегата мелкозернистого клиноцоизита. Менее распространенными минералами являются роговая обманка и гранат альмандин-гроссулярового состава (табл. 3) с размерностью около 0,05 мм. Для пород также характерен алланит, кристаллизующийся в центральной части клиноцоизитового агрегата (см. рис. 5 ж). Гранит (образец Вз 703), из которого были отобраны цирконы для U/Pb датирования, отличается от ранее датированных гранитоидов других участков лейкократовостью (см. рис. 4 д), относительно высоким содержанием суммы редкоземельных элементов и хорошо выраженной европиевой аномалией (см. табл. 1;

Таблица 3

Химический состав (масс. %) и кристаллохимические коэффициенты граната

Table 3

Chemical composition (wt. %) and crystallochemical coefficients of garnet

Обр. Вз 704						
Компоненты	3-1 ц	3-2 к	5-1к	5-2 к	5-3ц	5-3к
SiO_2	38,91	38,01	38,63	38,53	38,75	36,27
Al_2O_3	21,68	21,37	21,49	21,68	21,17	20,5
FeO*	16,97	18,02	16,78	17,94	11,93	18,25
MgO	0,52	0,45	0,0	0,59	0,0	0,48
CaO	19,96	18,04	20,06	17,74	25,94	17,45
MnO	3,46	4,12	3,54	4,37	2,39	4,48
сумма	101,5	100,1	100,5	100,85	100,18	97,46
Формульные коэффициенты						
Si	3,0	2,99	3,0	3,0	2,88	2,94
Al	1,97	1,98	1,98	2,0	1,85	1,96
Fe^3	0,03	0,04	0,0	0,0	0,38	0,16
Fe^2	1,07	1,14	1,09	1,15	0,67	1,06
Mn	0,23	0,27	0,23	0,29	0,14	0,31
Mg	0,06	0,05	0,0	0,07	0,0	0,06
Ca	1,65	1,52	1,68	1,48	2,07	1,52
Миналы						
adr	0,01	0,01	0,0	0,0	0,0	0,0
grs	0,47	0,44	0,56	0,43	0,6	0,43
alm	0,25	0,26	0,28	0,27	0,16	0,29
sps	0,08	0,08	0,08	0,08	0,04	0,9
prp	0,15	0,13	0,15	0,15	0,14	0,13

рис. 3 а), что предполагает присутствие значительного количества гранитного расплава. В нем проявился ярко выраженный катаклаз (или протоклаз?) в виде удлиненных остроугольных блоков с четко выраженными границами, сложенных кварц-полевошпатовым крупнозернистым агрегатом без каких-либо признаков деформаций. Обломки обтекаются мелкозернистым кварц-полевошпатовым, перекристаллизованным в синкинематических условиях агрегатом, сложенным удлиненными и ориентированными в одном направлении согласно деформационному давлению (или реоморфическому течению гранитного материала) зернами (см. рис. 5 з; и). Наличие участков в этой же породе с полигональными мелкими зернами полевых шпатов с явно выраженной структурой роста в посткинематическом состоянии свидетельствует о длительно текущем, многоэтапном процессе становления породы.

Цирконы, отобранные из данного лейкократового гранита, имеют розовый цвет и хорошо ограненные кристаллы длиннопризматического габитуса с размерностью от 0,09 до 0,25 мм. На катодолюминесцентном изображении цирконов наблюдается концентрическая зональность (рис. 6 в). Конкордатное значение возраста, полученное методом лазерной абляции составляет 494±2,3 млн лет (табл. 4, рис. 6 г), практически совпадают с возрастами гранито-гнейсов евъюганского комплекса в Харбейском и Марункеуском блоках Харбейского антиклинория, исключая древние ядра с возрастом 1758±18–1080±17 млн лет [1, 5].

Заключение

Новые возрастные данные для цирконов гнейсо-гранитов Харбейского блока Харбейского антиклинория (494±2,3 млн лет), а также калиевого полевого шпата и мусковита (соответственно 347±13,9 млн лет и 345±3,7 млн лет) согласуются с уже установленным геохронологическим интервалом и дополняют геологическую историю становления гранитов евъюганского комплекса в целом.

Ранее было установлено, что гнейсо-граниты Харбейского блока являются продуктами ультраметаморфизма, а субстратом гранитообразования послужили докембрийские амфиболиты и плагиогнейсы ханмехойской свиты. Об этом же свидетельствуют петрохимические, геохимические и минералогические данные, указывающие на их принадлежность апобазитовым гранитам I-типа.

Возраст гранитизации и время становления гнейсо-гранитов евъюганского комплекса Харбейского антиклинория на данный момент времени установить сложно, так как они имеют длительное полигенно-реоморфическое становление. Требуются дополнительные неединичные возрастные данные кристаллизации породообразующих минералов на всех этапах формирования гранитных тел. Учитывая последние полученные Sm/Nd методом палеозойские возраста породообразующих минералов гранитизированных амфиболитов ханмехойской свиты (являющихся субстратом для исследуемых гнейсо-гранитов) – граната, плагиоклаза и породы в целом (392±23 – 367±40 млн лет), также роговой обманки амфиболитов, продатированной $^{40}Ar/^{39}Ar$

Таблица 4

Результаты U/Pb датирования цирконов, выделенных из образца гранита Вз 703

Table 4

Results of U/Pb dating of zircons extracted from granite sample Вз 703

Номер зерна	Изотопные отношения						Rho0.3	Возраст. млн лет				D. %
	$^{207}Pb/^{206}Pb$	± 1σ. %	$^{207}Pb/^{235}U$	± 1σ. %	$^{206}Pb/^{238}U$	± 1σ. %		$^{206}Pb/^{238}U$	± 1σ	$^{207}Pb/^{206}Pb$	± 1σ	
1	0.0567	0.001	0.6071	0.0105	0.0778	0.0008	0.3	485	5	478	38	0
2	0.0574	0.001	0.6191	0.0112	00783	0.0009	0.3	486	5	508	40	1
3	0.056	0.0009	0.6054	0.0096	0.0785	0.0008	0.3	487	5	453	35	-1
4	0.0577	0.001	0.6255	0.0109	0.0787	0.0009	0.3	489	5	517	38	1
5	0.0568	0.0009	0.6160	0.0101	0.0787	0.0009	0.3	488	5	484	36	0
6	0.0558	0.0008	0.6049	0.0089	0.0787	0.0008	0.4	488	5	445	32	-1
7	0.0568	0.001	0.6178	0.0102	0.790	0.0009	0.3	490	5	483	37	0
8	0.0566	0.0009	0.6169	0.0096	0.0791	0.0009	0.3	491	5	476	34	-1
9	0.0584	0.0013	0.6375	0.0137	0.0793	0.0009	0.3	492	6	543	46	2
10	0.0568	0.0009	0.6196	0.0092	0.0793	0.0008	0.3	492	5	481	33	0
11	0.0572	0.001	0.6245	0.0109	0.0793	0.0009	0.3	492	5	497	38	0
12	0.0588	0.0011	0.6473	0.0119	0.800	0.0009	0.3	496	5	558	40	2
13	0.0584	0.0012	0.6427	0.0131	0.800	0.0009	0.3	496	5	543	44	2
14	0.0569	0.0012	0.6266	0.0126	0.0799	0.0009	0.3	496	5	488	44	0
15	0.0564	0.0009	0.6213	0.01	0.0800	0.0009	0.3	496	5	468	36	-1
16	0.0612	0.0012	0.6796	0.0136	0.806	0.0009	0.3	500	6	647	42	5
17	0.0573	0.0011	0.6331	0.0121	0.0802	0.0009	0.3	497	5	503	42	0
18	0.0575	0.0011	0.6361	0.0119	0.0803	0.0009	0.3	498	5	510	41	0
19	0.0588	0.0012	0.6530	0.0138	0.0807	0.0009	0.3	500	6	558	45	2
20	0.0582	0.0013	0.6461	0.0139	0.0807	0.0009	0.3	500	6	535	47	1
21	0.0576	0.0012	0.6395	0.0136	0.0806	0.0009	0.3	500	6	514	47	0
22	0.0559	0.0008	0.6205	0.0088	0.0806	0.0009	0.4	499	5	449	31	-2
23	0.0591	0.0014	0.6580	0.015	0.0809	0.001	0.3	502	6	569	49	2
24	0.0559	0.001	0.6241	0.0112	0.0810	0.0009	0.3	502	5	449	40	-2
25	0.0566	0.0008	0.6323	0.0088	0.0811	0.0009	0.4	503	5	475	31	-1
26	0.0573	0.0012	0.6401	0.0134	0.0812	0.0009	0.3	503	6	501	46	0
27	0.0552	0.0008	0.6156	0.0092	0.0810	0.0009	0.4	502	5	419	33	-3
28	0.0567	0.001	0.6344	0.0108	0.0813	0.0009	0.3	504	5	479	38	-1
29	0.0619	0.001	0.7193	0.0114	0.0844	0.0009	0.3	523	5	669	34	5
30	0.0574	0.0009	0.6640	0.107	0.0840	0.0009	0.3	520	5	520	35	-1
31	0.057	0.0008	0.6621	0.0097	0.0843	0.0009	0.3	522	5	522	33	-1
32	0.0585	0.0009	0.7591	0.0113	0.0942	0.001	0.4	580	6	580	32	-1
33	0.0801	0.0012	2.0114	0.0310	0.1823	0.002	0.3	1080	17	1080	30	4
34	0.1138	0.0024	4.9144	0.1021	0.3135	0.0037	0.3	1758	18	1758	37	3

методом (345,8±4,7 млн лет) [9], можно предположить, что полигенно-реоморфические гнейсо-граниты Харбейского блока Харбейского антиклинория образовались в результате ультраметаморфизма, являвшегося последовательной высшей стадией развития регионального метаморфизма в данном регионе, и окончательно сформировались в раннем карбоне в условиях коллизионных процессов, происходящих в Уральском орогене.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Душин, В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Издание второе. Серия Полярно-Уральская. Лист Q-42-VII, VIII (Обской). Объяснительная записка / В. А. Душин, О. П. Сердюкова, А. А. Малюгин [и др.]. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. – 384 с.
2. Зылёва, Л. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42. – Салехард. Объяснительная записка / Л. И. Зылёва, А. Л. Коновалов, А. П. Казак [и др.]. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. – 396 с.
3. Кейльман, Г. А. Мигматитовые комплексы подвижных поясов / Г. А. Кейльман. – М.: Недра, 1974. – 100 с.
4. Охотников, В. Н. Гранитоиды и рудообразование (Полярный Урал) / В. Н. Охотников. – Л.: Наука, 1985. – 184 с.
5. Голубева, И. И. Первые результаты U-Pb датирования цирконов гнейсогранитов Харбейского комплекса Полярного Урала / И. И. Голубева // ДАН. – 2011. – Т. 439, № 4. – С. 508–513.
6. Бутин, В. В. Геология и условия формирования гнейсо-амфиболитового комплекса южной части Харбейского антиклинория: автореф. дис. ... канд. г.-м. наук / В. В. Бутин.– Свердловск, 1973. – 20 с.
7. Кейльман, Г. А. К вопросу о геологическом строении осевой зоны Полярного Урала / Г. А. Кейльман, В. В. Бутин, Л. Л. Подсосова [и др.]. // Труды СГИ. – 1973. – Вып. 91. – С. 5–0.
8. Коновалов, А. Л. О тектонической границе между метаморфическими сланцами и кристаллическими образованиями позднего протерозоя Харбейского антиклинория / А. Л. Коновалов, К. И. Лохов, А. В. Черкашин [и др.] // Региональная геология металлогения. – 2016. – № 68. – С. 5–20.
9. Уляшева, Н. С. Амфиболиты харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал): геохимические и геохронологические данные / Н. С. Уляшева, А. С. Шуйский, В. Б. Хубанов // Геосферные исследования. – 2024. – № 2. – С. 37–52.
10. Уляшева, Н. С. Sm/Nd- и 40Ar/39Ar изотопно-геохронологические исследования амфиболитов ханмехойской свиты харбейского метаморфического комплекса (Полярный Урал) / Н. С. Уляшева, П. А. Серов, А. В. Травин // Доклады академии наук. – 2022. – Т. 506, № 2. – С. 72–79.
11. Chashchin, V. V. Platinum content and formation conditions of the sulphide PGE–Cu–Ni Nyud-II. Deposit of the Monchegorsk Pluton, Kola Peninsula, Russia / V. V. Chashchin, S. V. Petrov, D. V. Kiseleva [et al.] // Geology of Ore Deposits. – 2021. – Vol. 63, № 2. – P. 87–117.
12. Хубанов, В. Б. U-Pb изотопное датирование цирконов из Pz-Mz магматических комплексов Забайкалья методом магнитно-секторной масс-спектрометрии с лазерным пробоотбором: процедура определения и сопоставления с SHRIMP данными / В. Б. Хубанов, М. Д. Буянтуев, А. А. Цыганков // Геология и геофизика. – 2016. – Т. 57, № 1. – С. 241–258.
13. Травин, А. В. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхинский регион. Западное Прибайкалье) / А. В. Травин, Д. С. Юдин, А. Г. Владимиров [и др.] // Геохимия. – 2009. – № 11. – С. 1181–1199.
14. Тейлор, С. Р. Континентальная кора: ее состав и эволюция / С. Р. Тейлор, С. Мак-Ленон. – М.: Мир, 1985. – 339 с.
15. Chappell, B. W. Two contrasting granite types: 25 years later / B. W. Chappell and A. J. R. White // Australian Journal of Earth Sciences. – 2001. – Vol. 48. – P. 489 – 499.
16. Махлаев, Л. В. Генетические гранитоидные ряды докембрия Таймыра (Метаморфизм, ультраметаморфизм, гранитообразование) / Л. В. Махлаев, Н. И. Коробова // Труды Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья (СНИИГГИМС). Красноярское отделение. – Красноярск: Кн. Издательство, 1972. – 154 с.
17. Щербаков, И. Б. Петрография докембрийских пород центральной части Украинского щита / И. Б. Щербаков. – Киев: Наукова думка, 1975. – 279 с.
18. Макрыгина, В. А. Геохимия регионального метаморфизма умеренных и низких давлений / В. А. Макрыгина. – Новосибирск: Наука, 1981. – 200 с.
19. Whalen, J. B. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis / J. B. Whalen, K. L. Currie, B. W. Chapell // Contr. Miher. Petrol. – 1987. – Vol. 95. – P. 407–419.
20. Hodges, K. V. Geochronology and thermochronology in orogenic systems / K. V. Hodges // In: Treatise on Geochemistry. – Oxford, Elsevier. –2004. – P. 263–292.
21. Шуйский, А. С. Гранитоиды центральной части Гердизского массива (Полярный Урал): U-Pb (SIMS) данные / А. С. Шуйский, О. В. Удоратина, М. А. Кобл // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. – М.: ИГЕМ РАН, 2018. – С. 383–386.
22. Шуйский, А. С. Гранитоиды северной части Гердизского массива (Полярный Урал): Ar-Ar данные / А. С. Шуйский, А. В. Травин // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Северо-Уральского сегмента. – Сыктывкар: ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 2019. – С. 210–214.
23. Голубева, И. И. Новые возрастные данные Гердизского массива (Полярный Урал) / И.И. Голубева, А. С. Шуйский, А. В. Травин [и др.] // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 92. – С. 50–63.

References

1. Dushin, V. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1: 200 000. Izdaniye vtoroye. Seriya Polyarno-Ural'skaya. List Q-42-VII, VIII (Obskoy). Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second Edition. Polar-Ural Series. Sheet Q-42-VII, VIII (Ob River). Explanatory Note] / V. A. Dushin, O. P. Serdyukova, A. A. Malyugin [et al.]. – SPb: Cartographic Factory of VSEGEI. – 2014. – 384 p.
2. Zyleva, L. I. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1: 1 000 000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-42 – Salekhard. Obyasnitel'naya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (Third Generation). West Siberian Series. Sheet Q-42 – Salekhard. Explanatory Note] / L. I. Zyleva, A. L. Konovalov, A. P. Kazak [et al.]. – SPb: Cartographic Factory of VSEGEI. – 2014. – 396 p.
3. Keylman, G. A. Migmatitovyye kompleksy podvizhnykh poyasov [Migmatite complexes of mobile belts]. – M.: Nedra. – 1974. – 100 p.
4. Okhotnikov, V. N. Granitoidy i rudoobrazovaniye (Polyarny Ural) [Granitoids and ore formation (Polar Urals)]. – L.: Nauka. – 1985. – 184 p.
5. Golubeva, I. I. Pervye rezul'taty U-Pb datirovaniya tsirkonov gneisso-granitov Kharbeyskogo kompleksa Polyarnogo Urala [First results of U-Pb dating of zircons from gneiss-granites of the Kharbey complex of the Polar Urals] // Reports of the Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 439, № 4. – P. 508–513.
6. Butin, V. V. Geologiya i usloviya formirovaniya gneyso-amfibolitovogo kompleksa yuzhnoy chasti Kharbeyskogo antiklinoriya [Geology and formation conditions of the gneiss-amphibolite complex in the southern part of the Kharbey anticlinorium]: extended abstract of Candidate's dissertation (Geology and Mineralogy) / Butin V. V. – Sverdlovsk, 1973. – 20 p.
7. Keylman, G. A. K voprosu o geologicheskom stroenii osevoi zony Polyarnogo Urala [On the geological structure of the axial zone of the Polar Urals] / G. A. Keylman, V. V. Butin, L. L. Podsosova [et al.] // Trudy SGI. – 1973. – Issue 91.– P. 5–10.
8. Konovalov, A. L. O tektonicheskoy granitse mezhdu metamorficheskimi slantsami i kristallicheskimi obrazovaniyami pozdnego protyerazoya Kharbeyskogo antiklinoriya [On the tectonic boundary between metamorphic schists and Late Proterozoic crystalline formations of the Kharbey anticlinorium] / A. L. Konovalov, K. I. Lokhov, A. V. Cherkashin [et al.] // Regionalnaya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2016. – № 68. – P. 5–20.
9. Ulyasheva, N. S. Amfibolity Kharbeyskogo metamorficheskogo kompleksa (Polyarny Ural): geokhimicheskiye i geokhronologicheskiye dannyye [Amphibolites of the Kharbey metamorphic complex (Polar Urals): Geochemical and geochronological data] / N. S. Ulyasheva, A. S. Shuyskiy, V. B. Khubanov // Geosfernye issledovaniya [Geospheric Research]. – 2024. – № 2. – P. 37–52.
10. Ulyasheva, N. S. Sm/Nd i 40Ar/39Ar izotopno-geokhronologicheskiye issledovaniya amfibolitov khanmekhoyskoi svity Kharbeyskogo metamorficheskogo kompleksa (Polyarny Ural) [Sm/Nd and 40Ar/39Ar isotope-geochronological studies of amphibolites of the Khanmekhoy formation of the Kharbey metamorphic complex (Polar Urals)] / N. S. Ulyasheva, P. A. Serov, A. V. Travin // Proceedings of the Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 506, № 2. – P. 72–79.
11. Chashchin, V. V. Platinum content and formation conditions of the sulphide PGE–Cu–Ni Nyud-II. Deposit of the Monchegorsk Pluton, Kola Peninsula, Russia / V. V. Chashchin, S. V. Petrov, D. V. Kiseleva [et al.] // Geology of Ore Deposits. – 2021. – Vol. 63, № 2. – P. 87–117.
12. Khubanov, V. B. U-Pb izotopnoye datirovaniye tsirkonov iz Pz-Mz magmaticheskikh kompleksov Zabaykal'ya metodom magnitno-sektornoy mass-spektrometrii s lazernym probootborom: protsedura opredeleniya i sopostavleniya s SHRIMP dannymi [U-Pb isotopic dating of zircons from Paleozoic-Mesozoic magmatic complexes of Transbaikalia using magnetic sector mass spectrometry with laser sampling: Determination and comparison procedure 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.
13. Travin, A. V. Termokhronologiya Chernorudskoy granulitovoy zony (Ol'khinskiy region, Zapadnoye Zabaykal'ye) [Thermochronology of the Chernorud granulite zone (Olkhinsky Region, Western Transbaikalia)] / A. V. Travin, D. S. Yudin, A. G. Vladimirov [et al.] // Geokhimiya [Geochemistry]. – 2009. – № 11. – P. 1181–1199.
14. Taylor, S. R. Kontinentalnaya kora: yeye sostav i evolutsiya [The continental crust: Its composition and evolution] / S. R. Taylor, S. M. McLennan. – Moscow: Mir. – 1985. – 339 p.
15. Chappell, B. W. Two contrasting granite types: 25 years later / B. W. Chappell and A. J. R. White // Australian Journal of Earth Sciences. – 2001. – Vol. 48. – P. 489 – 499.
16. Makhlaev, L. V. Geneticheskiye granitoidnyye ryady dokembriya Taymyra (metamorfizm, ultrametamorfizm, granitoobrazovaniye) [Genetic granitoid series of the Precambrian of Taimyr (metamorphism, ultrametamorphism, granite formation)] / L. V. Makhlaev, N. I. Korobova // Transactions of the Siberian Research Institute of Geology, Geophysics, and Mineral Resources. Krasnoyarsk Branch. – Krasnoyarsk: Publishing House. – 1972. – 154 p.
17. Shcherbakov, I. B. Petrografiya dokembriyskikh porod tsentral'noy chasti Ukrainskoro shchita [Petrography of Precambrian rocks of the central part of the Ukrainian shield]. – Kiev: Naukova Dumka. – 1975. – 279 p.
18. Makrygina, V. A. Geokhimiya regional'nogo metamorfizma umerennykh i nizkikh davleniy [Geochemistry of regional metamorphism at moderate and low pressures]. – Novosibirsk: Nauka. – 1981. – 200 p.
19. Whalen, J. B. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis / J. B. Whalen, K. L.

Currie, B. W. Chapell // Contr. Miher. Petrol. – 1987. – Vol. 95. – P. 407–419.
20. Hodges, K. V. Geochronology and thermochronology in orogenic systems / K. V. Hodges // In: Treatise on Geochemistry. – Oxford, Elsevier. –2004. – P. 263–292.
21. Shuysky, A. S. Granitoidy tsentral'noy chasti Gerdizskogo massiva (Polyarnyy Ural): U-Pb (SIMS) dannyye [Granitoids of the central Part of the Gerdiz massif (Polar Urals): U-Pb (SIMS) data] / A. S. Shuyskiy, O. V. Udoratina, M. A. Kobel // Methods and Geological Results of Studying Isotopic Geochronometric Systems of Minerals and Rocks. – M.: IGEM RAS. – 2018. – P. 383–386.
22. Shuysky, A. S. Granitoidy severnoy chasti Gerdizskogo massiva (Polyarny Ural): Ar-Ar dannyye [Granitoids of the northern part of the Gerdiz massif (Polar Urals): Ar-Ar data] / A. S. Shuyskiy, A. V. Travin // Structure, Substance, History of the Lithosphere of the Timan-North Urals Segment. – Syktyvkar: IG FRC Komi SC UB RAS. – 2019. – P. 210–214.
23. Golubeva, I. I. Novyye vozrastnyye dannyye Gerdizskogo massiva (Polyarny Ural) [New age data for the Gerdiz massif (Polar Urals)] / I. I. Golubeva, A. S. Shuyskiy, A. V. Travin [et al.] // Regionalnaya geologiaya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2022. – № 92. – P. 50–63.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках тем государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» (№ 122040600012-2), ГИН СО РАН (№ АААА-А21-121011390002-2) и ИГМ СО РАН (№ 122041400171-5).

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, geosphere interaction, magmatism, metamorphism and isotope geochronology of the Timan and Northern Urals lithospheric segment' (№ 122040600012-2), Geological Institute SB RAS (№ АААА-А21-121011390002-2) and Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (№ 122041400171-5).

Информация об авторах:

Голубева Ирина Игоревна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Федерального исследовательского центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; Scopus; Author ID 35503292600, https://orcid.org/0000-0001-9956-6271 (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: iigolybeva2@yandex.ru).

Травин Алексей Валентинович – доктор геолого-минералогических наук Института геологии и минералогии имени В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID:7005725588, https://orcid.org/0000-0002-5640-4560 (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт Академика Коптюга, д. 3; e-mail: travin@igm.nsc.ru).

Хубанов Валентин Борисович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохронологии и геохимии окружающей среды Федерального государственного бюджетного учреждения науки Геологического института Сибирского отделения Российской академии наук; Scopus Author ID: 6507227953 https://orcid.org/0000-0001-5237-6614 (670047, Российская Федерация, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, д. 6а; e-mail: khubanov@mail.ru).

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

About the authors:

Irina I. Golubeva – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID 35503292600, https://orcid.org/0000-0001-9956-6271 (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: udoratina@geo.komisc.ru).

Alexey V. Travin – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID:7005725588, https://orcid.org/0000-0002-5640-4560 (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: travin@igm.nsc.ru).

Valentin B. Khubanov – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Head of the laboratory of Geochronology and Environmental Geochemistry, Geological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author

ID: 6507227953, https://orcid.org/0000-0001-5237-6614 (6a Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047 Russian Federation; e-mail: khubanov@mail.ru).

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

Для цитирования:

Голубева, И. И. Гранитоиды евъюганского комплекса Харбейского блока (Полярный Урал): новые геохронологические данные / И. И. Голубева, А. В. Травин, В. Б. Хубанов [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 40–52.

For citation:

Golubeva, I. I. Granitoidy evyuganskogo kompleksa Harbejskogo bloka (Polyarnyj Ural): novye geohronologicheskie dannye [Granitoids of the Evyugan complex of the Kharbey block (Polar Urals): new geochronological data] / I. I. Golubeva, A. V. Travin, V. B. Khubanov [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 40–52.

Дата поступления статьи: 10.09.2024
Прошла рецензирование: 25.11.2024
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 10.09.2024
Reviewed: 25.11.2024
Accepted: 01.04.2025

УДК 552.33:553.493 (234.851)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-53-67

Редкометалльные аляскиты массива Маньхамбо (Северный Урал): U-Pb (SIMS) данные и изотопно-геохимические характеристики

О. В. Удоратина, А. С. Шуйский

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

udoratina@geo.komisc.ru

Аннотация

Исследование посвящено редкометалльным аляскитам, обнаруженным в составе гранитоидного массива Маньхамбо (Северный Урал).

Проведены петрографо-минералогические и петро-геохимические исследования. Возраст определен U-Pb методом (SIMS) по единичным цирконам, изотопный состав Hf – LA ICP MS.

Высокодифференцированные аляскиты (Zr/Hf<25) сформированы во внутриплитной обстановке. Характерны повышенные содержания Ga, Nb, Ta, Th, HREE, низкие – Zr/Hf, Nb/Ta, Y/Ho. Выявлена сингенетичная редкометалльная минерализация (фергусонит, эшинит, Nb-Ta-титанит, браннерит). Выделены три типа цирконов: ксеногенные (527–512 и 1479 млн лет) и «сетчатые», «пористые» (337,6±7,3 млн лет). Для них типичны низкие Th/U, аномалии La в спектрах РЗЭ, указывающие на флюидное воздействие. Точки составов цирконов находятся вне магматических/гидротермальных полей, что связано либо с нарушением U-Pb системы, либо с особенностью редкометалльных расплавов. Температура кристаллизации пород – 790–677 °С. Положительные значения εHf(t) (+0,38...+6,8) свидетельствуют об ювенильном мантийном источнике. Модельный возраст TDM_2 (1,11–0,82 млрд лет) отражает участие древнего материала в плавлении.

Аляскиты массива Маньхамбо представляют поздний импульс расплава из глубинного ювенильного источника, не связанного с основным этапом формирования массива Маньхамбо. Их кристаллизация из фракционированных расплавов в верхнекоровых очагах обусловила уникальную минералогию и геохимию. По установленному возрасту относится к поньинскому щелочному гипабиссальному комплексу C_3-P*pn*.

Ключевые слова:

циркон, аляскиты, редкометалльно-редкоземельная минерализация, Северный Урал

Rare-metal alaskites of the Mankhambo massif (Northern Urals): U-Pb (SIMS) data and isotope-geochemical characteristics

O. V. Udoratina, A. S. Shuisky

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

udoratina@geo.komisc.ru

Abstract

The study focuses on rare-metal alaskites discovered within the Mankhambo granitoid massif (Northern Urals).

Petrographic-mineralogical and petro-geochemical analyses were conducted. The crystallization age was determined using U-Pb dating (SIMS) on single zircons; the Hf isotopic composition was analysed by LA ICP MS.

The rocks are highly differentiated alaskites (Zr/Hf<25), formed in an intraplate geodynamic setting. They exhibit elevated concentrations of Ga, Nb, Ta, Th, HREE along with low Zr/Hf, Nb/Ta, Y/Ho ratios. Singenetic rare-metal mineralization (fergusonite, aeschynite , Nb-Ta-bearing titanite, brannerite) was identified. Three zircon types were identified: xenogenic (527–512 Ma and 1479 Ma); 'reticulate' and 'porous' (337.6±7.3 Ma) crystals. The latter show low Th/U ratios, La anomalies in REE patterns indicating the Earth's fluid activity. The composition points of zircons are located outside the magmatic/hydrothermal fields, which is related either to the disturbance of the U-Pb system or to the specificity of rare-metal melts. The crystallization temperature of rocks ranges from 790 to 677 °C. Positive εHf(t) values (from +0.38 to +6.8) indicate a juvenile mantle source. The TDM_2 model age (1.11–0.82 Ga) means the involvement of ancient crustal material in melt generation.

The Mankhambo alaskites represent a late-stage pulse of granitic melt derived from a deep juvenile source, which is genetically distinct from the main magmatic phase of the massif. Their crystallization from highly fractionated melts in upper-crustal chambers resulted in unique mineralogical and geochemical features. By the estimated age, the alaskites belong to the Ponino alkaline hypabyssal complex C_3-P*pn*.

Keywords:

zircon, alaskites, rare-metal-rare-earth mineralization, Northern Urals

Введение

На севере Урала крупнейшими гранитными массивами являются Маньхамбовский и Ильяизский, слагающие ядро Маньхамбовского блока (рис. 1 а–в). Породы массивов выведены на поверхность на Северном Урале в поле распространения доуралид (протоуралид, тиманид) Ляпинско-Кутимского мегаантиклинория Центрально-Уральского поднятия. Гранитоиды отнесены к сальнеро-маньхамбовскому комплексу, Маньхамбовский массив является одним из его петротипов [4].

Гранитные массивы сближены в пространстве, обладают большим сходством минерального и химического составов слагающих их пород и имеют двухфазное строение. Первая фаза представлена гранитами и лейкогранитами (подчиненную роль имеют кварцевые диориты и гранодиориты (гибридной фации)). Вторая фаза – лейкограниты и аляскиты. Жильную серию слагают аплитовидные граниты, аплиты, реже – пегматиты.

Породы относятся к семействам гранитов, лейкогранитов умеренно-щелочного ряда. Наблюдаемые постепенные переходы не позволяют отнести породы к разным сериям. Биотитовые граниты относятся к I-типу, лейкограниты – к A-типу. Геохимическая типизация гранитоидов (используемая при геодинамических реконструкциях) неоднозначна, часть точек составов попадает в поле внутриплитных образований, часть – в поле позднеколлизионных и постколлизионных [5–7].

Формирование пород массивов, согласно полученным нами в последнее десятилетие данным (U-Pb, SIMS), по единичным зернам цирконов [8 и ссылки в этой работе] происходило в течение среднего-позднего кембрия. Близ субсинхронное формирование гранитоидов Ильяизского массива (I-тип, 520–500 млн лет) и гранитоидов Маньхамбовского массива (A-тип, 520–510 млн лет).

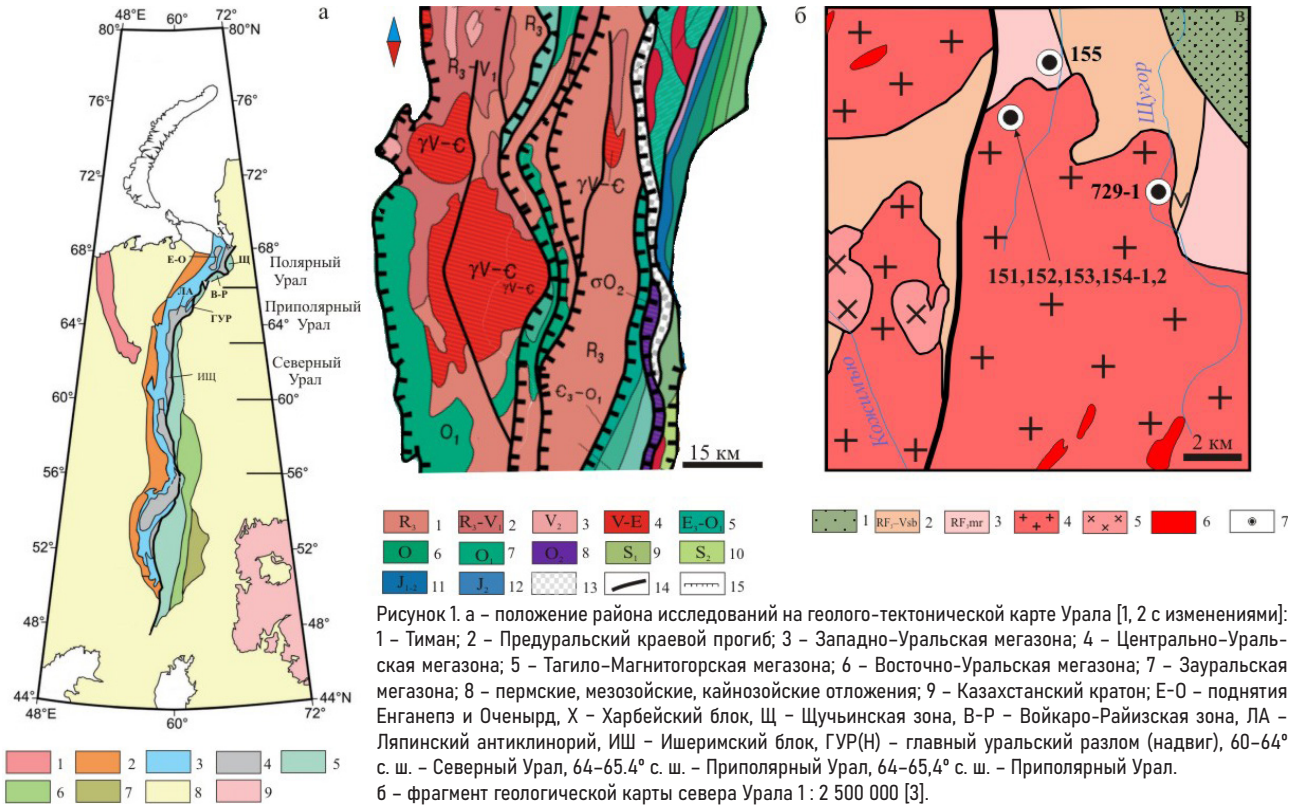


Рисунок 1. а – положение района исследований на геолого-тектонической карте Урала [1, 2 с изменениями]: 1 – Тиман; 2 – Предуральский краевой прогиб; 3 – Западно-Уральская мегазона; 4 – Центрально-Уральская мегазона; 5 – Тагило-Магнитогорская мегазона; 6 – Восточно-Уральская мегазона; 7 – Зауральская мегазона; 8 – пермские, мезозойские, кайнозойские отложения; 9 – Казахстанский кратон; Е-О – поднятия Енганепэ и Оченырд, Х – Харбейский блок, Щ – Щучьинская зона, В-Р – Войкаро-Райизская зона, ЛА – Ляпинский антиклинорий, ИШ – Ишеримский блок, ГУР(Н) – главный уральский разлом (надвиг), 60–64° с. ш. – Северный Урал, 64–65.4° с. ш. – Приполярный Урал, 64–65,4° с. ш. – Приполярный Урал.

б – фрагмент геологической карты севера Урала 1 : 2 500 000 [3].

Условные обозначения: 1 – верхний рифей; 2 – верхний рифей – нижний венд; 3 – венд; 4 – граниты, плагиограниты, кварцевые диориты; 5 – верхний кембрий – нижний ордовик; 6 – ордовик; 7 – нижний ордовик; 8 – перидотиты и дуниты; 9 – нижний силур; 10 – верхний силур; 11 – нижняя-средняя юра; 12 – средняя юра; 13 – меланж тектонический; 14 – геологические границы; 15 – ГУР.

в – северо-восточное окончание массива Маньхамбо (верховье р. Щугор): 1– терригенные толщи с базальными конгломератами в основании (обеизская свита $Є_3$–O_2*ob*); 2 – преимущественно вулканиты основного и кислого составов саблегорской свиты (RF_3–V*sb*); 3 – преимущественно сланцевые толщи мороинской свиты (Rf_3*mr*); 4 – граниты I фазы; 5 – гранодиориты I фазы; 6 – лейкограниты, аляскиты II фазы; 7 – точки отбора проб.

Figure 1. a – location of the study area on the geological-tectonic map of the Urals [1, 2 with changes]: 1 – Timan; 2 – Pre-Ural Foredeep; 3 – West-Ural Megazone; 4 – Central-Ural Megazone; 5 – Tagil-Magnitogorsk Megazone; 6 – East-Ural Megazone; 7 – Trans-Ural Megazone; 8 – Permian, Mesozoic, and Cenozoic deposits; 9 – Kazakhstan Craton; E-O – Enganepe and Ochenyrd uplifts, X – Kharbey Block, Щ – Shchuchya Zone, B-P – Voykaro-Raiz Zone, ЛА – Lyapin Anticlinorium, ИШ – Isherim Block, ГУР(Н) – Main Ural Fault (thrust fault), 60–64° N – Northern Urals, 64–65.4° N – Subpolar Urals, 64–65.4° N – Subpolar Urals.

б – fragment of the geological map of the Northern Urals, scale 1:2,500,000 [3].

Keys: 1 – Upper Riphean; 2 – Upper Riphean – Lower Vendian; 3 – Vendian; 4 – granites, plagiogranites, quartz diorites; 5 – Upper Cambrian – Lower Ordovician; 6 – Ordovician; 7 – Lower Ordovician; 8 – peridotites and dunites; 9 – Lower Silurian; 10 – Upper Silurian; 11 – Lower-Middle Jurassic; 12 – Middle Jurassic; 13 – tectonic mélange; 14 – geological boundaries; 15 – Main Ural Fault.

в – north-eastern end of the Mankhambo massif (upper reaches of the Shchugor River): 1 – terrigenous strata with basal conglomerates at the base (Obeiz suite $Є_3$–O_2*ob*); 2 – predominantly basic and felsic vulcanites of the Sablegorsk suite (RF_3–V*sb*); 3 – predominantly shale strata of the Moroinsk suite (Rf_3*mr*); 4 – phase I granites; 5 – phase I granodiorites; 6 – leucogranites, phase II alaskites; 7 – sampling points.

Породы массивов контактируют с образованиями верхнего рифея-венда и перекрываются осадочными отложениями неопределенного возраста, контакты частично тектонические, но наблюдаются и интрузивные [9–15].

Возраст палеонтологически «немых» терригенных отложений, перекрывающих Маньхамбовский массив и вмещающих комплексное редкоземельно-уран-торий-редкометалльное оруденение, является раннеордовикским (U-Pb, LA-ICP-MS) [11, 16, 17]. По другим данным датирования циркона методами U-Pb (TIMS) и LA-ICP- MS, возраст Маньхамбовского массива более древний (среднерифейский), а Ильяизского – более молодой [13, 18]. При этом предполагается, что более поздние ильяизские граниты могли снивелировать первичные изотопные характеристики маньхамбовских.

В пределах массива Маньхамбо А. В. Калиновским обнаружены редкометалльные субщелочные флюорит-содержащие аляскиты [19, с. 9]. Нами получены новые данные: о составе минералов, слагающих аляскиты, петро-геохимические характеристики, геохронологические и изотопно-геохимические.

Материалы и методы

Для изучения использовались образцы и пробы из коллекции А. В. Калиновского (Каменный архив ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Исследования проведены в ЦКП «Геонаука» г. Сыктывкара: петрографические (Olympus BX51), микрозондовые (сканирующий микроскоп Tescom Vega 3 LMN с энергодисперсным спектрометром X-Max). Содержания петрогенных оксидов получены классическим химическим методом, F, Be, Pb, Ga, V, Y, Li, Nb – количественным спектральным анализом. Концентрации редких, рассеянных и редкоземельных элементов определены методом нейтронной-активации (La, Ce, Pr*, Nd, Sm, Eu, Gd*, Tb, Dy*, Ho*, Er*, Tm*, Yb, Lu, Rb, Sr, Ba, Sc, Cr, Ni, Zn, Se, As, Sb, Th, U, Br, Hf, Ta, Zr, Au, Li) и рентгено-радиометрическим (Nb, Rb, Ta, Y, Zr) методом в ГЕОХИ РАН (г. Москва).

Монофракции циркона были помещены в эпоксидную шашку вместе со стандартами. Методика исследований описана в работе [20]. Определения возраста кристаллов циркона (U-Pb SIMS) проведены в Стэнфордском университете, США, (SHRIMP RG). Катодолюминесцентные изображения кристаллов циркона получены там же.

Изотопный состав Lu-Hf в продатированных кристаллах циркона определен в Институте геологии и минеральных ресурсов (г. Тяньцзинь, Китай) по методике, согласно работе [21].

Результаты и их обсуждение

Геологическое положение участка работ

Предшественниками (М. В. Фишманом, Б. А. Голдиным, Н. П. Юшкиным, Е. П. Калининым и др. [22]) отмечалось наличие в лейкогранитах зон щелочного метасоматоза, маркируемых флюоритом. А. В. Калиновским в составе крупнейшего на севере Урала гранитоидного массива Маньхамбо описаны субщелочные аляскиты, устойчиво содержащие тонко рассеянные тантало-ниобаты и флюорит [19, с. 9]. Им же обнаружено крупное, более 1,5 км по простиранию, тело аляскитов с постоянным присутствием сингенетичных фергусонита и флюорита.

Обнаруженные и опробованные участки, массив Маньхамбо:

1. Северная часть (г. Понъя-Из, обр. 151-154-2),

2. Северный склон г. Понъя-Из среди метаморфитов маньинской свиты (обр. 155),

3. Северо-восточная часть (верховья р. Щугор), обр. 729-1 (см. рис. 1 в).

Аляскиты наблюдаются в элювиальных развалах, образующих изолированные поля изометричной и вытянутой (дайкообразной) формы. Опробованные породы розовато-белого цвета преимущественно мелкозернистые, массивные. Породы имеют кварц-микроклин-альбитовый состав.

Петрография и минералогия

На разных участках породы имеют неодинаковую сохранность. Под микроскопом наблюдается катаклаз с сохранением на участках гранитной структуры и интенсивная грейзенизация в породах 1 и 2 участков, характерно низкое количество плагиоклаза (альбита), наблюдается развитие микроклина двух генераций и окварцевание с флюоритизацией. Минеральный состав, (об. %): калиевый полевой шпат (микроклин) – 45–55, кварц – 30–45, плагиоклаз (альбит (An_0)) – 5–10, слюда (ферроалюмоселадонит) 3–5, кальцит. Акцессорные минералы – алланит, апатит, монацит, циркон, торит, карбонаты тория, титанит (Nb-Ta содержащий), эшинит (эшинит-Th), наблюдаются фергусонит, в том числе (фергусонит-Yb), колумбит, флюорит. Рудные минералы – титаномагнетит, ильменит и гематит. Вторичные минералы представлены альбитом, серицитом, хлоритом (диабантитом). Несмотря на развитие позднего альбита, увеличения содержания натрия не отмечено, но проявлено позднее окварцевание.

По данным микрозондового анализа в пертитовом калиевом полевом шпате, содержание Na_2O составляет 0,32–0,43 мас. %. Слюда представлена ферроалюмоселадонитом. Кальцит в породе аллотриоморфнозернистый, поздний.

Минералы редких, редкоземельных и радиоактивных элементов образуют тонко распыленную вкрапленность (рис. 2 а). Они представлены выделениями различного размера оксидов железа, Ta-Nb содержащего титанита ассоциирующего с фергусонитом, алланитом, монацитом, цирконом, эшинитом (эшинитом (Th)) и браннеритом (рис. 2).

Эшинит и *эшинит (Th)* образуют выделения неправильной формы размером до 500 мкм в тесном срастании с Nb-Ta содержащим титанитом и браннеритом (рис. 2 б, в, е; рис. 3, а). В составе эшинита содержание (мас., %) Nb_2O_5 и ThO_2 достигает 20 и 9 соответственно (табл. 1). В эшините (Th) концентрации (мас., %) Nb_2O_5 составляют 9–14, а ThO_2 возрастают до 20–40. Присутствующие в эшините примеси Ce_2O_3, Ta_2O_5, PbO_2, UO_2 в эшините (Th) не наблюдаются.

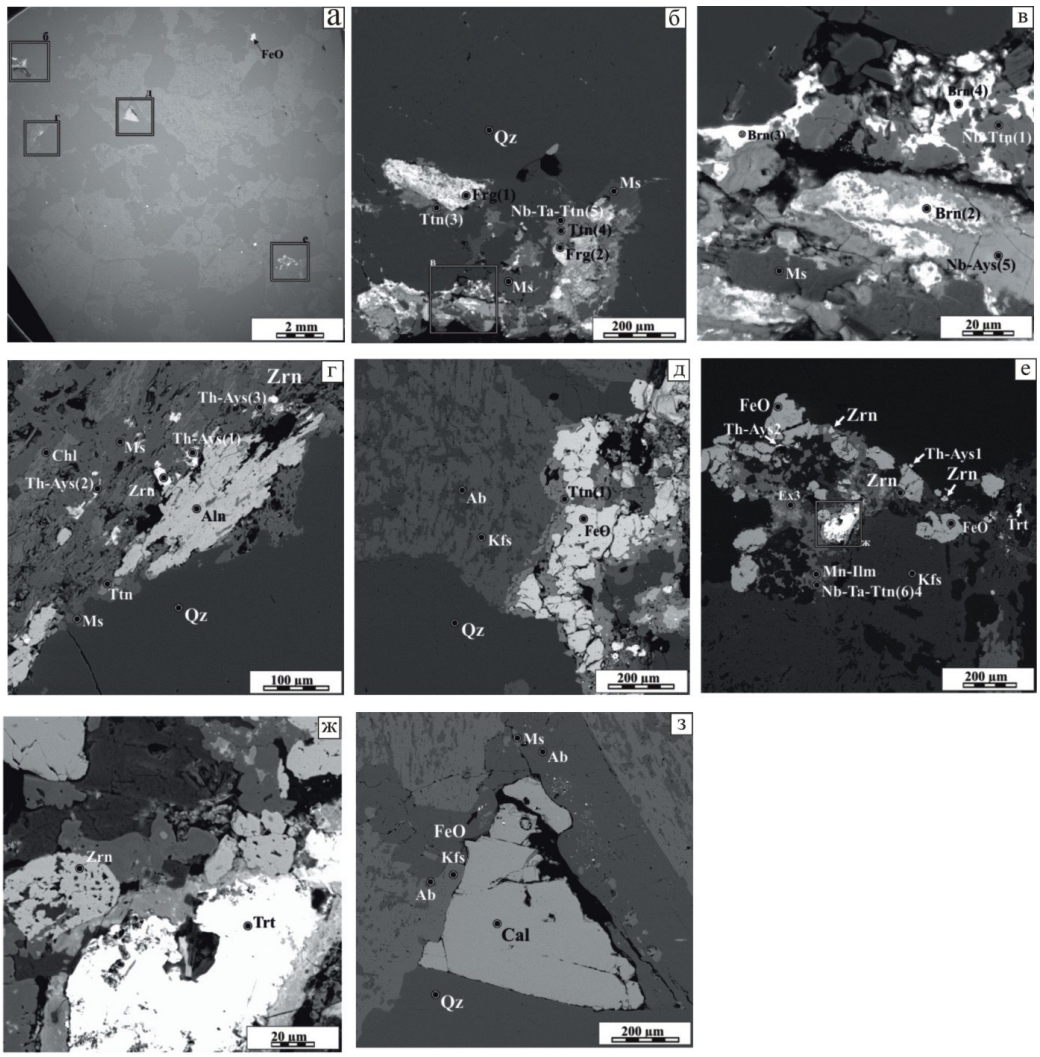


Рисунок 2. Формы выделения редкометалльных, редкоземельных и радиоактивных минералов в редкометалльных аляскитах (обр. 729-1): а – общий вид породы, ненарушенная магматическая микроструктура, рассеянное распределение рудных акцессорных минералов; б – сросток (агрегат) титанита (Nb-Ta содержащего титанита) и фергусонита с мусковитом (в – увеличенный фрагмент); г – алланит, эшинит (и эшинит (Th)), циркон в срастках с мусковитом и хлоритом; д – сросток Nb-Ta содержащего титанита и оксидов железа; е – сросток циркона, торита, эшинита (Th), Nb-Ta содержащего титанита, Mn-ильменитом и иксидами железа (ж – увеличенный фрагмент, «ажурный», «сетчатый», «пористый» циркон); з – аллотриаморфозернистый кальцит в граните.

Figure 2. Forms of release of rare-metal, rare-earth and radioactive minerals in rare-metal alaskites (sample 729-1): а – general appearance of the rock, undisturbed magmatic microstructure, scattered distribution of ore accessory minerals; б – intergrowth (aggregate) of titanite (Nb-Ta containing titanite) and fergusonite with muscovite (в – enlarged fragment); г – allanite, aeschynite (and aeschynite (Th)), zircon in intergrowths with muscovite and chlorite; д – intergrowth of Nb-Ta-containing titanite and iron oxides; е – intergrowth of zircon, thorite, aeshinite (Th), Nb-Ta-containing titanite with Mn-ilmenite and iron oxides (ж – enlarged fragment, 'lacy', 'reticulate', 'porous' zircon); з – allotriamorphic granular calcite in granite.

Ta-Nb содержащий титанит присутствует в виде агрегатов неправильной формы в тесной ассоциации с минералами Y, Th, U, фергусонитом, браннеритом, Th-эшинитом. Титанит (размером первые десятки мкм до первых сотен мкм) является наиболее ранним кристаллизующимся минералом либо присутствует в каймах оксидов железа (рис. 2, б, в, д). В нем отмечаются примеси (мас., %) Nb_2O_5 (0,98–3,43), Ta_2O_5 (2–8), Al_2O_3 (5,28–6,16), FeO (0,84–2,29) (рис. 3 б).

Алланит наблюдается в виде лучистых агрегатов размером до 100–400 мкм, ассоциирующих с цирконом, Nb-Ta содержащим титанитом, эшинитом (Th)) (рис. 2 г), содержание $РЗЭ_{(La+Ce+Nd)}$ составляет 19 мас., %.

Фергусонит отмечается в скоплениях рудных минералов Nb-Ta содержащего титанита, эшинита (и эшинита (Th)) в виде неправильной формы неоднородных агрегатов размером 200–300 мкм (рис. 2 б). Содержание Nb_2O_5 составляет 47 мас. %, а Y_2O_3 от 28 до 29 мас. % (табл. 2). Сумма тяжелых РЗЭ (Gd+Dy+Er+Yb) находится в узком диапазоне 10–11 мас. % (рис. 3 в).

Браннерит размером от первых мкм до 60 мкм наблюдается в тесном срастании с Nb-Ta содержащим титанитом и эшинитом (Th) (рис. 2, б, в). Содержание UO_2 находится на уровне 52–53 мас., %, Nb_2O_5 22–24 мас., %, PbO_2 2,5–2,75 мас., % (табл. 2).

В породе наблюдается развитие циркона двух типов (1), призматические кристаллы размером 10–50 – 100 мкм и (2) неправильной нередко округлой формы «ажурного», «сетчатого», «пористого» циркона (до 50–60 мкм) в ассоциации с торитом (до 100 мкм) (рис. 2 ж). Показательно

Таблица 1

Химический состав (мас, %) эшинита

Table 1

Chemical composition (wt. %) of aeschynite

Компоненты	Эшинит	Эшинит(Th)				
Рис. 2, № фото, (т.н.)	б, с (5)	г (1)	г (2)	г (3)	г (4)	г (5)
SiO_2	5,91	8,45	10,79	6,46	5,48	6,78
TiO_2	5,04	3,16	2,13	2,7	9,06	11,91
Al_2O_3	1,23	2,86	3,39	1,71	1	1,73
Cr_2O_3	0,48	-	0,37	0,45	0,46	-
Fe_2O_3	4,99	7,93	11,43	7,06	7,59	3,57
MgO	-	-	-	0,3	-	-
CaO	0,59	0,72	0,69	0,81	0,75	-
Na_2O	-	0,83	1,25	0,64	0,78	-
K_2O	-	0,84	0,67	-	-	-
P_2O_5	4,75	6,74	5,66	6,35	8,39	9,63
Nb_2O_5	19,97	13,72	11,72	14,03	9,02	11,11
Ce_2O_3	0,84	-	-	-	-	-
Ta_2O_5	4,08	-	-	-	-	-
PbO_2	5,87	-	-	-	-	-
ThO_2	9,76	26,75	20,48	26,66	31,83	39,58
UO_2	1,99	-	-	-	-	-
Формульные коэффициенты						
Si	0,41	0,53	0,62	0,47	0,36	0,40
Ti	0,26	0,15	0,09	0,15	0,45	0,53
Al	0,10	0,21	0,23	0,15	0,08	0,12
Cr	0,03		0,03	0,03	0,03	
Fe	0,26	0,37	0,49	0,39	0,38	0,16
Mg	-	-	-	0,03	-	-
Ca	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	-
Na	-	0,10	0,14	0,09	0,10	-
K	-	0,03	0,02	-	-	-
P	0,28	0,36	0,27	0,39	0,47	0,48
Nb	0,62	0,39	0,30	0,46	0,27	0,30
Ce	0,02	-	-	-	-	-
Ta	0,08	-	-	-	-	-
Pb	0,11	-	-	-	-	-
Th	0,15	0,38	0,27	0,44	0,48	0,54
U	0,03	-	-	-	-	-

Примечание. Здесь и далее «–» – не определено.
Note. Hereinafter "–" – not determined.

положение позднего по образованию, но не вторичного кальцита, имеющего аллотриоморфозернистые формы выделения в породе (рис. 2 з).

Петро-геохимическая характеристика

Исследуемые породы – аляскиты кислые и ультракислые плутонические породы, умереннощелочного подотряда, калиево-натриевого типа щелочности [23]. Содержания (мас., %) кремнезема в них составляет 77–82, глинозема – 9,15–12,41, (Na_2O+K_2O) 6,38–9,30, при преобладании оксида калия (Na_2O+K_2O) 0,7–1,04 (табл. 3, рис. 4 а–д). Содержания TiO_2 (0–1,12) и суммарного железа $FeO+Fe_2O_3$ (0,68–1,09).

В распределении несовместимых элементов обращают внимание высокие Ni (130–960 г/т) и в то же время низкие Cr (1,25–19,7 г/т) содержания (табл. 4). Породы обеднены литофильными элементами (г/т) Sr (10–195), Ba (369–480, за исключением одного значения), Rb (45–114, за исключением одного значения). Отмечается резкое обогащение Nb (41–110 г/т), Ta (4,9–11,6 г/т), Th (28–88 г/т) и истощение Zr (25–105 г/т).

Аляскиты имеют невысокие содержания РЗЭ (<130 г/т) с подковообразными спектрами распределения и слабым фракционированием легких и тяжелых РЗЭ $(La/Yb)_N$ – 1,5–3,8. Отмечаются глубокие отрицательные Eu аномалии (Eu/Eu*=0,01–0,27) (табл. 4, рис. 4 е). Мультиспектры нормированных на примитивную мантию значений демонстрируют преобладание крупноионных элементов над высокозарядными (рис. 4 ж).

Изученные породы обладают рядом геохимических особенностей, указывающих на дифференцированность гранитного расплава: высокие содержания Ga, Nb, Ta, Th, HREE, низкие значения Zr/Hf (2.66–6.21), Nb/Ta (3,90–11,02), Y/Ho (11,80–23,77), табл. 4 [26, 27].

Точки составов на диаграммах, применяемых для реконструкции геодинамических условий формирования пород, группируются в полях внутриплитных образований (рис. 4 з–и).

Температуры формирования пород, рассчитанные по параметру M [28], составили 790–677° C (табл. 3).

Изотопно-геохронологическая характеристика

Был определен U-Pb возраст цирконов из этих пород, для 11 кристаллов получено 12 значений (табл. 5). Цирконы

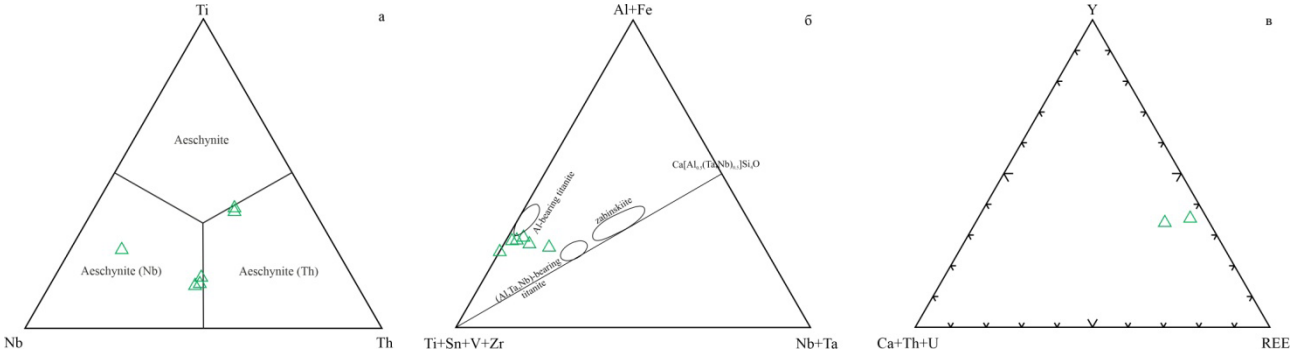


Рисунок 3. Классификационные диаграммы Nb-Ti-Th для эшинита (а); (Ti+Sn+V+Zr)-(Al+Fe)-(Nb+Ta) для титанита (б); (Ca+Th+U)-Y-REE для фергусонита (в).
Figure 3. Classification diagrams: a) Nb-Ti-Ta for aeschynite; б) (Ti+Sn+V+Zr)-(Al+Fe)-(Nb+Ta) for titanite; в) (Ca+Th+U)-Y-REE for fergusonite.

Таблица 2

Химический состав (мас, %) титанита, фергусонита и браннерита

Table 2

Chemical composition (wt. %) of titanite, fergusonite and brannerite

Компоненты	Nb-Ta содержащий титанит						Фергусонит		Браннерит		
Рис. 2, № фото, (т.н.)	б (3)	б (4)	в (1)	д (1)	е (3)	е (4)	б (1)	б (2)	в (2)	в (3)	в (4)
SiO_2	30,76	31,64	30,52	30,64	33,43	30,26	-	-	2,66	2,15	2,61
TiO_2	26,66	22,45	28,47	25,3	25,81	27,19	1,19	0,66	4,40	4,49	4,29
Al_2O_3	6,00	4,52	5,28	6,16	5,54	5,29	-	-	1,1	0,81	0,94
Ce_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	-	1,17	-	0,87
FeO*	1,39	2,21	0,84	1,30	1,70	2,29	-	-	1,52	2,06	1,74
CaO	26,16	25,3	25,56	25,39	26,34	25,41	0,90	0,72	-	-	-
P_2O_5	-	-	-	-	-	-	-	-	2,40	2,56	2,31
Y_2O_3	-	-	-	-	-	-	27,7	29,3	-	-	-
Nb_2O_5	0,98	3,43	-	2,80	3,16	1,15	46,6	47,4	24,24	22,34	21,9
Ta_2O_5	1,75	7,98	-	-	2,67	-	1,47	-			
Gd_2O_3	-	-	-	-	-	-	1,37	1,50	-	-	-
Dy_2O_3	-	-	-	-	-	-	3,29	2,44	-	-	-
Er_2O_3	-	-	-	-	-	-	2,54	2,73	-	-	-
Yb_2O_3	-	-	-	-	-	-	4,16	3,60	-	-	-
PbO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	2,75	2,47	-
ThO_2	-	-	-	-	-	-	2,85	2,02	-	-	-
UO_2	-	-	-	-	-	-	1,95	1,80	54,04	51,57	51,91
F	2,18	1,30	1,93	2,24	2,22	2,43	-	-	-	-	-
Формульные коэффициенты											
Si	1,05	1,09	1,06	1,06	1,09	1,04	-		0,24	0,20	0,25
Ti	0,68	0,58	0,74	0,66	0,63	0,71	0,04	0,02	0,29	0,32	0,31
Al	0,24	0,18	0,22	0,25	0,21	0,22	-	-	0,12	0,09	0,11
Ce	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04	-	0,03
Fe	0,04	0,06	0,02	0,04	0,05	0,07	-	-	0,11	0,16	0,14
Ca	0,95	0,93	0,95	0,94	0,92	0,94	0,05	0,04	-	-	-
P	-	-	-	-	-	-	-	-	0,18	0,21	0,19
Y	-	-	-	-	-	-	0,68	0,73	-	-	-
Nb	0,02	0,05	-	0,04	0,05	0,02	0,98	1,01	0,98	0,96	0,95
Ta	0,02	0,08	-	-	0,02	-	0,02	-	-	-	-
Gd	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	-	-	-
Dy	-	-	-	-	-	-	0,05	0,04	-	-	-
Er	-	-	-	-	-	-	0,04	0,04	-	-	-
Yb	-	-	-	-	-	-	0,06	0,05	-	-	-
Pb	-	-	-	-	-	-	-	-	0,07	0,06	-
Th	-	-	-	-	-	-	0,03	0,22	-	-	-
U	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	1,07	1,09	1,10
F	0,23	0,14	0,21	0,24	0,23	0,27	-	-	-	-	-

(до 100 мкм) непрозрачные и полупрозрачные призматического габитуса с сахаровидной поверхностью, Ку=1:2. На катодолюминесцентных изображениях мы видим три типа 1. черные (1.1, 2.1, 3.1, 7.1, 8.1-9.1), 2. серые (4.1, 5.1, 6.1, 10.1, 11.1, 12.1), 3. в этом зерне (8.1-9.1) в центральной части проявлена магматическая осцилляторная зональность (рис. 5 а). Наличие в этом кристалле черной каймы позволяет предположить, что возможно центральные части кристаллов черных на катодолюминесцентных изображениях оказались невскрытыми и можно предполагать наличие внутри таких же осцилляторных зон. Именно в этом кристалле оба замера (табл. 6, 8.1 и 9.1) показали возраста, как мы полагаем, наследованные (захваченные цирконы) от пород главных фаз массива Маньхамбо (528–513 млн лет). Однако значения измеренных черных на катодолюминесцентных изображениях кристаллов молодые – 432, 379, 329 млн лет.

Серые на катодолюминесцентных изображениях кристаллы циркона (4.1, 5.1, 6.1, 10.1, 11.1, 12.1) кореллируют по строению с «сетчатыми», «ажурными» кристаллами, наблюдаемыми при микрозондовых исследованиях (рис. 2 г, рис. 5 а).

Из расчета убраны точки с высокой дискордантностью 5,1, 7,1, 10,1, а также точки 8,1–9,1 (528–513 млн лет) и точка 2,1 с возрастом 1488 млн лет.

Для оставшихся точек характерны крайне высокие содержания U от 1686 до 2673 г/т и сильно варьирующие содержания Th от 171 до 974 г/т (табл. 5), значения Th/U – низкие (0,10–0,37).

Возраст цирконов по отношению $^{206}Pb/^{238}U$ определен в шести точках (рис. 5 б), диапазон возрастов составил 373–324 млн лет. Рассчитанный средневзвешенный возраст – 337,6±7,3 млн лет (СКВО=0.13).

Геохимические спектры распределения РЗЭ в цирконе являются индикаторами условий образования. Содержания элементов-примесей близки (табл. 6, рис. 6 а, б), однако они варьируют по содержанию La. Из-за сильного фракционирования состав цирконов, возможно, не отражает параметры первичного магматического расплава и не попадает в магматическое поле (рис. 6 в). На диаграмме Yb–U/Th положение точек составов продатированного (серого в CL) циркона также смещается из поля цирконов обычных составов гранитов (рис. 6 г). Значение $(Y/Gd)_N$ в этих цирконах низкое 11–19 (для магматических цирконов оно составляет ~23, для пористых цирконов, прошедших преобразование, – ~98, какими либо процессами (например, низкотемпературными, гидротермальными или высокотемпературными «позднемагматическими» кристаллизующиеся из остаточного флюидонасыщенного расплава). Значения $(Sm/La)_N$ низкие (0,2–0,8) отражает наблюдаемое обогащение La.

На рис. 6 б показаны спектры цирконов, возраст которых использован для расчета времени формирования, отмечается высокое содержание La. В продатированных зонах кристаллов, вошедших в выборку для расчета времени формирования циркона, рассчитана по содержанию титана в цирконе температура кристаллизации (табл. 6), полученные значения из-за высокого содержания железа

Таблица 3

Химический состав (мас., %) аляскитов и петрогенетические параметры

Table 3

Chemical composition (wt. %) of alaskites and petrogenetic parameters

Компонент	151	152	153	154-1	154-2	155	729-1
SiO_2	82,00	77,86	77,12	77,22	77,36	79,96	77,14
TiO_2	0,11	0,11	0,05	сл	сл	0,12	0,12
Al_2O_3	9,15	11,65	11,97	12,41	11,53	10,86	11,61
Fe_2O_3	0,79	0,89	0,30	0,44	0,81	0,39	0,63
FeO	0,25	0,20	0,38	0,24	0,32	0,29	0,33
MnO	Сл,	Сл,	0,01	0,01	0,09	-	0,01
MgO	0,10	0,26	0,32	0,08	0,68	0,21	0,13
CaO	0,13	0,12	0,45	0,46	0,45	0,29	0,3
Na_2O	3,00	4,06	4,61	4,44	4,18	3,37	3,41
K_2O	3,38	4,63	4,52	4,86	4,14	4,27	4,90
H_2O^-	0,04	0,06	0,10	0,11	0,13	0,05	0,19
H_2O^+	0,21	0,14	-	-	-	0,38	0,35
CO_2	0,02	0,03	0,06	-	0,13	0,06	0,01
S	0,01	0,008	0,02	0,03	0,03	0,005	-
P_2O_5	0,01	-	0,035	0,10	0,03	0,01	0,01
п.п.п.	0,28	0,28	0,23	0,11	0,37	0,46	0,46
Na_2O+K_2O	6,38	8,69	9,13	9,30	8,32	7,64	8,31
Na_2O/K_2O	0,89	0,88	1,02	0,91	1,01	0,79	0,70
ASI	1,04	0,98	0,90	0,93	0,95	1,02	1,01
AИ	0,94	1,00	1,04	1,01	0,98	0/94	0,94
K/Rb	444,88	476,90	737,53	818,94	789,47	1007,30	50,02
Rb/Sr	0,46	2,28	8,37	0,58	1,16	0,64	15,94
Кф	0,91	0,81	0,68	0,89	0,62	0,76	0,88
al'	8,03	8,63	11,97	16,33	6,37	12,20	10,65
$10^4Ga/Al$	4,42	3,31	2,90	3,26	3,51	2,13	2,60
M	1,23	1,40	1,55	1,51	1,46	1,31	1,34
T°C	762	677	703	693	682	706	790

(1368–12609 г/т) не корректны. Корректные значения получены лишь для ксеногенных цирконов (1.1, 2.1, 8.1, 9.1).

Изотопно-геохимическая характеристика.

Значения изотопного состава гафния в цирконах (обр. 729-1) в исследованных аляскитах варьируют от +0,38 до +6,8, рассчитанный модельный возраст составил 1,11–0,82 млн лет (табл. 7, рис. 6 д).

Полученные значения изотопного состава гафния мантийные, что подтверждают и полученные нами петро-геохимические данные, а также присутствие сингенетичной комплексной Y-Nb-U-Th минерализации.

Выводы

Таким образом, изученные породы имеют линейный характер развития, прослеженный по элювиальным развалам. Породы характеризуются магматическими микроструктурами, мы относим их к дайковым образованиям.

На отдельных участках отмечается катаклаз, проявлены окварцевание и реже – альбитизация пород. Детальные исследования шлифов и аншлифов показали

Таблица 4

Содержание (г/т) редких, рассеянных и редкоземельных элементов в аляскитах

Table 4

Content (ppm) of rare, trace and rare-earth elements in alaskites

№	Элемент	151	152	153	154-1	154-2	155	729-1
1	La	17,30	18,50	29,20	1,57	14,90	29,20	30,50
2	Ce	26,30	30,90	40,00	15,00	23,80	48,20	50,00
3	Pr*	2,48	3,02	3,41	2,25	2,24	4,70	4,85
4	Nd	8,00	10,20	9,90	0,19	7,12	15,00	15,10
5	Sm	1,80	2,35	1,91	0,57	1,51	3,42	3,29
6	Eu	0,008	0,23	0,23	0,048	0,072	0,20	0,11
7	Gd*	3,29	4,01	3,85	0,48	2,90	5,01	5,00
8	Tb	0,62	0,69	0,67	0,11	0,60	0,9	0,89
9	Dy*	4,48	4,99	4,82	0,84	4,52	6,20	6,10
10	Ho*	1,22	1,35	1,32	0,26	1,33	1,63	1,61
11	Er*	4,27	4,61	4,54	1,03	5,00	5,30	5,22
12	Tm*	0,74	0,81	0,81	0,22	0,99	0,90	0,89
13	Yb	5,09	5,47	5,43	1,63	7,02	5,68	5,74
14	Lu	1,07	1,10	1,12	0,39	1,52	1,08	1,13
15	Cs	0,66	1,32	0,26	0,12	-	1,16	0,86
16	Sr	195,00	50,00	10,00	125,00	61,00	70,00	51,00
17	Ba	26,00	89,00	-	11,00	300,00	1010,00	480,00
18	Sc	3,00	2,47	2,74	0,73	2,74	2,57	3,16
19	Cr	19,70	5,87	1,17	1,41	1,16	3,24	4,46
20	Co	0,65	1,53	0,28	0,59	1,22	0,86	2,92
21	Ni	960,00	250,00	220,00	240,00	-	130,00	240,00
22	Zn	-	10,00	-	-	-	-	-
23	Se	0,88	1,13	3,10	2,88	0,79	4,23	9,64
24	As	4,01	1,51	3,35	0,63	1,24	-	8,71
25	Sb	0,19	0,83	0,30	0,35	0,091	0,20	0,27
26	Th	64,00	40,40	61,30	27,70	88,00	72,90	81,70
27	U	7,31	7,10	8,27	7,49	8,32	9,75	10,80
28	Br	0,021	0,015	0,025	0,032	0,084	0,019	0,054
29	Hf	18,80	9,16	14,30	10,00	18,90	8,85	9,40
30	Au	0,019	-	-	0,045	0,02	0,015	0,025
31	Rb	420,00	530,70	389,60	338,00	329,70	208,30	813,00
32	Ta	15,90	9,74	21,30	18,20	23,10	11,80	21,00
33	Y	-	120,00	230,00	-	-	-	20,00
34	Zr	170,00	150,00	210,00	90,00	230,00	170,00	90,00
35	Nb	-	80,00	60,00	20,00	70,00	20,00	10,00
36	F	200,00	150,00	-	90,00	80,00	280,00	1200,00
37	Li	3,50	3,60	2,80	-	2,10	5,30	1,80
38	Y	29,00	27,00	19,00	10,00	21,00	23,00	19,00
39	V	4,40	11,00	9,20	22,00	9,20	11,00	9,20
40	Be	4,00	6,00	3,80	3,20	3,80	3,00	6,50
41	Pb	8,40	10,00	5,20	3,60	7,20	5,50	8,40
42	Ga	21,00	20,00	18,00	21,00	21,00	12,00	16,00
43	Nb	60,00	50,00	60,00	75,00	110,00	65,00	41,00
44	Eu/Eu*	0,01	0,23	0,25	0,27	0,10	0,15	0,08
45	La_N/Yb_N	2,44	2,43	3,86	0,69	1,52	3,69	3,81
46	ΣREE	76,67	88,23	107,21	24,59	73,52	127,42	130,43
47	Zr/Hf	5,59	4,37	4,55	5,50	2,38	6,21	2,66
48	Nb/Ta	7,56	10,25	5,61	8,26	9,48	11,02	3,90
49	Y/Ho	23,77	20,00	14,39	38,46	15,79	14,11	11,80

Примечание. Результаты, полученные методом нейтронно-активационного анализа, (1–30, * – расчетные данные), рентгено-радиометрического анализа (31–35), количественного спектрального анализа (36–43). 44–49 характеристические значения.

Note. Results are obtained by neutron activation analysis (1–30, * – calculated data), X-ray radiometric analysis (31–35), quantitative spectral analysis (36–43). 44–49 – characteristic values.

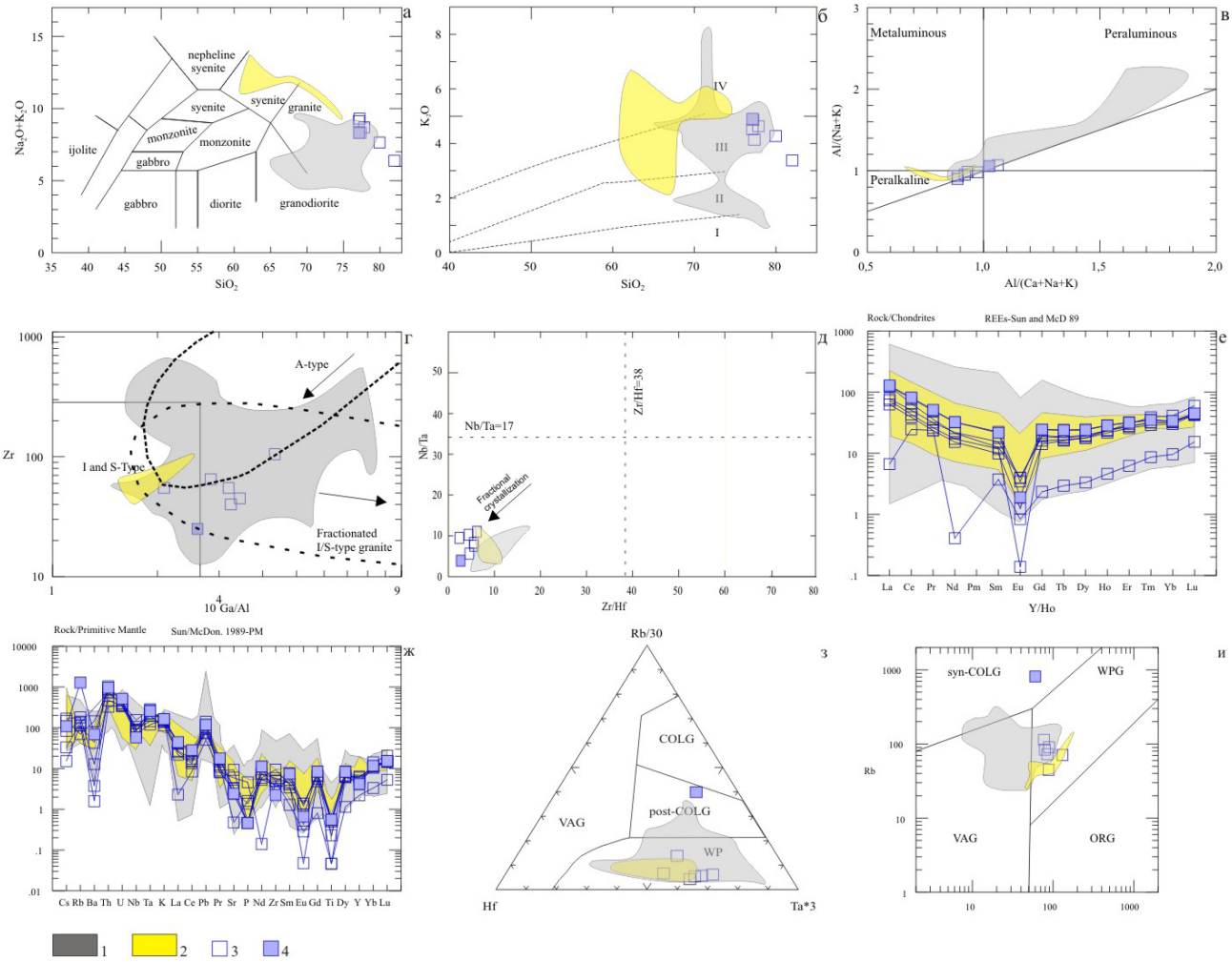


Рисунок 4. Расположение точек составов исследуемых пород на диаграммах: SiO_2-(Na_2O+K_2O) (а), SiO_2-K_2O(б), Al/(Na+K)-Al/(Ca+Na+K) (в), Zr-10^4Ga/Al (г), Zr/Hf-Nb/Ta вариационные диаграммы для высокофракционированных гранитов [24] (д), график зависимости концентрации Y от отношения Y/Ho [25] (е), спектры распределения РЗЭ (ж) и мультиэлементные спектры (з) исследуемых пород. Положение точек составов на диаграммах Hf–Rb/30–Ta*5 (і) и Rb-Y+Nb (и).

Условные обозначения. 1 – точки составов гранитоидов двух фаз массива Маньхамбо (авторские неопубликованные данные), 2 – точки составов сиенитов Маньхамбо по [19, 26], 3 – аляскиты, 4 – продатированная проба (729-1); I – шошонитовая, II – высококалиевая известково-щелочная, III – известково-щелочная, IV – толеитовая. VAG – граниты вулканических дуг, WPG – внутриплитные, COLG – колизионные, post-COLG – постколлизионные, syn-COLG – синколлизионные, ORG – граниты океанических хребтов.

Figure 4. Distribution of compositional data points of the studied rocks on the following diagrams: SiO_2-(Na_2O+K_2O) (a), SiO_2-K_2O (б), Al/(Na+K)-Al/(Ca+Na+K) (в), Zr-10^4Ga/Al (г), Zr/Hf-Nb/Ta variation diagrams for highly fractionated granites [24] (д), Y concentration versus Y/Ho ratio plot [25] (е), REE distribution patterns (ж), and multi-element spectra (з) of the studied rocks. Position of compositional data points on the Hf–Rb/30–Ta*5 (і) and Rb-Y+Nb diagrams (и).

Keys: 1 – compositional data points of granitoids from two phases of the Mankhambo massif (author's unpublished data), 2 – compositional data points of Mankhambo syenites according to [19, 26], 3 – alaskites, 4 – dated sample (729-1); I – shoshonitic, II – high-K calc-alkaline, III – calc-alkaline, IV – tholeiitic. VAG – volcanic arc granites, WPG – within-plate granites, COLG – collisional granites, post-COLG – post-collisional granites, syn-COLG – syn-collisional granites, ORG – oceanic ridge granites.

Таблица 5

Результаты U–Pb изотопных исследований цирконов

Table 5

Results of U–Pb isotope studies of zircons

Зерно. Кратер	$^{206}Pb_c$ %	Содержания, мкг			$^{232}Th/^{238}U$	Возраст млн лет, ±1σ		D. %	Изотопные отношения, ±%. 1σ			Rh_o
		$^{206}Pb^*$	U	Th		$^{206}Pb/^{238}U$	$^{207}Pb/^{206}Pb$		$^{207}Pb/^{206}Pb$	$^{207}Pb/^{235}U$	$^{206}Pb/^{238}U$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Серые на катодолюминесцентных изображениях												
6,1	3,43	89	2109	619	0,30	309±5	339±114	+9	0,0801±2,8	0,36±5,3	0,049±1,7	0,3
10,1	22,81	118	2673	372	0,14	327±9	629±678	+49	0,2363±4,7	0,44±31,6	0,052±2,7	0,1
4,1	5,19	122	2656	974	0,38	337±7	368±251	+9	0,0950±4,6	0,40±11,4	0,054±2,2	0,2
5,1	3,33	113	2428	839	0,36	342±4	623±204	+46	0,0801±2,7	0,45±9,5	0,054±1,1	0,1
12,1	6,44	86	1686	171	0,10	373±14	492±804	+25	0,1060±14,0	0,47±36,7	0,060±4,0	0,1

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11,1	2,41	92	1802	243	0,14	373±19	383±90	+3	0,0735±2,4	0,45±6,5	0,060±5,1	0,8
Черные на катодолюминесцентных изображениях												
3,1	1,91	98	2177	1048	0,50	328±5	285±104	-16	0,0684±0,5	0,37±4,8	0,052±1,5	0,3
7,1	5,89	105	2026	916	0,47	381±8	580±208	+35	0,1017±3,6	0,50±9,8	0,061±2,1	0,2
1,1	0,35	150	2530	1295	0,53	432±5	478±14	+10	0,0583±0,4	0,54±1,3	0,069±1,1	0,9
Ксеногенные (соответствуют возрасту гранитоидов I и II фаз массива Маньхамбо)												
8,1	0,25	34	479	288	0,62	512±3	444±41	-16	0,0596±1,0	0,64±1,9	0,083±0,6	0,3
9,1	0,30	52	715	500	0,72	527±9	424±58	-25	0,0605±1,7	0,65±3,1	0,085±1,7	0,5
ксеногенные (древние)												
2,1	1,19	90	408	222	0,56	1488±26	1594±36	+7	0,1028±1,2	3,52±2,8	0,260±2,0	0,7

Примечание. $^{206}Pb_c$ и $^{206}Pb^*$ – обыкновенный и радиогенный свинец. Изотопные отношения и содержания ^{206}Pb скорректированы по измеренному ^{204}Pb. D – дискордантность: D = 100×[возраст ($^{207}Pb/^{206}Pb$) / возраст ($^{206}Pb/^{238}U$) – 1]. Rh_o – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{235}U$.

Note. $^{206}Pb_c$ и $^{206}Pb^*$ – ordinary and radiogenic lead. Isotopic ratios and concentrations of ^{206}Pb are corrected by measured ^{204}Pb. D – discordance: D = 100×[age ($^{207}Pb/^{206}Pb$) / age ($^{206}Pb/^{238}U$) – 1]. Rh_o is the correlation coefficient between determination errors of the isotope ratios $^{206}Pb/^{238}U$ and $^{207}Pb/^{235}U$.

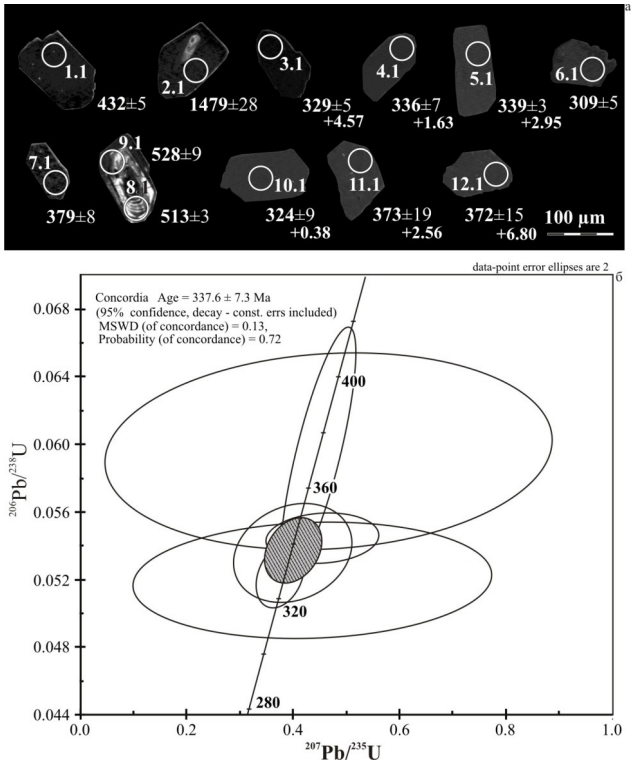


Рисунок 5. Катодолюминесцентные изображения цирконов с номерами датированных зерен и аналитических кратеров, εHf (а) и $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ диаграмма с конкордией (б).

Figure 5. Cathodoluminescence images of zircons with numbers of dated grains and analytical craters, εHf (a) and $^{206}Pb/^{238}U$-$^{207}Pb/^{235}U$ diagram with concordia (б).

отсутствие приуроченности рудных минералов к межкатаклазовому пространству.

Установлена тонкорассеянная сингенетичная комплексная минерализация Y–Nb, U–Th: ассоциации фергусонита, эшинита (эшинита (Th)), Nb-Ta содержащего титанита, браннерита), наличие позднего кальцита.

Петро-геохимически исследованные породы соответствуют аляскитам и рассматриваются нами как сформированные из высокодифференцированного расплава. Для пород характерны высокое содержания кремнезема, преобладание оксида калия над оксидом натрия. Аляскиты имеют невысокие содержания РЗЭ с подковообразными спектрами распределения и слабым фракционированием легких и тяжелых, характерны глубокие отрицательные Eu аномалии. Мультиспектры нормированных на примитивную мантию значений демонстрируют преобладание крупноионных элементов над высокозарядными. Для исследованных пород характерны высокие содержания Ga, Nb, Ta, Th, HREE, низкие значения Zr/Hf, Nb/Ta, Y/Ho. Отсутствуют корреляции элементов, слагающих рудные акцессорные минералы (Y, Nb, U, Th), например, с Na_2O, что можно было бы рассматривать как признак метасоматического контроля минерализации. Точки составов пород на диаграммах, применяемых для реконструкции геодинамических условий формирования пород, группируются в полях внутриплитных образований.

Изучение выборки цирконов показало, что в породе присутствуют несколько типов цирконов: 1) захваченные (ксеногенные) цирконы с возрастами, аналогичными возрастам (средний-поздний кембрий) гранитоидов Маньхамбовского массива [8] и 2) более древние (1479, нижнерифейский), а также 3) серые на катодолюминесцентных изображениях кристаллы, кореллирующие по строению с «сетчатыми», «ажурными», «пористыми» кристаллами, наблюдаемыми нами при микрозондовых исследованиях. Подобные по внутреннему строению пористые цирконы рассматриваются как преобразованные под действием поздних водно-солевых флюидов [27].

Расчетный средневзвешенный U-Pb возраст цирконов 3-го типа составил 337,6±7,3 млн лет (2σ, n=6, СКВО=0.13). Эти цирконы характеризуются высокими значениями U и Th и низкими значениями Th/U, варьирующими от 0.1 до 0.3 (есть два значения 0,35, 0,37), и в целом близки к *немагматическим* цирконам (Th/U <0,1–0,3). В спектрах распределения РЗЭ в этих цирконах отмечаются вариации по содержанию La, характерны низкие значения $(Sm/La)_N$ (0,2–0,8), отражающие наблюдаемое обогащение La, характерное для преобразованных цирконов. С одной стороны, для них типичны слишком низкие значения $(Y/Gd)_N$. Точки составов цирконов находятся вне полей магматических и гидротермальных цирконов, что может указывать на нарушенность

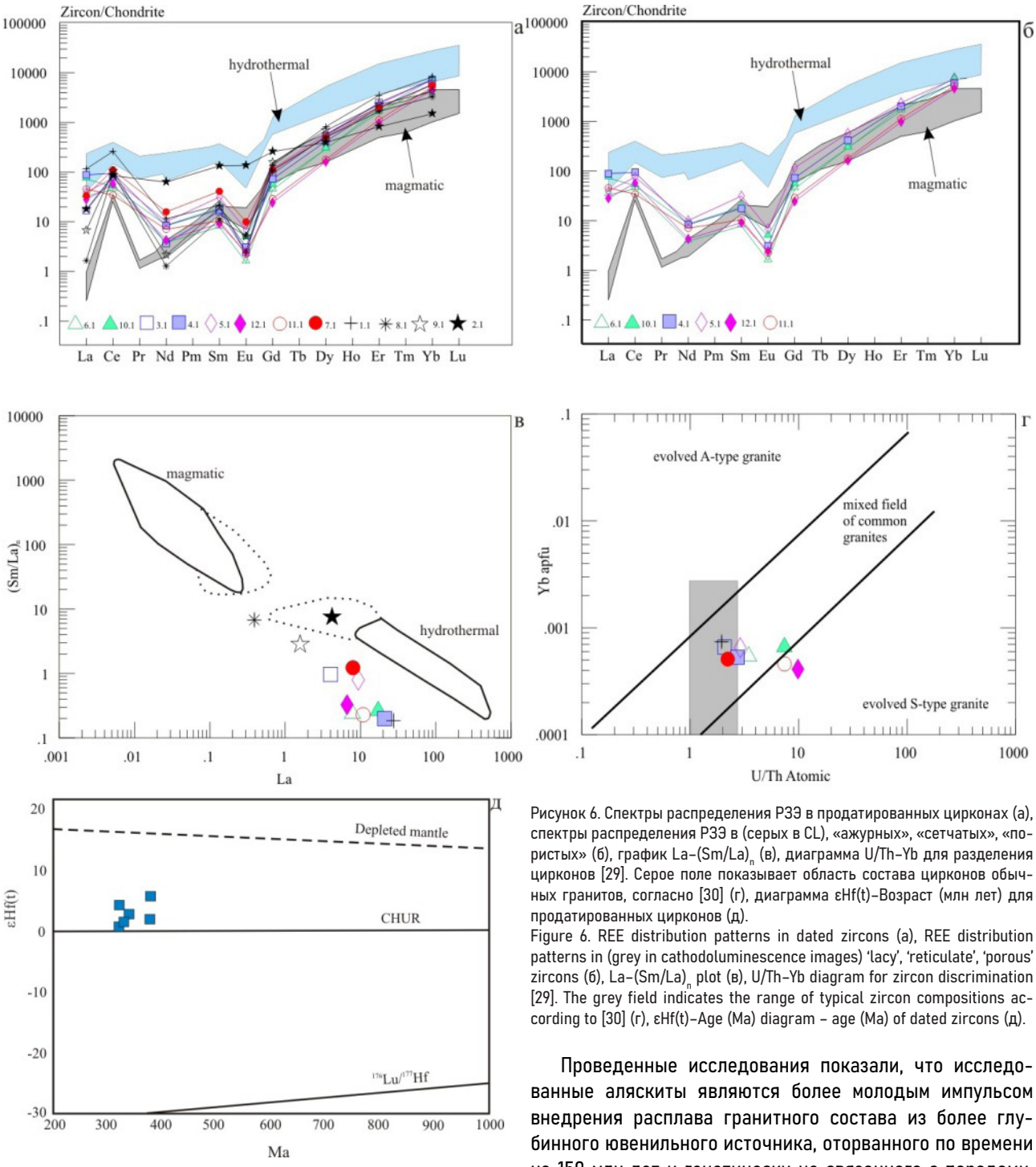


Рисунок 6. Спектры распределения РЗЭ в продатированных цирконах (а), спектры распределения РЗЭ в (серых в CL), «ажурных», «сетчатых», «пористых» (б), график La–$(Sm/La)_n$ (в), диаграмма U/Th–Yb для разделения цирконов [29]. Серое поле показывает область состава цирконов обычных гранитов, согласно [30] (г), диаграмма εHf(t)–Возраст (млн лет) для продатированных цирконов (д).

Figure 6. REE distribution patterns in dated zircons (a), REE distribution patterns in (grey in cathodoluminescence images) 'lacy', 'reticulate', 'porous' zircons (б), La–$(Sm/La)_n$ plot (в), U/Th–Yb diagram for zircon discrimination [29]. The grey field indicates the range of typical zircon compositions according to [30] (г), εHf(t)–Age (Ma) diagram – age (Ma) of dated zircons (д).

U-Pb системы, с другой – рассматриваться как специфичность таких малоисследованных цирконов, типичных для многих редкометалльных пород, кристаллизующихся из флюидонасыщенной магмы. Температуры кристаллизации циркона, рассчитанные по содержанию титана, не корректные из-за высокого содержания в цирконах Fe. Температура кристаллизации пород, рассчитанная по параметру M, составила 790–677° C [28]. Значения изотопного состава гафния циркона положительные (εHf – +0,38 до +6,8) и указывают на мантийный источник. Рассчитанный модельный возраст T_{DM2} показывает, что в плавление вовлекался материал с возрастом 1,11–0,82 млн лет.

Проведенные исследования показали, что исследованные аляскиты являются более молодым импульсом внедрения расплава гранитного состава из более глубинного ювенильного источника, оторванного по времени на 150 млн лет и генетически не связанного с породами, слагающими основную часть массива. Аляскиты кристаллизовались из сильно фракционированных расплавов в верхнекоровых промежуточных очагах и именно поэтому отличаются специфической минералогией и геохимией.

Породы близки по возрасту к лейкогранитам, рассматриваемым в составе щелочного поньинского гипабиссального комплекса (монцогаббро-монцонитовый, небольшие штоки, линзообразные тела и дайки монцогаббродиоритов ($\mu\nu\delta C3$-P*pn*), монцодолеритов ($\mu\beta C_3$-P*pn*) и, возможно, сиенитов (эйситизированные) (ξC_3-P*pn*), кварцевых сиенитов (ξC_3-P*pn*), граносиенитов ($\gamma\xi C_3$-P*pn*), умереннощелочных лейкогранитов ($\varepsilon l\gamma C_3$-P*pn)* [1].

Таблица 6

Содержания редкоземельных элементов, гафния, железа и титана (г/т) и температуры кристаллизации при 1,0/0,7 (°С) в исследованных цирконах

Table 6

Contents of rare-earth elements, hafnium, iron and titanium (g/t) and crystallization temperatures at 1.0/0.7 (°C) in the studied zircons

Т.н.	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er	Yb	Y	Hf	Fe	^{48}Ti	^{49}Ti	T[1]
Серые на катодолюминесцентных изображениях															
6,1	7,83	27	1,8	1,2	0,09	9	75	268	1022	1377	13421	1638	50,0	48,6	1023
10,1	17,19	31	4,0	2,9	0,28	11	74	310	1255	1356	14199	12609	9,3	9,1	809
4,1	21,00	58	3,9	2,7	0,18	15	106	333	1001	1457	15064	2608	21,1	20,6	904
5,1	9,37	46	4,7	4,8	0,40	24	147	393	1231	2080	14430	1559	13,7	13,2	852
12,1	6,65	35	2,0	1,4	0,14	5	41	161	783	551	20138	1368	26,6	26,8	934
11,1	10,84	21	3,3	1,6	0,13	6	46	188	883	658	24686	2885	15,3	14,6	865
Черные на катодолюминесцентных изображениях															
3,1	4,01	49	1,7	2,5	0,14	19	136	417	1256	2242	10740	936	28,9	29,2	945
7,1	7,95	68	7,4	6,3	0,58	23	127	325	966	1655	14974	1850	67,2	68,9	1070
1,1	27,63	160	5,4	3,3	0,14	28	209	582	1405	3166	12082	**381**	21,1	20,7	**904**
Ксеногенные (соответствуют возрасту гранитоидов I и II фаз массива Маньхамбо)															
8,1	0,39	57	0,6	1,7	0,30	22	128	276	563	1598	10121	**65**	9,0	8,8	806
9,1	1,58	64	1,0	2,9	0,29	32	175	379	705	2230	10370	**252**	10,3	10,7	820
Ксеногенные															
2,1	4,20	52	29,4	20,4	7,88	53	101	136	254	820	10778	**109**	19,5	19,2	894

Таблица 7

Изотопный состав Lu-Hf, εHf и рассчетные значения T_{DM2} в цирконах массива Маньхамбо

Table 7

Isotopic composition of Lu-Hf, εHf and calculated T_{DM2} values in zircons of the Mankhambo massif

Точка	Возраст,млн лет	^{176}Yb/^{177}Hf	1σ	^{176}Lu/^{177}Hf	1σ	^{176}Hf/^{177}Hf	1σ	εHf(t)	T_{DM} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{Lu/Hf}$
3.1	329	0,07006	0,00025	0,00342	0,00001	0,28272	0,00002	4,57	0,81	0,90	-0,90
4.1	336	0,07045	0,00060	0,00300	0,00002	0,28263	0,00002	1,63	0,93	1,06	-0,91
5.1	339	0,05872	0,00013	0,00282	0,00000	0,28266	0,00002	2,95	0,88	1,00	-0,91
10.1	324	0,07892	0,00058	0,00316	0,00001	0,28260	0,00003	0,38	0,98	1,11	-0,90
11.1	373	0,02620	0,00014	0,00134	0,00000	0,28262	0,00001	2,56	0,90	1,04	-0,96
12.1	372	0,02882	0,00005	0,00155	0,00000	0,28274	0,00001	6,80	0,73	0,82	-0,95

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Пучков, В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении) / В. Н. Пучков. – Уфа, 2010. – 280 с.
2. Estrada S. Insights into magmatic and geotectonic history of the Voikar Massif, Polar Urals / F. Henjes-Kunst, K-P. Burgath, N. W. Roland, F. Schafer, E. N. Khain, D. N. Remizov Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften. – 2012. – V163. – №1. – С. 9–41. https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009
3. Петров, О. В. Геологическая карта России и прилегающих акваторий масштаба 1:2500000 / А. Ф. Морозов, Т. В. Чепкасова [и др.]. ФГБУ «ВСЕГЕИ». Роснедра. 2016.
4. Душин, В. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 (издание второе). Серия Северо-Уральская. Лист P-40-VI (г. Тельпос-Из). Объяснительная записка / В. А. Душин, О. П. Сердюкова, А. А. Малюгин [и др.]. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2018. – 216 с.
5. Махлаев, Л. В. Гранитоиды севера Центрально-Уральского поднятия (Полярный и Приполярный Урал): монография / Л. В. Махлаев. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 150 с.
6. Удоратина, О. В. Петрология пород Ильяизского массива (Северный Урал) / О. В. Удоратина, А. А. Соболева, Н. С. Дорохов [и др.] // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана (Труды Института геологии Коми научного центра Российской АН). – 2003. – Вып. 113. – С. 54–74.
7. Удоратина, О. В. Возраст гранитоидов массивов Маньхамбовского и Ильяизского массивов (Северный Урал): U-Pb данные / О. В. Удоратина, А. А. Соболева, Н. А. Кузенков [и др.] // Доклады Академии наук (ДАН). – 2006. – Т. 406, № 6. – С. 810–815.
8. Удоратина, О. В. Гранитоиды севера Урала: геохронология, эволюция, источники / О. В. Удоратина, К. В. Куликова, А. С. Шуйский [и др.]. – Сыктывкар, 2022. – 125 с. – URL: https://doi.org/10.19110/98491-044.
9. Удоратина, О. В. U-Pb возраст цирконов гранитной гальки из отложений, перекрывающих массив Маньхамбо (Северный Урал) / О. В. Удоратина, А. Н. Ла-

рионов, Н. Ю. Никулова // Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы. ИГГД РАН. – СПб.: Sprinter, 2015. – С. 312–313.
10. Удоратина, О. В. Возраст рудных метапесчаников (Маньхамбо, Северный Урал) / О. В. Удоратина, Н. Ю. Никулова, В. Б. Хубанов // Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов: материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии. – СПб., 2022. – С. 163–165.
11. Удоратина, О. В. Цирконы из осадочных отложений восточного контакта гранитного массива Маньхамбо (Северный Урал) / О. В. Удоратина, Н. Ю. Никулова, А. А. Павлова [и др.] // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2012. – № 6. – С. 2–8.
12. Щербин, С. С. Взаимоотношение разновозрастных гранитоидов с доордовикскими осадочно-метаморфическими породами в районе Мань-Хамбо на Приполярном Урале / С. С. Щербин // Магматизм, метаморфизм и оруденение в геологической истории Урала. – Свердловск, 1974. – С. 62–64.
13. Душин, В. А. Возраст и геодинамическая позиция гранитоидов маньхамбовского блока (Северный Урал): U-Pb и Sm-Nd изотопная систематика и геохимические ограничения / В. А. Душин, Ю. Л. Ронкин, О. П. Лепихина // Изотопные системы и время геологических процессов: материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии. – СПб.: ИП Каталкина, 2009. – Т. 1. – С. 172–174.
14. Калинин, Е. П. Новые данные о геологии и редкометалльной металлогении горных пород Урала в бассейне верхней Печоры / Е. П. Калинин, В. Н. Пучков // Тр. ИГ КФАН СССР. – Сыктывкар, 1968. – Вып. 9. – С. 49–60.
15. Бороздина, Г. М. О корреляции стратотипа хобеинской свиты и отложений в восточном контакте гранитного массива Мань-Хамбо / Г. М. Бороздина // ЕЖЕГОДНИК-2008. Тр. ИГГ УрО РАН. – Екатеринбург, 2009. – Вып. 156. – С. 57–59.
16. Удоратина, О. В. Минералогия и литохимия рудных метапесчаников, перекрывающих гранитный массив Мань-Хамбо (Северный Урал) / О. В. Удоратина, Н. Ю. Никулова, Д. А. Варламов // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2014. – № 4 (232). – С. 3–9.
17. Удоратина, О. В. Время формирования комплексных (радиоактивно-редкоземельно-редкометалльных) руд Маньхамбовского рудного района (Северный Урал) / О. В. Удоратина, В. А. Капитанова // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования: материалы Всероссийской конференции, посвященной 85-летию ИГЕМ РАН, Москва, 25–27 ноября 2015 г. – М.: ИГЕМ РАН, 2015. – С. 250–251.
18. Душин, В. А. Рифейский гранитный магматизм и металлогения Маньхамбовского блока / В. А. Душин, А. В. Фауст // Региональная геология и металлогения. – 2008. – № 35. – С. 25–33.
19. Калиновский, А. В. Редкометалльные комплексы Маньхамбовского металлогенического района на Северном Урале / А. В. Калиновский // Серия препринтов «Научные доклады» Коми НЦ УрО АН СССР. – Сыктывкар, 1990. – Вып. 228. – 24 с.
20. Андреичев, В. Л. Гранитоиды Большеземельской зоны фундамента Печорской синеклизы: состав и U-Pb возраст / В. Л. Андреичев, А. А. Соболева, Е. Г. Довжикова [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 180–191. – URL: https://doi.org/10.15372/GiG2022125.
21. 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. – Vol. 30. – №. 10. – P. 1508–1513. (in Chinese with English abstract).
22. Юшкин, Н. П. Закономерности развития процессов редкометального рудогенеза в центральной зоне Приполярного Урала / Н. П. Юшкин, М. В. Фишман, Б. А. Голдин [и др.] // Современное состояние учения о месторождениях полезных ископаемых. – Ташкент, 1975. – С. 184 –189.
23. Петрографический кодекс России. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2008. – 200 с.
24. Wu, F. Highly fractionated granites: Recognition and research / F. Wu, X. Liu, W. Ji, // Science China Earth Sciences. – 2017. – Vol.60. – P. 1201–1219. https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1.
25. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contrib Mineral Petrol. – 1996, №123, – P. 323–333.
26. Удоратина, О. В. Аляскиты массива Маньхамбо / О. В. Удоратина, В. А. Жаренков // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента: Инф. мат-лы 8-й науч. конф. Института геологии Коми НЦ УрО РАН, 8–9 декабря 1999 г. – Сыктывкар: Геопринт, 1999. – С. 192–198.
27. Grimes C. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere / B. E. John, M. J. Cheadle, F. K. Mazdab, J. L. Wooden, S. Swapp, J. J. Schwartz // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2009. – Vol. 158. – P. 757–783. https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2
28. Watson E. B. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types / M. Harrison. Earth Planet Sci Lett. 1983. – № 64. – P. 295–304.
29. Breiter K. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites / C. N. Lamarão, R. M. K. Borges, R. Dall'Agnol // Lithos. – 2014. – P. 208–225. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.004
30. Hoskin P. W. O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator / T. R. Ireland. // Geology. – 2000. №28. – P. 627–630.

References

1. Puchkov, V. N. Geologiya Urala i Priural'ya (aktual'nyye voprosy stratigrafii, tektoniki, geodnamiki i metallogenii) [Geology of the Urals and the Cis-Urals (current issues

of stratigraphy, tectonics, geodynamics, and metallogeny)]. – Ufa: Design Polygraph Service, 2010. – 280 p.
2. Estrada, S. Insights into 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. – Vol. 163, №1. – C. 9–41. https://doi.org/10.1127/1860-1804/2012/0163-0009.
3. Petrov, O. V. Geologicheskaya karta Rossii i prilegayushchikh akvatoriy masshtaba 1:2 500 000 [Geological map of Russia and adjacent water areas, scale 1:2,500,000] / O. V. Petrov, A. F. Morozov, T. V. Chepkasova [et al.]. –VSEGEI. Rosnedra, 2016.
4. Dushin, V. A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1:200 000. Seriya Severo-Ural'skaya. List P-40-VI (g. Telpos-Iz). Obyasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation 1:200,000. North-Ural series. Sheet P-40-VI (Telpoz-Iz mountain). Explanatory note] / V. A. Dushin, O. P. Serdyukova, A. A. Malyugin [et al.]. – SPb: VSEGEI, 2018. – 216 p.
5. Makhlaev, L. V. Granitoidy severa Tsentral'no-Ural'skogo podnyatiya (Polyarnyy i Pripolyarnyy Ural) [Granitoids of the north of the Central Ural uplift (Polar and Subpolar Urals)] / L. V. Makhlayev. – Ekaterinburg: UB RAS, 1996. – 150 p.
6. Udoratina, O. V. Petrologiya porod Il'yaizskogo massiva (Severnyy Ural) [Petrology of rocks of the Ilyaiz massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, A. A. Soboleva, N. S. Dorokhov [et al.] // Petrologiya i mineralogiya severa Urala i Timana [Petrology and Mineralogy of the North of the Urals and Timan] (Proceedings of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences). – Syktyvkar, 2003. – Iss. 113. – P. 54–74.
7. Udoratina, O. V. Vozrast granitoidov massivov Man'khambovskogo i Il'yaizskogo massivov (Severnyy Ural): U-Pb dannyye [Age of granitoids of the Mankhambovsky and Ilyaiz massifs (Northern Urals): U-Pb data] / O. V. Udoratina, A. A. Soboleva, N. A. Kuzenkov [et al.] // Reports of the Russian Academy of Sciences. – 2006. – Vol. 406. – № 6. – P. 810–815.
8. 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. Shuysky [et al.]. – Syktyvkar, 2022. – 125 p. – https://doi.org/10.19110/98491-044.
9. Udoratina, O. V. U-Pb vozrast tsirkonov granitnoy gal'ki iz otlozheniy perekryvayushchikh massiv Man'khambo (Severnyy Ural) [U-Pb age of zircons of granite pebbles from sediments overlying the Mankhambo massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, A. N. Larionov, N. Yu. Nikulova // Izotopnoe datirovanie geologicheskih processov: novye rezultaty, podhody i perspektivy [Isotope Dating of Geological Processes: New Results, Approaches and Prospects]. – IGGD RAS. – SPb: Sprinter, 2015. – P. 312–313.
10. Udoratina, O. V. Vozrast rudnykh metapeschanikov (Man'khambo, Severnyy Ural) [Age of ore metasandstones (Mankhambo, Northern Urals)] / O. V. Udoratina, N. Yu. Nikulova, V. B. Khubanov // Vozrast i korrelyaciya magmaticheskih, metamorficheskih, osadochnyh i rudoobrazuyushchih processov [Age and Correlation of Magmatic, Metamorphic, Sedimentary and Ore-Forming Processes]: Materials of the VIII Russ. Conf. on Isotope Geochronology. – SPb, 2022. – P. 163–165.
11. Udoratina, O. V. Tsirkony iz osadochnykh otlozheniy vostochnogo kontakta granitnogo massiva Man'khambo (Severnyy Ural) [Zircons from sedimentary deposits of the eastern contact of the Mankhambo granite massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, N. Yu. Nikulova, A. A. Pavlova [et al.] // Bulletin of the Institute of Geology Komi SC UB RAS. – 2012. – № 6. – P. 2–8.
12. Shcherbin, S. S. Vzaimootnosheniye raznovozrastnykh granitoidov s doordovikskimi osadochno-metamorficheskimi porodami v rayone Man'-Khambo na Pripolyarnom Urale [The relationship of different-age granitoids with the pre-Ordovician sedimentary-metamorphic rocks in the Man-Khambo region of the Subpolar Urals] / S. S. Shcherbin // Magmatizm, metamorfizm i orudenenie v geologicheskoj istorii Urala [Magmatism, Metamorphism and Mineralization in the Geological History of the Urals]. – Sverdlovsk, 1974. – P. 62–64.
13. Dushin, V. A. Vozrast i geodinamicheskaya pozitsiya granitoidov man'khambovskogo bloka (Severnyy Ural): U-Pb i Sm-Nd izotopnaya sistematika i geokhimicheskiye ogranicheniya [Age and geodynamic position of granitoids of the Mankhamba block (Northern Urals): U-Pb and Sm-Nd isotope systematics and geochemical restrictions] / V. A. Dushin, Yu. L. Ronkin, O. P. Lepikhina // Izotopnye sistemy i vremya geologicheskih processov [Isotopic Systems and Time of Geological Processes]: Materials of the IV Russ. Conf. on Isotope Geochronology. – SPb: IP Katalkina, 2009. – Vol. 1. – P. 172–174.
14. Kalinin, E. P. Novyye dannyye o geologii i redkometallnoy metallogenii gornykh porod Urala v basseyne verkhney Pechory [New data on the geology and rare metal metallogeny of Ural rocks in the upper Pechora basin] / E. P. Kalinin, V. N. Puchkov // Proceedings of the IG KFAS USSR. – Vol. 9. – Syktyvkar, 1968. – P. 49–60.
15. Borozdina, G. M. O korrelyatsii stratotipa khobeinskoy svity i otlozheniy v vostochnom kontakte granitnogo massiva Man'-Khambo [On the correlation of the stratotype of the Khobein formation and sediments in the eastern contact of the Man-Khambo granite massif] / G. M. Borozdina // YEARBOOK-2008. Proceedings of the Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS. – Ekaterinburg, 2009. – Iss. 156 – P. 57–59.
16. Udoratina, O. V. Mineralogiya i litokhimiya rudnykh metapeschanikov, perekryvayushchikh granitnyy massiv Man'-Khambo (Severnyy Ural) [Mineralogy and lithochemistry of ore metasandstones overlying the Man-Khambo granite massif (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, N. YU. Nikulova, D. A. Varlamov // Bulletin of the Institute of Geology of the Komi SC UB RAS. – 2014. – № 4 (232). – P. 3–9.
17. Udoratina, O. V. Vremya formirovaniya kompleksnykh (radioaktivno-redkozemel'no-redkometall'nykh) rud

Man'khambovskogo rudnogo rayona (Severnyy Ural) [Formation time of complex (radioactive-rare earth-rare metal) ores of the Mankhambovsky ore district (Northern Urals)] / O. V. Udoratina, V. A. Kapitanova // Mestorozhdeniya strategicheskih metallov: zakonomernosti razmeshcheniya, istochniki veshchestva, usloviya i mekhanizmy obrazovaniya [Deposits of Strategic Metals: Location Patterns, Matter Sources, Formation Conditions and Mechanisms]. All-Russian Conf. dedicated to the 85th anniversary of IGEM RAS. – Moscow, November 25–27, 2015. – P. 250–251.
18. Dushin, V. A. Rifeyskiy granitnyy magmatizm i metallogeniya Man'khambovskogo bloka [Riphean granite magmatism and metallogeny of the Mankhambovsky block] / V. A. Dushin, A. V. Faust // Regional'naya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2008. – № 35. – P. 25–33.
19. Kalinovsky, A. V. Redkometall'nye kompleksy Man'khambovskogo metallogenicheskogo rayona na Severnom Urale [Rare metal complexes of the Mankhambovsky metallogenic region in the Northern Urals] / A. V. Kalinovsky // Series of preprints 'Scientific reports'. – Komi Science Centre UB USSR AS, 1990. – Vol. 228. – 24 p.
20. Andreichev, V. L. Granitoidy Bol'shezemel'skoy zony fundamenta Pechorskoy sineklizy: sostav i U-Pb vozrast [Granitoids of the Bolshezemelskaya zone of the basement of the Pechora syneclise: composition and U-Pb age] / V. L. Andreichev, A. A. Soboleva, E. G. Dovzhikova [et al.] // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 2023. – Vol. 64. – № 2. – P. 180–191. – https://doi.org/10.15372/GiG2022125.
21. Geng, J. Z. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-ICP-MS / J. Z. Geng, H. K. Li, J. Zhang [et al.] // Geological Bulletin of China. – 2011. – Vol. 30. – № 10. – P. 1508–1513.
22. Yushkin, N. P. Zakonomernosti razvitiya protsessov redkometallnogo rudogeneza v tsentralnoi zone Pripolyarnogo Urala [Development mechanisms of the rare metal rudogenesis processes in the central zone of the Subpolar Urals] / N. P. Yushkin, M. V. Fishman, B. A. Goldin [et al.] // Sovremennoe sostoyanie ucheniya o mestorozhdeniyakh poleznykh iskopaemykh [Current state of the science about mineral deposits]. – Tashkent, 1975. – P. 184–189.
23. Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskiye, metamorficheskiye, metasomaticheskiye, impaktnyye obrazovaniya. 2-ye izdaniye., pererabatano i dopolneno [Petrographic Code of Russia. Igneous, metamorphic, metasomatic, impact formations. 2nd edition, revised and expanded]. – SPb: VSEGEI Publishing House, 2008. – 200 p.
24. Wu, F. Highly fractionated granites: Recognition and research / F. Wu, X. Liu, W. Ji, // Science China Earth Sciences. – 2017. – Vol.60. – P. 1201–1219. https://doi.org/10.1007/s11430-016-5139-1.
25. Bau M. Controls on the fractionation of isovalent trace elements in magmatic and aqueous systems: evidence from Y/Ho, Zr/Hf, and lanthanide tetrad effect // Contrib Mineral Petrol. – 1996, №123, – P. 323–333.
26. Udoratina, O. V. Alyaskity massiva Mankhambo [Alaskaites of the Mankhambo massif] / O. V. Udoratina, V. A. Zharenkov // Struktura, veshchestvo, istoriya litosfery Timano-Severouralskogo segmenta [Structure, substance, history of the lithosphere of the Timan-Northern Ural segment]: Inf. Materials 8th Scientific. Conf. Institute of Geology, Komi SC UB RAS, December 8–9, 1999. – Syktyvkar: Geoprint, 1999. – P. 192–198.
27. Grimes, C. On the occurrence, trace element geochemistry, and crystallization history of zircon from in situ ocean lithosphere / C. Grimes. B. E. John, M. J. Cheadle [et al.] // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2009. – Vol. 158. – P. 757–783. https://doi.org/10.1007/s00410-009-0409-2.
28. Watson, E. B. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types / E. B. Watson, T. M. Harrison // Earth and Planetary Science Letters. – 1983. – № 64 (2). – P. 295-304.
29. Breiter, K. Chemical characteristics of zircon from A-type granites and comparison to zircon of S-type granites / K. Breiter, C. N. Lamarão, R. M. K. Borges [et al.] // Lithos. – 2014. – P. 208–225. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.004.
30. Hoskin, P. W. O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator / P. W. O. Hoskin, T. R. Ireland // Geology. – 2000, № 28. – P. 627–630.

Благодарность (госзадание):

Авторы выражают огромную благодарность Мэту Коблу (Стэнфордский Университет, США) за совместные U-Pb SIMS исследования единичных цирконов. Исследования проведены по теме НИР «Глубинное строение, геодинамическая эволюция, взаимодействие геосфер, магматизм, метаморфизм и изотопная геохронология Тимано-Североуральского литосферного сегмента» 122040600012-2.

Acknowledgements (state task)

The authors are very grateful to Mat Coble (Stanford University, USA) for joint U-Pb SIMS studies of single zircons. The works were carried out in frames of the research programme 'Deep structure, geodynamic evolution, geosphere interaction, magmatism, metamorphism, and isotopic geochronology of the Timan-Northern Urals lithospheric segment' 122040600012–2.

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, http://orcid.org/0000-0001-9956-6271 (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: taykey@yandex.ru).

Шуйский Александр Сергеевич – младший научный сотрудник Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук; http://orcid.org/0000-0002-6928-9354 (167982, Российская Федерация, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: self88@yandex.ru).

About the authors:

Oksana V. Udoratina – Candidate 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; ORCID 0000-0001-9956-6271 (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: udoratina@geo.komisc.ru).

Aleksander S. Shuisky – Junior Researcher, Institute of Geology named after academician N. P. Yushkin, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; ORCID 0000-0002-6928-9354 (54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: self88@yandex.ru).

Для цитирования:

Удоратина, О. В. Редкометалльные аляскиты массива Маньхамбо (Северный Урал): U-Pb (SIMS) данные и изотопно-геохимические характеристики / О. В. Удоратина, А. С. Шуйский // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 53–67.

For citation:

Udoratina, O. V. Redkometallnye alyaskity massiva Manhambo (Severnyj Ural): U-Pb (SIMS) dannye i izotopno-geohimicheskie harakteristiki [Rare-metal alaskites of the Mankhambo massif (Northern Urals): U-Pb (SIMS) data and isotope-geochemical characteristics] / O. V. Udoratina, A. S. Shuisky // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 53–67.

Дата поступления статьи: 05.03.2025
Прошла рецензирование: 10.03.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 05.03.2025
Reviewed: 10.03.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 563.12+551.763.1(571.51/.52)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-68-77

Фораминиферы нижнего мела севера Средней Сибири (Центральный Таймыр и низовья реки Оленек): биостратиграфический и биофациальный анализы

С. Н. Хафаева

Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск

khafaevasn@ipgg.sbras.ru

Аннотация

На основе анализа распределения фораминифер в разрезах нижнего мела скважины Луктахская-4 (Центральный Таймыр) и естественных выходах в низовьях р. Оленек установлена последовательность из пяти биостратонов: зона Gaudryina gerkei, Trochammina rosaceaformis (KF1, средняя часть бореального берриаса); зона Valanginella tatarica, Recurvoides obskiensis (KF2, верхи бореального берриаса – валанжин); зона Cribrostomoides infracretaceous, Cribrostomoides sinuosus (KF4, верхняя часть нижнего валанжина – низы готерива); слои с *Cribrostomoides concavoides, Trochammina gyroidiniformis* (KF5, нижняя часть готерива) (биостратоны по фораминиферам по [1, 2]).

Представлены результаты биофациального исследования раннемелового бассейна на севере Средней Сибири. Реконструированы сообщества фораминифер бореального берриаса ([1], =рязанский ярус [3]), валанжина и нижней части готерива Енисей-Хатангского пролива (Центральный Таймыр) и южной окраины Северо-Сибирского моря (низовья р. Оленек), выявлены основные закономерности их развития, определена последовательность биономических зон.

Ключевые слова:

бореальный берриас, валанжин, готерив, сообщества, ассоциации, фораминиферы, Средняя Сибирь

Lower Cretaceous foraminifera of the northern part of Middle Siberia (Central Taimyr and lower reaches of the Olenek River): biostratigraphic and biofacies analyses

S. N. Khafaeva

Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

khafaevasn@ipgg.sbras.ru

Abstract

By the analysis of foraminifera distribution in the Lower Cretaceous sections of the Luktakhskaya-4 well (Central Taimyr) and natural outcrops in the lower reaches of the Olenek River, we identified a sequence of five biostratons: *G*audryina gerkei, Trochammina rosaceaformis zone (KF1, middle Boreal Berriasian); Valanginella tatarica, Recurvoides obskiensis zone (KF2, uppermost Boreal Berriasian – Valanginian); Cribrostomoides infracretaceous, Cribrostomoides sinuosus zone (KF4, upper Lower Valanginian – lowermost Hauterivian); beds with *Cribrostomoides concavoides, Trochammina gyroidiniformis* (KF5, lower Hauterivian) (based on [1, 2]).

The paper presents the biofacial study results of the Early Cretaceous basin in the northern part of Central Siberia. The authors reconstructed foraminifer communities of the Boreal Berriasian ([1], =Ryazanian stage [3]), Valanginian and lower part of the Hauterivian of the Enisei-Khatanga Strait (Central Taimyr), and the southern end of the North Siberian Sea (lower reaches of the Olenek River). Their evolution mechanisms were discovered. The succession of bionamic zones was determined.

Keywords:

Boreal Berriasian, Valanginian, Hauterivian, communities, associations, foraminifers, Central Siberia

Распределение фораминифер, их таксономический состав и структура ассоциаций существенно зависят от многих абиотических факторов, колебание каждого из которых вызывает ответные изменения в составе и структуре сообществ [4, 5 и др.]. Их способность реагировать на изменение внешних условий может быть использована в качестве показателей среды обитания. Изучение закономерностей биономической дифференциации ассоциаций микробентоса является важным аспектом при решении задач межрегиональной корреляции разнофациальных отложений, а также для корректных палеогеографических построений.

В ранних работах, посвященных изучению закономерностей дифференциации меловых палеоценозов фораминифер Сибири в зависимости от их географического распространения, восстановления условий существования, фациальные реконструкции основывались, в основном, на данных литологии и геохимии. Палеонтологические данные привлекались, главным образом, для выяснения характера связей между бассейнами, а также условий обитания микробентоса (глубина, температура, соленость и др.) [5, 6 и др.]. В последнее время фораминиферы с успехом применяются при биофациальных, палеоэкологических исследованиях и палеогеографических рекон-

струкциях нефтегазоносных мезозойских бассейнов [7–9 и др.]. В ряде работ для палеогеографических и фациальных реконструкций юрских и меловых бассейнов применяется анализ катен макро- и микробентоса, основанный на комплексном использовании литолого-палеоэкологических данных [8, 10–13 и др.].

Интерес геологов к изучению разрезов севера Сибири не ослабевает до сих пор, поскольку осадочные толщи мезозоя данного региона содержат значительные запасы углеводородов и других полезных ископаемых. В последнее время получены новые материалы по биостратиграфии нижнего мела Центрального Таймыра и волжско-валанжинского разреза по р. Оленек [14–18].

В настоящей работе приведены результаты биофациального исследования бореального берриаса (=рязанский ярус) – раннего готерива Центрального Таймыра и нижнего течения р. Оленек.

Материалы и методы

Материалом для стратиграфического и биофациального исследований послужили коллекции фораминифер нижнего мела, полученные в результате обработки образцов из бореального берриаса – готерива скважины Луктахская-4 (Центральный Таймыр, сборы Б. Л. Никитенко, Л. А. Глинских, 2003) и естественных выходов на р. Оленек (обнажения О-14, О-15, сборы Б. Л. Никитенко, 2009, 2010) (рис. 1). Всего было изучено 80 образцов, насчитывающих несколько тысяч раковин фораминифер хорошей и удовлетворительной сохранности.

При биостратиграфических исследованиях изучали стратиграфическое распределение таксонов, фиксировали состав комплексов фораминифер, определяли последовательности и границы вертикального распределения сообществ микробентоса. Как дополнительный признак при расчленении и корреляции использовали особенности изменений таксономического разнообразия и структуры сообществ фораминифер [8, 19, 20 и др.]. Установленные биостратоны рассматривали как зоны комплексного обо-



Рисунок 1. Схема расположения изученных разрезов нижнего мела.
Figure 1. Location scheme of the studied sections of the Lower Cretaceous.

снования, зоны совместного распространения, акмезоны. Границы выделяемых зон, преимущественно нижние, проводили по появлению или массовому распространению отдельных таксонов, комплексов фораминифер [19, 20 и др.]. При корреляции разрезов сопоставление осуществляли путем соотнесения последовательности биостратонов одного района (разреза) с последовательностью биостратонов другого района (разреза), а не конкретной зоны с зоной [8, 10, 21 и др.].

Распределение фораминифер в мезозойских морях было неравномерным и определялось их дифференциацией по биономическим зонам. Выделение биономических зон и их частей проводили путем реконструкции последовательности бентосных сообществ и последующего катенного анализа [8, 10–13 и др.]. При изучении сообществ микробентоса учитывали палеоэкологические особенности родов фораминифер, строили циклограммы таксономического разнообразия, характеризирующие количественные показатели частоты встречаемости каждого рода в образце, при этом использовали семибалльную шкалу [22] с последующим пересчетом их процентного соотношения, устанавливали доминирующие таксоны для отдельных временных срезов. Изучали рекуррентные смены ассоциаций фораминифер в конкретных разрезах и сравнивали синхронные территориально разобщенные ориктоценозы из разнофациальных разрезов. Под сообществом понимается группа биоценозов, наиболее характерных в определенный промежуток времени для конкретной биономической зоны и имеющих одинаковый состав доминирующих групп [8, 10, 11 и др.].

Стратиграфия

На севере Средней Сибири на изученной территории нижнемеловые морские толщи представлены нижнехетской, суходудинской, буолкалахской и иэдэсской свитами [23, 24].

Нижнехетская свита (верхняя часть бореального берриаса – низы валанжина) на территории Центрального Таймыра представляет собой переслаивание темно-серых, серых алевролитов, алевролитов глинистых, песчаников мелкозернистых, интервал – 817–811,9 м в скважине Луктахская-4 (рис. 2). В изученном интервале, в свите встречены фораминиферы зоны Gaudryina gerkei, Trochammina rosaceaformis (KF1, средняя часть бореального берриаса) (рис. 2).

Стратиграфически выше залегают алевролитово-глинистые, алевролитово-песчаные, песчаные образования суходудинской свиты (валанжин – нижняя часть готерива) (интервал – 797,8–687 м). На изученной территории нижние и средние горизонты свиты охарактеризованы нерасчлененными слоями с комплексами фораминифер зон Valanginella tatarica, Recurvoides obskiensis (KF2, верхи бореального берриаса – валанжин) и Cribrostomoides infracretaceous, Cribrostomoides sinuosus (KF4, верхняя часть нижнего валанжина – основание

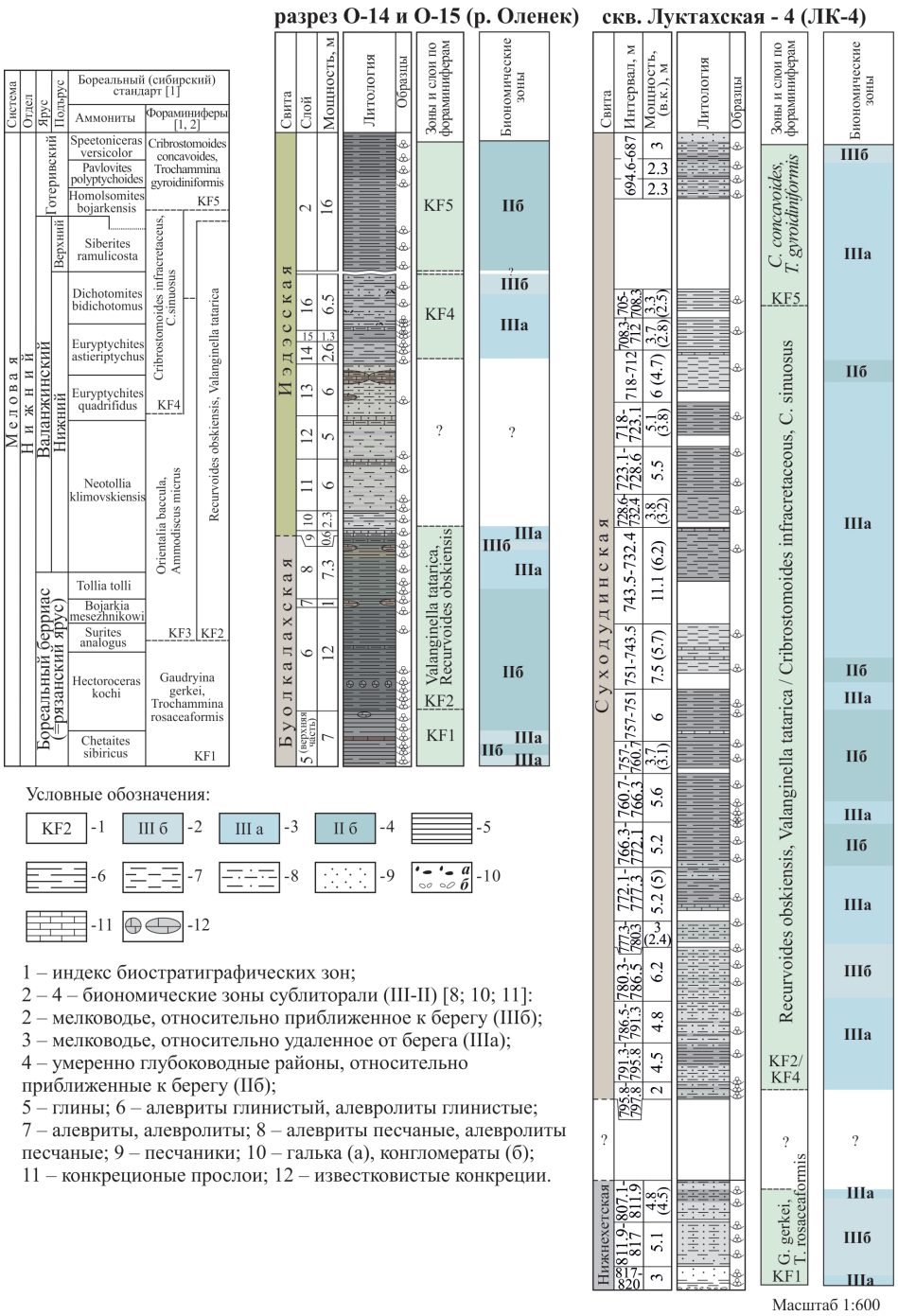


Рисунок 2. Литологическая [15], биостратиграфическая и биофациальная характеристики бореального берриаса – нижней части готерива низовья реки Оленек Центрального Таймыра.

Figure 2. Lithological [15], biostratigraphic and biofacies characteristics of the Boreal Berriasian – lower part of the Hauterivian of the lower Olenek River of the Central Taimyr.

горизонтов крупных конкреций, сложенных плотным известковистым алевролитом. Изученные отложения охарактеризованы фораминиферами зон Gaudryina gerkei, Trochammina rosaceaformis (KF1, средняя часть бореального берриаса) и Valanginella tatarica, Recurvoides obskiensis (KF2, верхи бореального берриаса – валанжин) (рис. 2).

Иэдэсская свита (валанжин – нижний готерив) согласно перекрывает отложения буолкалахской свиты в естественных выходах, расположенных на левом (обнажение О-14, слои 9-16) и правом (обнажение О-15, слой 2) берегах р. Оленек [16–18] (см. рис. 1). На изученной территории свита представлена чередованием песчаников, алевролитов, алевролитов глинистых, с преобладанием песчанистых разностей. В толще отмечаются крупные конкреционные прослои известковистого алевролита, следы волновой деятельности, растительный обугленный детрит. В нижней части свиты встречены ассоциации фораминифер, характеризующие зону Valanginella tatarica, Recurvoides obskiensis (KF2, верхи бореального берриаса – валанжин). В средней части выделен комплекс фораминифер, отнесенный к зоне Cribrostomoides infracretaceous, Cribrostomoides sinuosus (KF4, верхняя часть нижнего валанжина – основание готерива). В кровле иэдэсской свиты установлены слои с фораминиферами *Cribrostomoides concavoides, Trochammina gyroidiniformis* (KF5, нижняя часть готерива) (рис. 2).

готерива). Выше по разрезу установлены слои с *Cribrostomoides concavoides, Trochammina gyroidiniformis* (KF5, нижняя часть готерива) (рис. 2).

Буолкалахская свита (волжский ярус – бореальный берриас) на исследуемой территории изучена из естественных выходов, расположенных на левом берегу р. Оленек (обнажение О-14) (см. рис. 1). К нижнемеловой части разреза относятся верхняя часть слоя 5, слои 6–8 [16–18] (рис. 2). Свита представлена глинистыми, алевритоглинистыми отложениями. В толще содержатся несколько

Сообщества фораминифер

В бореальном берриасе в прибрежной зоне Енисей-Хатангского пролива (район расположения скважины Луктахская-4, Центральный Таймыр [25, 26]) на песчаных, алевритистых грунтах обитали моновидовые сообщества эврибионтных агглютинирующих фораминифер рода

Ammodiscus (многие десятки – сотни экземпляров, 100 %) (биономическая зона IIIб) (рис. 2–4).

В мелководной, удаленной от берега части моря (биономическая зона IIIа) на алевритистых, алевритисто-глинистых грунтах существовали более разнообразные сообщества, состоящие из 3–5 родов (из 3–4 семейств), представленные агглютинирующими формами. Доминировали *Ammodiscus* (58–90 %), относительно многочисленными были представители родов *Haplophragmoides* (15), *Recurvoides* (5–13), в небольших количествах присутствовали *Gaudryina* (8), *Trochammina* (5–6 %) (рис. 2–4).

В это же время на южной окраине Северо-Сибирского моря (район нижнего течения р. Оленек [25, 26]) на илистых, алевритисто-илистых грунтах обитали сообщества микробентоса, состоящие из представителей 4–5 родов (из 3–4 семейств). Доминантами являлись известковые *Lenticulina* (34–59 %) и агглютинирующие *Evolutinella* (37–52 %). В небольших количествах присутствовали *Recurvoides, Ammodiscus, Trochammina и Saracenaria* (2–5 %). Такие ассоциации фораминифер характерны для мелководной, удаленной от берега части моря (биономическая зона IIIа) (рис. 2, 3, 5).

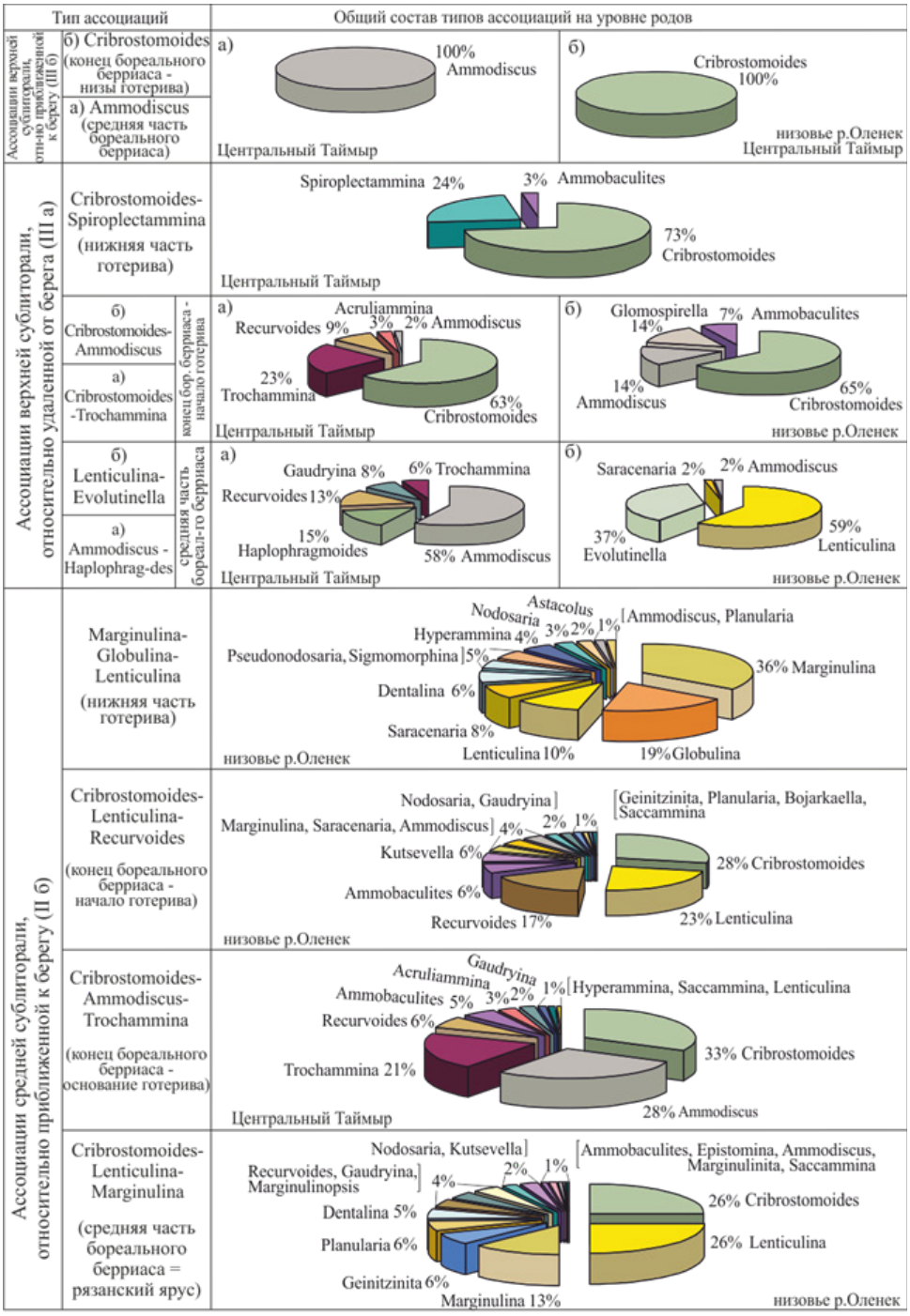


Рисунок 3. Типы ассоциаций фораминифер.
Figure 3. Types of foraminifer associations.

В умеренно-глубоководной, относительно приближенной к берегу зоне Северо-Сибирского моря (биономическая зона IIб) на глинистых грунтах существовали сообщества фораминифер, отличающиеся высоким таксономическим разнообразием (10–16 родов из 6-9 семейств). Доминировали представители родов *Cribrostomoides* (24–50 %), *Lenticulina* (26–32), субдоминантами являлись *Marginulina* (14–16 %). Остальные формы присутствовали в небольшом количестве (1–6 %): представлены известковыми родами *Geinitzinita, Planularia, Dentalina, Marginulinopsis, Nodosaria, Epistomina, Marginulinita, Marginulina, Saracenaria и* агглютинирующими *Recurvoides, Gaudryina, Kutsevella, Ammobaculites, Ammodiscus, Saccammina* (рис. 2, 3, 5).

В конце бореального берриаса – начале готерива на территории Енисей-Хатангского пролива (Центрального Таймыра) и Северо-Сибирского моря (район нижнего течения р. Оленек) на алевритистых, алеврито-песчанистых грунтах обитали моновидовые сообщества агглютинирующих фораминифер рода *Cribrostomoides*, характерные для прибрежно-мелководной зоны моря (биономическая зона IIIб) (рис. 2–5).

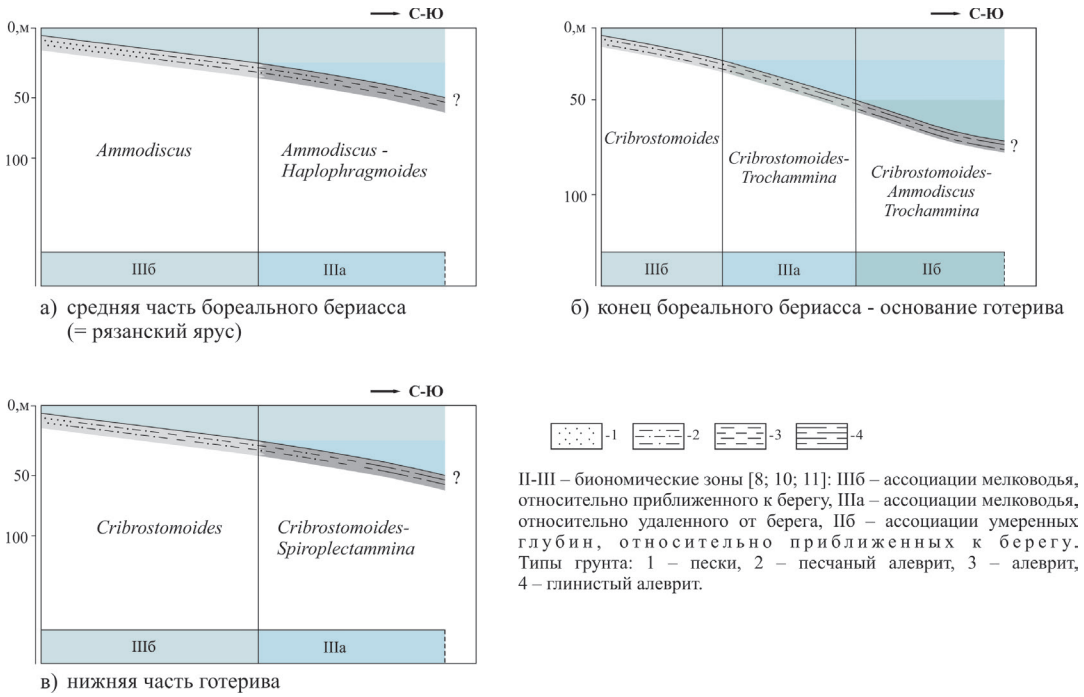


Рисунок 4. Принципиальная схема распределения ассоциаций фораминифер на батиметрическом профиле Енисей-Хатангского пролива в раннем мелу.

Figure 4. Principal distribution scheme of foraminifer associations on the bathymetric profile of the Enisei-Khatanga Strait in the Early Cretaceous.

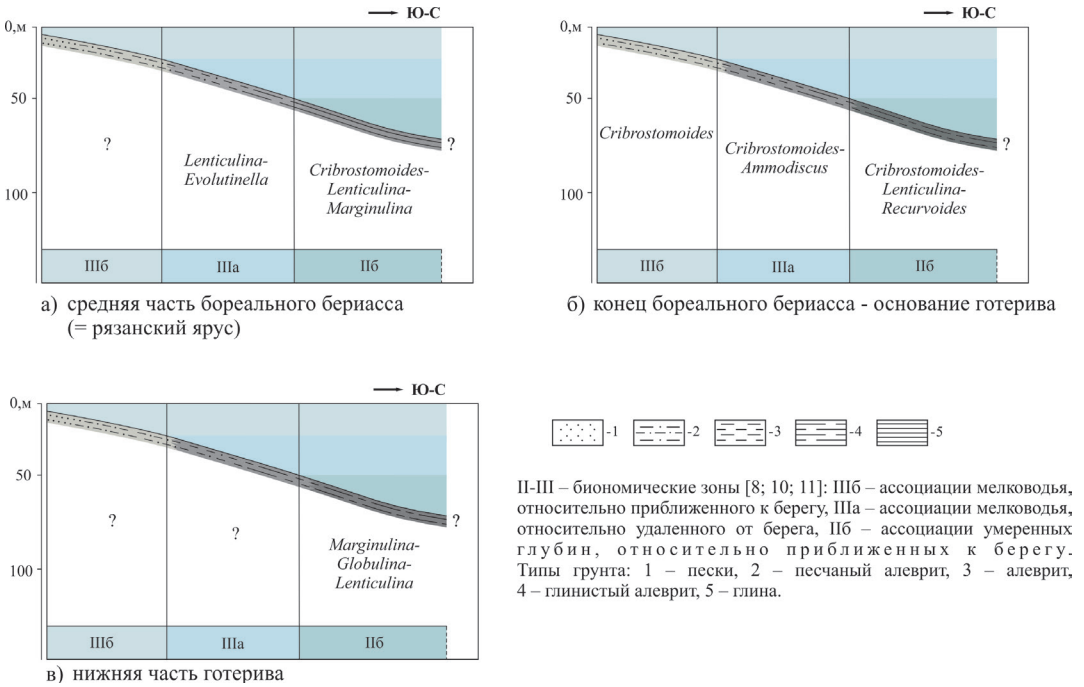


Рисунок 5. Принципиальная схема распределения ассоциаций фораминифер на батиметрическом профиле Северо-Сибирского моря в раннем мелу.

Figure 5. Principal distribution scheme of foraminifer associations on the bathymetric profile of the North-Siberian Sea in the Early Cretaceous.

С увеличением глубины и удалением от палеоберега таксономическое разнообразие микробентоса постепенно возрастало, сообщества фораминифер состояли из 2–5 родов (из 2–3 семейств). Такие ассоциации микробентоса свойственны для удаленной от берега прибрежно-мелководной зоны моря (биономическая зона IIIа).

Так, в Енисей-Хатангском проливе (Центральный Таймыр) в конце бореального берриаса – начале готерива в алевритисто-илистых грунтах удаленной от берега прибрежно-мелководной зоне моря в сообществах доминировали представители родов *Cribrostomoides* (до 61–84 %, реже – 47 %), *Recurvoides* (11–29), *Trochammina* (8–23). Существенная роль принадлежала агглютинирующим *Gaudryina* (14–25 %), *Ammobaculites* (2–13), *Ammodiscus* (2–15). Спорадически встречались *Bulbobaculites* (2), *Acruliammina* (1–8), *Spiroplectammina* (6) и известковые формы *Lenticulina* (3), *Globulina* (2 %) (см. рис. 2–4).

Сходные комплексы фораминифер мелководной, удаленной от берега зоны моря наблюдаются и в Северо-Сибирском море (район нижнего течения р. Оленек). Доми-

нантами, как и в прибрежной зоне Енисей-Хатангского пролива, являлись *Cribrostomoides* (14–92 %), *Recurvoides* (55-75), а также *Ammodiscus* (14-88 %). В подчиненном количестве спорадически присутствовали *Ammobaculites* (7-8 %), *Lagenammina* (4), *Hyperammina* (4), очень редко *Glomospirella* (14 %) (см. рис. 3).

Наиболее таксономически разнообразные сообщества фораминифер, включающие представителей 6–19 родов (из 5–9 семейств), были распространены в глинистых, глинисто-алевритистых породах, сформировавшихся в умеренно-глубоководной, относительно приближенной к берегу зоне моря (биономическая зона IIб).

В конце бореального берриаса – начале готерива в Енисей-Хатангском проливе (Центральный Таймыр) в сообществах доминировали представители агглютинирующих фораминифер *Cribrostomoides* (19–41 %), *Ammodiscus* (18–36), *Trochammina* (15–42 %). Субдоминантами являлись *Recurvoides* (4–16 %), *Acruliammina* (3–9 %). В небольшом количестве (1–5 %) присутствовали *Ammobaculites, Gaudryina, Hyperammina, Saccammina, Globulina, Lenticulina* и др. (рис. 2–4).

В Северо-Сибирском море (район нижнего течения р. Оленек) в комплексах микробентоса доминировали представители агглютинирующих форм *Cribrostomoides* (20-40 %), *Recurvoides* (7-29, иногда их доля увеличивалась до 55 %) и известковых *Lenticulina* (14-32 %). Значительная доля принадлежала известковым *Marginulina* (5-14 %) и агглютинирующим *Ammobaculites* (2–16), *Kutsevella* (5–12 %). Характерной чертой комплексов являлось высокое таксономическое разнообразие известковых фораминифер *Nodosaria, Gaudryina, Geinitzinita, Saracenaria, Dentalina, Bojarkaella, Marginulinopsis, Epistomina, Globulina, Planularia, Pseudonodosaria, Marginulinita* (1–6 %) (рис. 3, 5).

В раннем готериве на территории Енисей-Хатангского пролива (Центральный Таймыр) и Северо-Сибирского моря (район нижнего течения р. Оленек) продолжали накапливаться глинисто-алевритовые толщи.

В Енисей-Хатангском проливе (Центральный Таймыр) на алевритистых грунтах обитали моновидовые ассоциации агглютинирующих фораминифер *Cribrostomoides*, характеризующие прибрежные участки моря (биономическая зона IIIб). С увеличением глубины таксономическое разнообразие микробентоса постепенно возрастало. В сообществах роль *Cribrostomoides* снижалась (до 61-84 %, реже – 47 %) и нарастало представительство родов *Recurvoides* (11–29 %), *Trochammina* (8–23 %). Существенная роль принадлежала агглютинирующим родам *Gaudryina* (14–25 %), *Ammobaculites* (2–13), *Ammodiscus* (2–15). Спорадически встречались *Bulbobaculites* (2 %), *Acruliammina* (1-8), *Spiroplectammina* (6) и известковые формы *Lenticulina* (3), *Globulina* (2 %). Такие сообщества обитали на алевритисто-илистых грунтах удаленной от берега прибрежно-мелководной зоне моря (биономическая зона IIIа) (рис. 2–4).

В Северо-Сибирском море (район нижнего течения р. Оленек) на глинисто-алевритовых грунтах были распространены сообщества фораминифер, состоящие из 12–20 родов (из 5–10 семейств). Существенную роль здесь играли представители известковых родов, доминируя по количеству (до 90 %) и составу. Доминантами являлись *Marginulina* (15–36 %), *Globulina* (12–32), *Lenticulina* (10–15), существенную роль играли *Epistomina* (4–18), *Saracenaria* (2–8 %), агглютинирующие *Cribrostomoides* (4–7 %, иногда их роль увеличивалась до 29 %). В подчиненном количестве (4–6 %) присутствовали *Astacolus, Planularia, Nodosaria, Pseudonodosaria, Geinitzinita, Ichthyolaria, Sigmomorphina, Dentalina, Trochammina, Ammobaculites, Verneuilinoides, Ammodiscus, Glomospirella, Hyperammina*. Такие ассоциации характерны для зон умеренных глубин (биономическая зона IIб) (рис. 2, 3, 5).

Общий систематический состав фораминифер свидетельствует, что в течение бореального берриаса, валанжина и раннего готерива на территории Енисей-Хатангского пролива (Центрального Таймыра) и Северо-Сибирского моря (район нижнего теченья р. Оленек) существовал относительно мелководный морской бассейн. В большинстве случаев на изученной территории установлены ассоциации фораминифер, характерные для верхней сублиторали (см. рис. 2). На небольшие глубины палеобассейна указывают широкое развитие бентосных агглютинирующих фораминифер с толстостенной раковиной довольно крупных размеров, присутствие в ассоциациях небольшого количества известкового бентоса. В прибрежно-мелководной части моря, в условиях подвижной гидродинамики, обитали представители агглютинирующих родов *Ammodiscus, Cribrostomoides*, образовывающие практически моновидовые сообщества микробентоса. В мелководной зоне комплексы фораминифер немногочисленны, отличаются обедненным составом (2–4 рода из 2–3 семейств), среди встреченных здесь форм в изученных разрезах преобладают представители *Cribrostomoides, Ammodiscus, Lenticulina,* занимая в сообществах 60–80 %.

В приближенной к берегу умеренно глубоководной зоне моря сообщества фораминифер характеризуются высоким таксономическим разнообразием. В комплексах многочисленны *Ammodiscus, Cribrostomoides, Lenticulina, Marginulina,* становятся характерными *Recurvoides, Ammobaculites, Dentalina, Nodosaria, Epistomin*a и др. (см. рис. 3).

Заключение

На основе результатов анализа систематического состава и стратиграфического распространения фораминифер в керне скважины Луктахская-4 и из естественных выходов на р. Оленек установлены комплексы, характерные для нижнемеловых биостратонов по фораминиферам: зона Gaudryina gerkei, Trochammina rosaceaformis KF1, зона Valanginella tatarica, Recurvoides obskiensis KF2, зона Cribrostomoides infracretaceous, Cribrostomoides sinuosus KF4, слои с *Cribrostomoides concavoides, Trochammina gyroidiniformis* KF5.

По результатам анализа таксономического состава микробентоса выделены сообщества фораминифер раннего мела Енисей-Хатангского пролива (скв. Луктахская-4, Центральный Таймыр) и Северо-Сибирского моря

(низовья р. Оленек, обнажения О-14 и О-15), а также реконструированы ряды ассоциаций фораминифер, последовательно сменяющие друг друга по латерали от палеоберега к центральной части палеобассейна: характерные для верхней сублиторали, относительно приближенной к берегу (0–25 м, IIIб,); верхней сублиторали, относительно удаленной от берега (25–50 м, IIIа); средней сублиторали, относительно приближенной к берегу (50–75 м, IIб) (рис. 4, 5).

Изучение особенностей строения и структуры сообществ фораминифер раннего мела Енисей-Хатангского и Северо-Сибирского морских бассейнов позволило установить основные закономерности распределения микробентоса в зависимости от смены палеообстановок и трансгрессивно-регрессивных событий. Наиболее разнообразные ассоциации отмечаются на трансгрессивных и начале регрессивных этапах. Нестабильные обстановки ведут к чередованию сообществ с разными доминантами и субдоминантами.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Источники и литература

1. Никитенко, Б. Л. Стратиграфия юры и мела Анабарского района (Арктическая Сибирь, побережье моря Лаптевых) и бореальный зональный стандарт / Б. Л. Никитенко, Б. Н. Шурыгин, В. Г. Князев [и др.] // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, № 8. – С. 1047-1082.
2. Хафаева, С. Н. Фораминиферы, биостратиграфия и биофации нижнего мела севера Сибири: автореф. дис. … канд. геол.-минерал. наук / С. Н. Хафаева. – Новосибирск. – 2016. – 22 с.
3. Брагин, В. Ю. Новые данные по магнитостратиграфии пограничного юрско-мелового интервала п-ова Нордвик (север Восточной Сибири) / В. Ю. Брагин, О. С. Дзюба, А. Ю. Казанский [и др.] // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54, №3. – С. 438–455.
4. Саидова, Х. М. Бентосные фораминиферы Мирового океана (зональность и количественное распределение) / Х. М. Саидова. – М.: Наука, 1976. – 160 с.
5. Киприянова, Ф. В. Влияние абиотических факторов на организм и состав бентосных биоценозов (по литературным данным) / Ф. В. Киприянова, А. И. Лебедев // Экология юрской и меловой фауны Западно-Сибирской равнины. – Тюмень, 1981. – С. 14-22.
6. Басов, В. А. Комплексы фораминифер в различных фациальных обстановках юры и неокома в Енисей-Хатангском морском бассейне / В. А. Басов, М. Е. Каплан, Е. Г. Юдовный [и др.] // Геология и геофизика. – 1975. – Т. 16, №3. – С. 3–9.
7. Маринов, В. А. Биофациальный анализ верхнеюрских и нижнемеловых отложений центральных районов Западной Сибири / В. А. Маринов, С. В. Меледина, О. С. Дзюба [и др.] // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2006. – Т. 14, № 4. – С. 81-96.
8. Никитенко, Б. Л. Стратиграфия, палеобиогеография и биофации юры Сибири по микрофауне (фораминиферы и остракоды) / Б. Л. Никитенко. – Новосибирск: Параллель, 2009. – 680 с.
9. Алексеев, М. А. Фораминиферы и палеогеография юры Лено-Анабарского прогиба (Средняя Сибирь) / М. А. Алексеев // Региональная геология и металлогения. – 2014. – № 57. – С. 37–48.
10. Шурыгин, Б. Н. Биогеография, фации и стратиграфия нижней и средней юры Сибири по двустворчатым моллюскам / Б. Н. Шурыгин. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2005. – 154 с.
11. Палеогеография севера Сибири в юрском периоде / В. А. Захаров, М. С. Месежников, З. З. Ронкина [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1983. – Вып. 573. – 191 с.
12. Глинских, Л. А. Биономическая дифференциация ассоциаций фораминифер на севере Западно-Сибирского бассейна в ранней и средней юре / Л. А. Глинских // Юрская система России: проблемы стратиграфии и палеогеографии: Второе всероссийское совещание. – Ярославль: ЯГПУ, 2007. – С. 41-42.
13. Хафаева, С. Н. Особенности фациальной дифференциации сообществ фораминифер раннего мела (берриас-готерив) Усть-Енисейского бассейна / С. Н. Хафаева // Геология и геофизика. – 2014. – Т. 55, № 9. – С. 1404–1414.
14. Хафаева, С. Н. Фораминиферы и биостратиграфия нижнего мела разреза скважины Луктахская-4 (Центральный Таймыр) / С. Н. Хафаева // Меловая система России и ближнего зарубежья: проблемы стратиграфии и палеогеографии: материалы VI Всероссийского совещания. – Геленджик, 2012. – С. 305-306.
15. Никитенко, Б. Л. Предварительные данные по биостратиграфии и биофациям волжско-валанжинского разреза на р. Оленек (север Сибири) / Б. Л. Никитенко, Е. Б. Пещевицкая, С. Н. Хафаева [и др.] // Современная микропалеонтология: труды XV Всероссийского микропалеонтологического совещания. – М., 2012. – С. 19–21.
16. Никитенко, Б.Л. Стратиграфия волжско-валанжинского интервала в районе р. Оленек (север Сибири) / Б. Л. Никитенко, Е. Б. Пещевицкая, В. Г. Князев // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Геоэкология»: сб. материалов в 4-х т. – Новосибирск: СГГА, 2014. – Т. 1. – С. 104-108.
17. Nikitenko, B. L. High-resolution stratigraphy and palaeoenvironments of the Volgian-Valanginian in the Olenek key section (Anabar-Lena region, Arctic East Siberia, Russia) / B. L. Nikitenko, E. B. Pestchevitskaya, S. N. Khafaeva // Revue de Micropaleontologie. – 2018. – Vol. 61. – № 3–4. – P. 271–312.
18. Nikitenko, B. L. Stratigraphy and palaeoenvironments across the Jurassic- Cretaceous boundary in the reference section (Olenek River) for eastern regions of Laptev Sea area (Arctic Siberia, Russia) / B. L. Nikitenko, E. B. Pestchevitskaya, S. N. Khafaeva // Global Geology. – 2019. – Vol. 22. – № 4. – P. 270–279.

19. Степанов, Д. Л. Общая стратиграфия (Принципы и методы стратиграфических исследований) / Д. Л. Степанов, М. С. Месежников. – Ленинград: Недра, 1979. – 423 с.
20. Стратиграфический кодекс России. Издание третье / отв. ред. А. И. Жамойда. – СПб.: Издательство ВСЕГЕИ, 2006. – 96 с.
21. Шурыгин, Б. Н. Циркумбореальные реперные уровни нижней и средней юры (по последовательности биособытий в бентосе) / Б. Н. Шурыгин, Б. Л. Никитенко // Геодинамика и эволюция Земли: матер. к науч. конф. РФФИ. – Новосибирск: Издательство СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1996. – С. 187-192.
22. Опорный разрез верхнеюрских отложений бассейна р. Хеты (Хатангская впадина) / ред. В. Н. Сакс. – Ленинград: Наука, 1969. – 207 с.
23. Решения и труды Межведомственного совещания по доработке и уточнению унифицированной и корреляционной стратиграфических схем Западно-Сибирской низменности. Часть 1 / ред. Н. Н. Ростовцев. – Тюмень, 1969. – 143 с.
24. Решения 3-го Межведомственного регионального стратиграфического совещания по мезозою и кайнозою Средней Сибири / ред.: Н. Н. Ростовцев, В. Н. Сакс. – Новосибирск, 1981. – 91 с.
25. Сакс, В. Н. Палеогеография Хатангской впадины и прилегающих территорий на протяжении юрского и мелового периодов / В. Н. Сакс. – Ленинград: НИИГА, 1958. – Т. 85, вып. 9. – С. 70-89.
26. Захаров, В. А. Стратиграфические и палеогеографические предпосылки поисков нефти и газа в верхнеюрских-нижнемеловых осадочных толщах морского генезиса обрамления моря Лаптевых / В. А. Захаров, М. А. Рогов // Арктика: экология и экономика. – 2014. – № 4 (16). – С. 38–47.

References

1. Nikitenko, B. L. Stratigrafiya yury i mela Anabarskogo rayona (Arkticheskaya Sibir, poberezhye morya Laptevykh) i borealny zonalny standart [Jurassic and Cretaceous stratigraphy of the Anabar area (Arctic Siberia, Laptev Sea coast) and the boreal zonal standard] / B. L. Nikitenko, B. N. Shurygin, V. G. Knyazev [et al.] // Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]. – Novosibirsk. – 2013. – Vol. 54. – № 8. – P. 1047–1082.
2. Khafaeva, S. N. Foraminifery, biostratigrafiya i biofatsii nizhnego mela severa Sibiri [Foraminifera, biostratigraphy and biofacies of the Lower Cretaceous of northern Siberia]: extended abstract of Candidate's thesis (Geology and Mineralogy) / S. N. Khafaeva. – Novosibirsk. – 2016. – 22 p.
3. Bragin, V. Yu. Novyye dannyye po magnitostratigrafii pogranichnogo yursko-melovogo intervala p-ova Nordvik (sever Vostochnoy Sibiri) [New data on the magnetostratigraphy of the Jurassic-Cretaceous boundary interval, Nordvik Peninsula (northern East Siberia)] / V. Yu. Bragin, O. S. Dzyuba, A. Yu. Kazansky [et al.] // Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]. – Novosibirsk. – 2013. – Vol. 54. – № 3. – P. 438–455.
4. Saidova, Kh. M. Bentosnyye foraminifery Mirovogo okeana (zonalnost i kolichestvennoye raspredeleniye) [Benthic foraminifers of the World Ocean (zoning and quantitative distribution)] / Kh. M. Saidova. – Moscow: Nauka. – 1976. – 160 p.
5. Kipriyanova, F. V. Vliyaniye abioticheskikh faktorov na organizm i sostav bentosnykh biotsenozov (po literaturnym dannym) [The effect of abiotic factors on the organism and composition of benthic biocoenoses (from literature data)] / F. V. Kipriyanova, A. I. Lebedev // Ekologiya yurskoy i melovoy fauny Zapadno-Sibirskoy ravniny [Ecology of Jurassic and Cretaceous Fauna of the West Siberian Plain]. – Tyumen, 1981. – P. 14–22.
6. Basov, V. A. Kompleksy foraminifer v razlichnykh fatsial'nykh obstanovkakh yury i neokoma v Yenisey-Khatangskom morskom basseyne [Foraminifera assemblages of various Jurassic and Neocomian facial environment from the Yenisei-Khatanga marine basin] / V. A. Basov, M. E. Kaplan, E. G. Judovny [et al.] // Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]. – Novosibirsk. – 1975. – Vol. 16. – № 3. – P. 3–9.
7. Marinov, V. A. Biofatsialnyy analiz verkhneyurskikh i nizhnemelovykh otlozheniy tsentral'nykh rayonov Zapadnoy Sibiri [Biofacies analysis of Upper Jurassic and Lower Cretaceous deposits in the central regions of West Siberia] / V. A. Marinov, S. V. Meledina, O. S. Dzyuba [et al.] // Stratigrafiya. Geologicheskaya korrelyatsiya [Stratigraphy. Geological Correlation]. – 2006. – Vol. 14. – № 4. – P. 81–96.
8. Nikitenko, B. L. Stratigrafiya, paleobiogeografiya i biofatsii yury Sibiri po mikrofaune (foraminifery i ostrakody) [Jurassic stratigraphy, paleobiogeography, and biofacies of Siberia, based on microfauna (foraminifers and ostracods)] / B. L. Nikitenko. – Novosibirsk: Parallel, 2009. – 680 p.
9. Alekseev, M. A. Foraminifery i paleogeografiya yury Leno-Anabarskogo progiba (Srednyaya Sibir) [Foraminifera and paleogeography of the Jurassic Lena-Anabar trough (Central Siberia)] / M. A. Alekseev // Regionalnaya geologiya i metallogeniya [Regional Geology and Metallogeny]. – 2014. – № 57. – P. 37–48.
10. Shurygin, B. N. Biogeografiya, fatsii i stratigrafiya nizhney i sredney yury Sibiri po dvustvorchatym mollyuskam [Biogeography, facies, and stratigraphy of the Lower and Middle Jurassic of Siberia, based on bivalves] / B. N. Shurygin. – Novosibirsk: Academic publicity 'Geo'. – 2005. – 154 p.
11. Paleogeografiya severa Sibiri v yurskom periode [Paleogeography of northern Siberia in the Jurassic period] / V. A. Zaharov, M. S. Mesezhnikov, Z. Z. Ronkina [et al.]. – Novosibirsk: Nauka, 1983. – Vol. 573. – 191 p.
12. Glinskikh, L. A. Bionomicheskaya differentsiatsiya assotsiatsiy foraminifer na severe Zapadno-Sibirskogo basseyna v ranney i sredney yure [Bionomic differentiation of foraminifer associations in the north of the West Siberian basin in the Early and Middle Jurassic] / L. A.

Glinskikh // Yurskaya sistema Rossii: problemy stratigrafii i paleogeografii [Jurassic System of Russia: Issues of Stratigraphy and Paleogeography]: Second All-Russian Conference. – Yaroslavl: YaSPU, 2007. – P. 41–42.
13. Khafaeva, S. N. Osobennosti fatsialnoy differentsiatsii soobshchestv foraminifer rannego mela (berrias-goteriv) Ust-Yeniseyskogo basseyna [Specific facies differentiation of Early Cretaceous (Berriasian-Hauterivian) foraminifer communities in the Ust-Yenisei basin] / S. N. Khafaeva // Geologiya i Geofizika [Geology and Geophysics]. – Novosibirsk. – 2014. – Vol. 55, № 9. – P. 1404–1414.
14. Khafaeva, S. N. Foraminifery i biostratigrafiya nizhnego mela razreza skvazhiny Luktakhskaya-4 (Tsentralnyy Taymyr) [Foraminifera and biostratigraphy of the Lower Cretaceous section of the Luktakhskaya-4 well (Central Taimyr)] / S. N. Khafaeva // Melovaya sistema Rossii i blizhnego zarubezhya: problemy stratigrafii i paleogeografii [Cretaceous System of Russia and Neighboring Countries: Issues of Stratigraphy and Paleogeography]: Materials of the VI All-Russian Conference. – Gelendzhik. – 2012. – P. 305–306.
15. Nikitenko, B. L. Predvaritelnye dannyye po biostratigrafii i biofatsiyam volzhsko-valanzhinskogo razreza na r. Olenek (sever Sibiri) [Preliminary data on biostratigraphy and biofacies of the Volgian-Valanginian section on the Olenek River (Northern Siberia)] / B. L. Nikitenko // Sovremennaya mikropaleontologiya [Modern Micropaleontology]: Proceedings of the XV All-Russian Micropaleontological Meeting]. – Moscow. – 2012. – P. 19–21.
16. Nikitenko, B. L. Stratigrafiya volzhsko-valanzhinskogo intervala v rayone r. Olenek (sever Sibiri) [Stratigraphy of the Volgian-Valanginian interval in the area of the Olenek River (Northern Siberia)] / B. L. Nikitenko // Interexpo GEO-Sibiria-2014. X International Scientific Cong.: Int. Scientific Conf. "Nedropolzovaniye. Gornoye delo. Napravleniya i tekhnologii poiska, razvedki i razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh. Geoekologiya [Subsoil use. Mining. Directions and Technologies for Searching, Exploration and Development of Mineral Deposits. Geoecology]": Collected materials in 4 volumes. – Novosibirsk: SGGA, 2014. – Vol. 1. – P. 104–108.
17. Nikitenko, B. L. High-resolution stratigraphy and palaeoenvironments of the Volgian-Valanginian in the Olenek key section (Anabar-Lena region, Arctic East Siberia, Russia) / B. L. Nikitenko, E. B. Pestchevitskaya, S. N. Khafaeva // Revue de Micropaleontologie. – 2018. – Vol. 61. – № 3–4. – P. 271–312.
18. Nikitenko, B. L. Stratigraphy and palaeoenvironments across the Jurassic- Cretaceous boundary in the reference section (Olenek River) for eastern regions of Laptev Sea area (Arctic Siberia, Russia) / B. L. Nikitenko, E. B. Pestchevitskaya, S. N. Khafaeva // Global Geology. – 2019. – Vol. 22. – № 4. – P. 270–279.
19. Stepanov, D. L. Obshchaya stratigrafiya (Printsipy i metody stratigraficheskikh issledovaniy) [General stratigraphy (Principles and methods of stratigraphic research)] / D. L. Stepanov, M. S. Mesezhnikov. – L.: Nedra. – 1979. – 423 p.
20. Stratigraficheskiy kodeks Rossii. Izdaniye tretye [Stratigraphic code of Russia. Third edition] / Ed. A. I. Zhamoida. – SPb: VSEGEI, 2006. – 96 p.
21. Shurygin, B. N. Tsirkumborealnyye repernyye urovni nizhney i sredney yury (po posledovatelnosti biosobytiy v bentose) [Circumboreal reference levels of the Lower and Middle Jurassic (based on the sequence of bioevents in the benthos)] / B. N. Shurygin, B. L. Nikitenko // Geodinamika i evolyutsiya Zemli [Geodynamics and Evolution of the Earth]: Mater. to Scientific Conf. RFBR]. – Novosibirsk: SB RAS, NITs OIGGM, 1996. – P. 187–192.
22. Opornyy razrez verkhneyurskikh otlozheniy basseyna r. Khety (Khatangskaya vpadina) [Reference section of Upper Jurassic deposits of the Kheta River basin (Khatanga depression)] / ed. V. N. Saks. – L.: Nauka, 1969. – 207 p.
23. Resheniya i trudy Mezhvedomstvennogo soveshchaniya po dorabotke i utochneniyu unifitsirovannoy i korrelyatsionnoy stratigraficheskikh skhem Zapadno-Sibirskoy nizmennosti [Resolutions and materials of the interdepartmental meeting on refinement and adoption of the unified and correlation stratigraphic schemes of the West Siberian depression]. Part 1 / ed. N. N. Rostovtsev. – Tyumen. – 1969. – 143 p.
24. Resheniya 3-go Mezhvedomstvennogo regionalnogo stratigraficheskogo soveshchaniya po mezozoyu i kaynozoyu Sredney Sibiri [Resolutions of the third interdepartmental regional stratigraphic meeting on the Mesozoic and Cenozoic of Central Siberia] / ed. N. N. Rostovtsev, V. N. Saks. – Novosibirsk. – 1981. – 91 p.
25. Saks, V. N. Paleogeografiya Khatangskoy vpadiny i prilegayushchikh territoriy na protyazhenii yurskogo i melovogo periodov [Paleogeography of the Khatanga depression and adjacent territories during the Jurassic and Cretaceous periods] / V. N. Saks // L.: NIIGA, 1958. – Vol. 85. – Iss. 9. – P. 70–89.
26. Zakharov, V. A. Stratigraficheskiye i paleogeograficheskiye predposylki poiskov nefti i gaza v verkhneyurskikh-nizhnemelovykh osadochnykh tolshchakh morskogo genezisa obramleniya morya Laptevykh [Stratigraphic and paleogeographic prerequisites for oil and gas exploration in the Upper Jurassic-Lower Cretaceous marine sedimentary strata of sea genesis on margins of the Laptev Sea] / V. A. Zakharov, M. A. Rogov // Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy]. – 2014. – № 4 (16). – P. 38–47.

Благодарность (госзадание):

Автор выражает благодарность Б. Л. Никитенко и Л. А. Глинских за предоставленный материал, помощь и сотрудничество на всех этапах работы над рукописью.
Исследования выполнены при поддержке проекта FWZZ-2022-0005.

Acknowledgements (state task)

The author is grateful to B. L. Nikitenko and L. A. Glinskikh for the provided material and for their help and co-operation at all work stages of the manuscript.
The research was supported by the project FWZZ-2022-0005.

Информация об авторе:

Хафаева Светлана Николаевна – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт Академика Коптюга, д. 3; e-mail: khafaevasn@ipgg.sbras.ru).

About the author:

Svetlana N. Khafaeva – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the Institute of Petroleum Geology and Geophysics named after A. A. Trofimuk of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Koptug ave, Novosibirsk 630090, Russian Federation; e-mail: khafaevasn@ipgg.sbras.ru).

Для цитирования:

Хафаева, С. Н. Фораминиферы нижнего мела севера Средней Сибири (Центральный Таймыр и низовья реки Оленек): биостратиграфический и биофациальный анализы / С. Н. Хафаева // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 68–77.

For citation:

Khafaeva, S. N. Foraminifery nizhnego mela Srednej Sibiri (Centralnyj Tajmyr i nizovya reki Olenek): biostratigraficheskij i biofacialnyj analizy [Lower Cretaceous foraminifera of the northern part of Middle Siberia (Central Taimyr and lower reaches of the Olenek River): biostratigraphic and biofacies analyses] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 68–77.

Дата поступления статьи: 04.02.2025
Прошла рецензирование: 27.02.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 04.02.2025
Reviewed: 27.02.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 546.66+662.343;550.4+553.43;(571.17)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-78-86

Особенности состава и условия образования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия)

Ф. П. Леснов, В. Н. Королюк, А. В. Вишневский, Н. М. Подгорных

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

felix@igm.nsc.ru
camebax@igm.nsc.ru
vishnevsky@igm.nsc.ru
nmpodgornykh@yandex.ru

Аннотация

Изложены результаты исследования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия). Месторождение расположено в Южной Сибири в плохо обнаженной местности и локализовано среди базальтов, трахибазальтов и пирокластических отложений нижнекембрийской усть-анзасской свиты, в которых широко распространены пористые и раздробленные участки. Самородок хранится в Центральном Сибирском геологическом музее (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск, музейный № I-2/30). При массе около 700 кг его максимальные размеры составляют 0,25×0,65×1,4 м. Изучение состава двух фрагментов самородка выполнено с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8230 с волновыми спектрометрами, растрового электронного микроскопа TESCAN Mira 3 с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max 50 и рамановского спектрометра Horiba Lb HR800. Результаты исследования показали достаточно однородное распределение меди при ее среднем содержании более 99 мас. %. Из числа элементов-примесей отмечаются Si, Fe, Mn, S, Hg, Sr, Ga и Ag. Среди них наибольшее содержание у серебра – в среднем 0,050 мас. %. В образцах выявлены разноразмерные (5–200 μm, реже до 1 мм) микровключения идиоморфных кристаллов кварца и датолита, ксеноморфные выделения кальцита и калиевого полевого шпата, а также субмикроскопические зерна ртутистого серебра. Обнаружены мелкие полости, частично или полностью заполненные кварцем и кальцитом вместе с подчиненными им купритом, хризоколлой и малахитом. Предполагается, что перенос меди осуществлялся в процессе инфильтрации очень бедных серой восстановленных гидротермальных растворов в составе комплексов с лигандами преимущественно углеводородов и углекислоты с последующим их распадом и формированием самородка меди.

Ключевые слова:

медь, крупный самородок, геохимия, минералогия, Тайметское месторождение, Горная Шория, Россия

Composition characteristics and formation conditions of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia)

F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk, A. V. Vishnevsky, N. M. Podgornykh

Institute of Geology and Mineralogy named after V. S. Sobolev of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

felix@igm.nsc.ru
camebax@igm.nsc.ru
vishnevsky@igm.nsc.ru
nmpodgornykh@yandex.ru

Abstract

The paper contains the study results of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia). The deposit is situated in Southern Siberia in a poorly bare terrain and is located among basalts, trachybasalts and pyroclastic deposits of the Lower Cambrian Ust-Anzas Formation, in which porous and fragmented areas are widespread. The nugget is kept in the Central Siberian Geological Museum (Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, museum № I-2/30). With the weight of about 700 kg, its maximum dimensions are 0.25×0.65×1.4 m. The composition of two fragments of the nugget was studied using the JEOL JXA-8230 electron probe microanalyzer with wave spectrometers, TESCAN Mira 3 scanning electron microscope with Oxford X-Max 50 energy dispersive spectrometer and the Horiba Lb HR800 Raman spectrometer. By the obtained results, copper is evenly distributed with its average content of more than 99 wt. %. The impurity elements are Si, Fe, Mn, S, Hg, Sr, Ga and Ag. Among them, silver content has the maximum value of about 0.050 wt. %. The samples are revealed for different-size (5–200 μm, seldom up to 1 mm) microinclusions of euhedral crystals of quartz and datolite, xenomorphic segregations of calcite and potassium feldspar, as well as submicroscopic grains of mercuric silver. There are small cavities partially or completely filled with quartz and calcite, along with their subordinate cuprite, chrysocolla and malachite. The transfer of copper is assumed to be carried out during the infiltration of reduced hydrothermal solutions, which are very poor in sulfur, in the composition of complexes with ligands predominantly of hydrocarbons and carbon dioxide, followed by their decomposition and the formation of a copper nugget.

Keywords:

copper, large nugget, geochemistry, mineralogy, Taymet deposit, Gornaya Shoria, Russia

Введение

Самородная медь в природе чаще всего встречается в виде рассеянной мелкой вкрапленности, пластинок и небольших дендритов. Значительно реже она представлена обособлениями (самородками) весом от первых килограммов до нескольких тонн, содержание меди в которых обычно превышает 90 мас. %. Проявления вкрапленности и крупных обособлений самородной меди известны во многих магматических провинциях Мира. Они также встречаются в некоторых регионах Сибири, в том числе в Кузнецком Алатау, Северо-Минусинской и Южно-Минусинской впадинах.

Одним из известных районов находок самородков меди в России является Тайметское месторождение, расположенное в Горной Шории на водоразделе ре

к Таймет и Пызас и относящееся к медно-эпидотовой формации. Первое сообщение об обнаружении крупного самородка меди на этом месторождении появилось в 1931 г. Месторождение находится в плохо обнаженной местности и локализовано в образованиях усть-анзасской свиты нижнего кембрия, представленных пористыми и часто раздробленными оливиновыми и безоливиновыми базальтами, меланобазальтами, трахибазальтами и пирокластическими отложениями. Оруденение контролируется миндалекаменными зонами в кровле базальтовых потоков, горизонтами обломочных пород и послойными трещинами. Медная минерализация представлена рассеянной вкрапленностью, прожилками, жилами и редко встречающимися самородками различного размера. В зоне окисления рудных тел выявлены такие минералы, как куприт, малахит, азурит, халькозин, брошантит, хризоколла [1].

Наиболее крупный самородок меди массой 3,3 т из этого месторождения был обнаружен и доставлен геологом В. Ф. Коновальцевым в г. Сталинск (ныне Новокузнецк) в 1959 г. (рис. 1). По результатам химического анализа содержание меди в пробах, отобранных из этого самородка, составило от 53 до 97 мас. %. Методом спектрального анализа в нем обнаружены элементы-примеси Hg, Zn, Mn, Ba, Sr, Ni, Co, Ga, Be [2].

В начале 90-х гг. XX в. на Тайметском месторождении студентами-геологами из минералогического общества «Кристалл» при Новосибирском государственном университете в слабо обнаженной местности был обнаружен еще один крупный самородок меди. В 2009 г. под руководством Н. М. Подгорных его доставили в Центральный Сибирский геологический музей при Институте геологии и минералогии СО РАН. Самородок имел ноздреватую поверхность и был покрыт пленкой окисления. При массе порядка 700 кг его размеры составили 0,25×0,65×1,4 м (рис. 2).

В работе представлены результаты исследования геохимии и минералогии этого самородка меди с помощью современных аналитических методов. На основе полученных данных предполагается, что самородок образовался в процессе инфильтрации восстановленных и крайне бедных серой медьсодержащих постмагматических гидротермальных растворов в крупную полость в базальтах.



Рисунок 1. Самородок меди из Тайметского месторождения весом 3,3 т, находящийся в экспозиции Кемеровского филиала Территориального фонда геологической информации по Сибирскому федеральному округу (г. Новокузнецк). Фото из открытого источника.

Figure 1. The copper nugget from the Taymet deposit weighing 3.3 tons, on the exposition at the Kemerovo Branch of the Territorial Fund of Geological Information for the Siberian Federal District (Novokuznetsk). Photo from an open source.



Рисунок 2. Крупный самородок меди из Тайметского месторождения массой около 700 кг. Слева – на месте его обнаружения, справа – в экспозиции Центрального Сибирского геологического музея при Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск).

Figure 2. The large copper nugget from the Taymet deposit weighing about 700 kg. Left photo was taken at the place where it was found, right – on exposition at the Central Siberian Geological Museum at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk).

Материалы и методы

Отбор материала для изучения самородка меди (СМ) из Тайметского месторождения, хранящегося в Центральном Сибирском геологическом музее (музейный № I-2/30), проводили следующим образом. Из двух удаленных друг от друга участков самородка с глубины около 1 см от его поверхности были отрезаны фрагменты массой в несколько граммов каждый. С целью сопоставления таким же способом отобран фрагмент из хранящегося в этом же музее образца генетически родственного самородка меди из широко известной меденосной провинции на п-ове Кивино (штат Мичиган, США) (музейный № I-2/11). Эти три фрагмента СМ вмонтировали в эпоксидную шашку-препарат (рис. 3) для изучения их состава с помощью электронно-зондового микроанализатора JEOL JXA-8230, растрового электронного микроскопа TESCAN Mira 3 с энергодисперсионным спектрометром Oxford X-Max 50 и рамановского спектрометра Horiba Lb HR800 в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН в Институте геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). Определение концентрации меди, а также элементов-примесей, содержание которых предположительно могло быть в пределе возможностей микроанализатора JEOL JXA-8230, выполняли в автоматическом режиме путем сканирования вдоль линий с шагом 0,1 мм, т. е. без визуального контроля позиций точек анализа. Поэтому часть анализов пришлась на места с разного рода дефектами, что приводило к искажению содержания определяемых элементов. Для исключения этих погрешностей из массива аналитических данных была выполнена их разбраковка с использованием статистического r-критерия [3]. Кроме этого, в 20 произвольно выбранных визуально бездефектных точках в фрагментах СМ было выполнено определение содержания Ag и Au. Минеральную принадлежность обнаруженных в образцах меди фаз устанавливали по результатам анализов, выполненных на разных участках их поверхности. Для подтверждения правильности диагностики водосодержащих минералов и датолита привлекался метод рамановской спектроскопии. Для получения спектров использовали прибор Horiba Labram HR800 в ИГМ СО РАН, оборудованный 532 nm Nd:YAG лазером и микроскопом Olympus BX41. Перед началом измерений была выполнена калибровка по кремниевому стандарту (520,5±1 $см^{-1}$). Для идентификации минералов применяли базу данных проекта RRUFF (https://rruff.info/) и опубликованные результаты в научной литературе. Корректировку позиции базовой линии проводили с помощью ПО Opus.

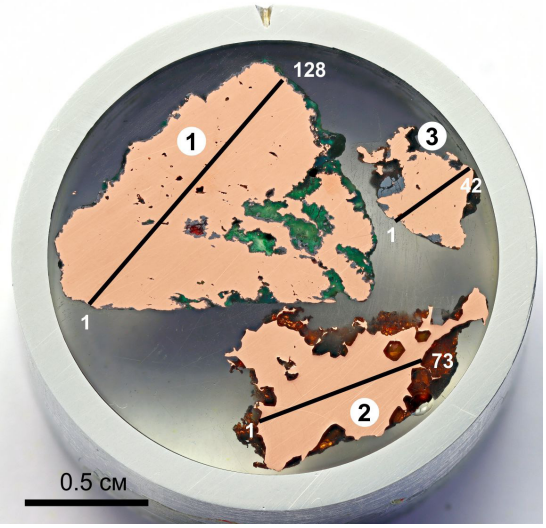


Рисунок 3. Шашка-препарат с фрагментами самородной меди. 1 и 2 – фрагменты самородка из Тайметского месторождения (музейный № I-2/30); 3 – фрагмент самородка из месторождения на п-ве Кивино (музейный № I-2/11). Черными линиями указаны направления сканирования с шагом 0,1 мм. Цифры рядом с ними указывают на положение первых и последних точек измерения.
Figure 3. The checker-preparation with fragments of native copper. Symbols: 1 and 2 – fragments of a nugget from the Taymet deposit (museum № I-2/30); 3 – fragment of a nugget from a deposit on the Keweenaw Peninsula (museum № I-2/11). Black lines indicate scanning directions in 0.1 mm increments. The numbers next to them indicate the position of the first and last measurement points.

Результаты и их обсуждение

Откорректированные с использованием статистического r-критерия аналитические данные показали, что

Таблица 1

Результаты электронно-зондового микроанализа фрагментов самородков меди из Тайметского месторождения и месторождения полуострова Кивино, мас. %

Table 1

Results of the electron probe microanalysis of fragments of copper nuggets from the Taymet and the Keweenaw Peninsula deposits, wt. %

Параметры	Cu	Si	Fe	Mn	S	Sr	Hg	Ga	Ag
Месторождение Тайметское, обр, 1									
	m=128								*n*=20
$\bar{c}$	99,72	0,012	0,004	0,003	0,010	0,004	0,011	0,005	0,047
S	0,52	0,020	0,001	0,001	0,006	0,005	0,011	0,006	0,007
min	98,40	0,001	0,001	0,001	0,002	н. п.	н. п.	н. п.	0,032
max	100,79	0,024	0,012	0,008	0,051	0,019	0,044	0,022	0,054
Месторождение Тайметское, обр, 2									
	m=73								*n*=20
$\bar{c}$	99,85	0,019	0,006	0,003	0,013	0,003	0,009	0,004	0,053
S	0,70	0,065	0,008	0,001	0,013	0,004	0,011	0,006	0,004
min	98,43	0,003	0,002	н. п.	0,003	н. п.	н. п.	н. п.	0,044
max	100,96	0,577	0,071	0,006	0,087	0,019	0,060	0,026	0,061
Месторождение полуострова Кивино									
	m=42								*n*=20
$\bar{c}$	99,78	0,013	0,005	0,002	0,012	0,003	0,009	0,004	0,067
S	0,62	0,008	0,001	0,001	0,006	0,005	0,010	0,005	0,011
min	98,70	0,0103	0,002	н. п.	0,005	н. п.	н. п.	н. п.	0,033
max	100,89	0,038	0,007	0,004	0,029	0,016	0,036	0,016	0,076

Условные обозначения. $\bar{c}$, *S* – среднее значение и стандартное отклонение содержания элемента соответственно; *min* и *max* – минимальные и максимальные значения; *m* – количество точек измерения вдоль профилей (за исключением ошибочных результатов); *n* – число определений концентрации серебра в произвольно выбранных точках измерения; н. п. – содержание элемента ниже предела обнаружения.
Keys: $\bar{c}$, *S* – average value and standard deviation of element's content, respectively; *min* and *max* – minimum and maximum values; *m* – number of measurement points along profiles (excluding error results); *n* – number of silver concentration determinations at randomly selected measurement points; н.п. – element's content is below the detection limit.

в СМ из Тайметского месторождения и месторождения п-ва Кивино среднее содержание Cu превысило 99 мас. %, и в этом отношении самородки значимо не различаются (табл. 1). Помимо Cu фрагменты СМ анализировали на ряд элементов-примесей: Si (10), S (10), Mn (10), Fe (10), Co (20), Ni (30), Zn (30), Ga (20), As (30), Sr (30), Ba (30), Ag (70), Au (300), Hg (90) и Pb (30). В скобках указаны пределы обнаружения элементов в г/т, обеспечиваемые с доверительной вероятностью 68,3 % для методики электронно-зондового микроанализа, использованной в работе. Из приведенного перечня элементов только содержание Si, S, Mn, Fe, Sr, Ga, Ag и Hg в отдельных точках измерения незначительно превышало пределы их обнаружения. В СМ из обоих месторождений наибольшая концентрация установлена для Ag, содержание которого в образце из Тайметского месторождения оказалось меньше, чем в СМ из месторождения п-ова Кивино. Сравнение этих средних значений по статистическому t-критерию показало, что они значимо различаются с вероятностью 95 %. Исходя из результатов определений, можно констатировать, что для настолько низкого содержания большинства элементов-примесей чувствительность электронно-зондового микроанализа недостаточна для получения достоверных данных.

В фрагментах СМ из Тайметского месторождения непосредственно в меди были выявлены разноразмерные (5-200 μm, реже до 1 мм) включения идиоморфных кристаллов кварца и датолита, а также ксеноморфные выделения кальцита и калиевого полевого шпата (рис. 4, табл. 2). Первоначально датолит был идентифицирован по соотношению определяемых компонентов (Ca, Si), а также по присутствию в рентгеновском спектре характеристической линии бора. Его количественное содержание определить не представлялось возможным. Поэтому минеральная принадлежность фазы к датолиту была подтверждена по его рамановскому спектру.

Во фрагменте СМ из месторождения п-ова Кивино обнаружены единичные зерна кварца, калиевого полевого шпата, эпидота, округлые выделения халькозина, нередко ассоциирующего с мелкими (1-5 μm) ксеноморфными зернами ртутистого серебра.

Кроме того, в СМ из обоих месторождений присутствуют различные по размеру и форме мелкие полости, частично или полностью заполненные разными минералами (рис. 3, 5 a). Минеральное заполнение полостей в самородке из Тайметского месторождения часто состоит из нескольких зон. Анализы, выполненные с помощью энергодисперсионного спектрометра растрового микроскопа, показали, что зоны шириной от 10–20 до 200–300 μm, непосредственно прилегающие к меди, представлены купритом, в ассоциации с которым нередко наблюдаются мелкие (обычно <2 μm) ксеноморфные выделения ртутистого серебра (4–9 мас. % Hg). За ними по направлению к центру полостей расположена зона, шириной от десятков μm до первых мм, сложенная зеленовато-синей хризоколлой – водосодержащим силикатом меди и тонкозернистым хризоколла-малахитовым агрегатом (рис. 3, 5 b, c, d). Центральная часть полостей сложена преимущественно малахитом и кальцитом, причем последний часто заполняет подавляющую долю их объема (рис. 5 d). Кроме того, агрегат вторичных медных минералов, в основном состоящий из хризоколлы и малахита, локализован в трещинах спайности в крупных зернах кальцита и по диагональным направлениям относительно сети трещин спайности (рис. 5 d).

В полостях достаточно широко представлены кварц, калиевый полевой шпат и альбит, слагающие отдельные зерна и гнезда в кальците или агрегатах эпигенетических

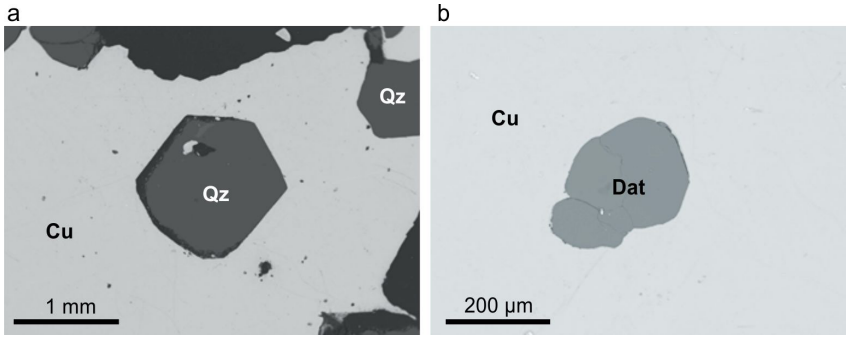


Рисунок 4. Микровключения идиоморфных кристаллов кварца (a) и датолита (b) в самородной меди Тайметского месторождения.

Figure 4. Microinclusions of quartz (a) and datolite (b) crystals in native copper from the Taymet deposit.

Таблица 2

Химический состав кальцита, датолита, калиевого полевого шпата и эпидота из включений в самородной меди из Тайметского месторождения, мас. %

Table 2

Chemical composition of calcite, datolite, potassium feldspar and epidote from inclusions in native copper from the Taymet deposit, wt. %

№ зерна	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	FeO	MnO	Na_2O	K_2O	NiO	Cr_2O_3	Сумма
Кальцит												
Cu-1.1	0,16	н.п.	0,04	55,69	н.п.	0,08	0,09	н.п.	н.п.	н.п.	0,03	56,09
Cu-1.2	0,11	0,04	0,05	59,04	н.п.	0,13	0,03	0,03	0,05	0,01	0,03	59,51
Cu-1.3	0,03	0,02	0,01	56,85	н.п.	0,01	н.п.	0,05	н.п.	н.п.	0,04	57,00
Cu-1.4	0,13	н.п.	0,03	52,54	н.п.	0,01	0,03	0,02	н.п.	0,02	0,09	52,87
Датолит												
Cu-1.4	38,33	н.п.	0,09	33,56	0,01	0,02	н.п.	0,01	0,01	0,01	0,04	72,06
Cu-1.9	37,74	0,01	0,08	33,88	0,01	0,01	0,02	н.п.	0,01	н.п.	0,01	71,69
Калиевый полевой шпат												
Cu-1.5	64,29	0,07	17,24	н.п.	0,04	0,01	0,01	0,21	16,42	0,01	н.п.	98,29

Примечание. Зерна минералов от Cu-1.1 до Cu-1.9 – из месторождения Тайметское. Концентрация H_2O, CO_2 и B_2O_3 не определялась.

Условное обозначение. Здесь и в табл. 3: н.п. – содержание компонента ниже предела обнаружения.

Note. Mineral grains from Cu-1.1 to Cu-1.9 are from the Taymet deposit. The concentrations of H_2O, CO_2 and B_2O_3 are not determined.

Key here and in Table 3: н.п. – component's content is below the detection limit.

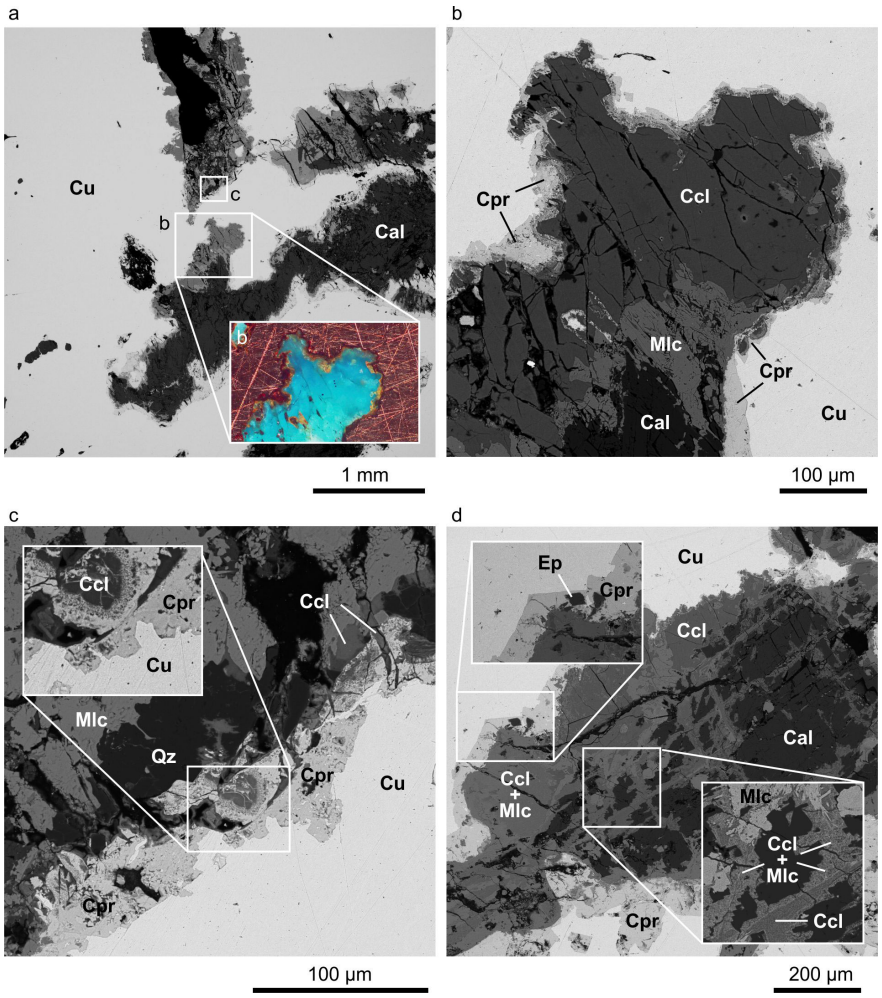


Рисунок 5. Строение и минеральный состав полостей в самородной меди из Тайметского месторождения.

Условные обозначения. Cal – кальцит; Ccl – хризоколла; Cpr – куприт; Cu – медь самородная; Ep – эпидот; Mlc – малахит; Qz – кварц. Изображения получены в обратно рассеянных электронах.

Figure 5. Structure and mineral composition of cavities in native copper from the Taymet deposit.

Keys: Cal – calcite; Ccl – chrysocolla; Cpr – cuprite; Cu – native copper; Ep – epidote; Mlc – malachite; Qz – quartz. SEM BSE images.

Таблица 3

Химический состав минералов из полостей в самородной меди из Тайметского месторождения, мас. %

Table 3

Chemical composition of minerals from cavities in native copper from the Taymet deposit, wt. %

№ зерна	Минерал	SiO_2	FeO	MgO	CaO	CuO	Сумма
4-51	Малахит	0,5	н.п.	н.п.	н.п.	70,3	70,8
2-30	То же	н.п.	н.п.	н.п.	0,2	69,8	70,0
2-27	Хризоколла	35,4	н.п.	н.п.	0,3	50,6	86,3
5-55	То же	36,1	н.п.	н.п.	0,4	50,3	86,8
4-39	Бисбиит (?)	42,5	0,6	8,9	0,3	36,1	88,4

Примечание. Анализы выполнены с помощью энергодисперсионного спектрометра Oxford X-Max 50 на растровом электронном микроскопе Tescan Mira 3.

Note. Analyses were performed using the Oxford X-Max 50 energy dispersive spectrometer and the Tescan Mira 3 scanning electron microscope.

медных минералов, причем расположение этих скоплений приурочено преимущественно к периферии полостей (рис. 5 с). Подобную позицию занимают и выделения эпидота с датолитом, образующие гроздьевидные скопления ксеноморфных зерен, располагающиеся, главным образом, в зоне развития куприта, т. е. на участках, непосредственно примыкающих к самородной меди. В единичных случаях встречается халькозин, содержащий до 0,5 мас. % Ag, а также минерал, близкий по составу к хризоколле или сходному с ней силикату меди (например, планшеиту), но содержащий больше SiO_2 и до 10 мас. % MgO (табл. 3). В литературе минерал похожего состава иногда называют бисбиитом [4], однако в списке минералов, утвержденных Комиссией по новым минералам и названиям минералов Международной минералогической ассоциацией, он не значится.

В центральной части крупного фрагмента меди из Тайметского месторождения обнаружена незаполненная силикатами и карбонатами полость диаметром 2–3 мм, по своим морфологическим особенностям идентичная заполненным полостям (см. рис. 3, фрагмент 1). Ее стенки инкрустированы пористым микрозернистым и иногда микродрузовым агрегатом куприта с редкими зернами ртутистого серебра. По-видимому, эта полость была изолирована от поступления новых порций раствора на этапе массового образования силикатов и карбонатов меди и кальция в других полостях.

Для подтверждения идентификации бор- и водосодержащих минералов была проведена съемка их рамановских спектров, которые за счет относительно крупного размера зерен и хорошей фокусировки лазерного пучка получились практически без вклада спектральных линий вмещающих или соседствующих фаз. В спектре датолита (рис. 6) присутствуют основные линии 164 и 693 $см^{-1}$, 3499 $см^{-1}$ (OH-группа), а также ряд более слабых – в диапазоне 900–1200 $см^{-1}$, с точностью до ±1 $см^{-1}$, отвечающие модам колебаний BO, CaO и SiO в соответствующем окружении в структуре датолита [5]. Линии, полученные для хризоколлы, менее четкие и менее интенсивные, основные из них – 205–217, 335, 401–407, 482–501 и 681 $см^{-1}$ (рис. 6). Кроме того, присутствует линия колебаний OH-группы с частотой 3629 $см^{-1}$. Положение указанных спектральных линий в целом соответствует имеющимся для хризоколлы в базе RRUFF и данным из работы [6].

По современным представлениям, гидротермальные растворы мантийного, метаморфического и иного гене-

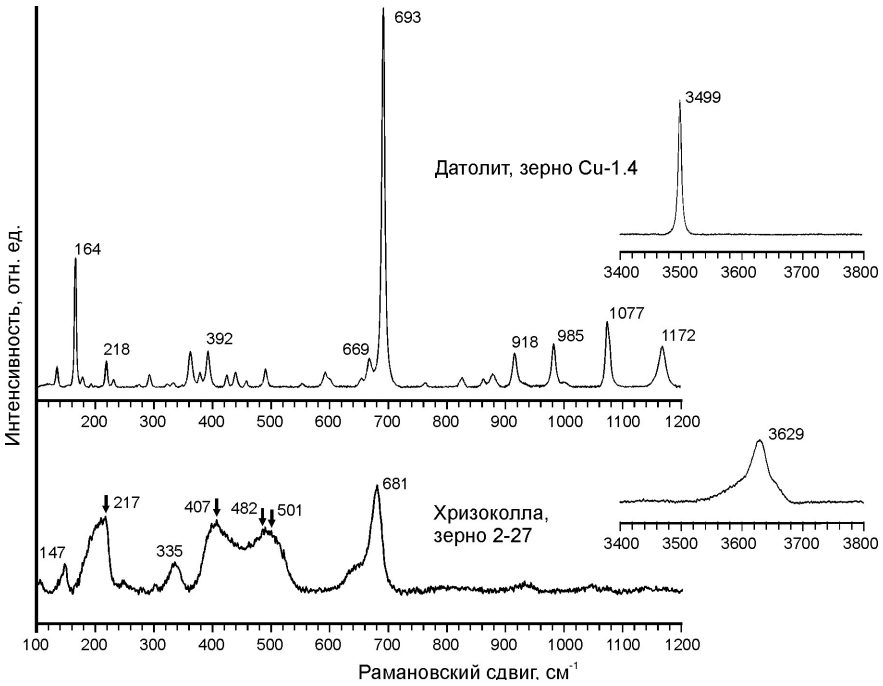


Рисунок 6. Рамановские спектры датолита из включения в самородной меди Тайметского месторождения и хризоколлы, заполняющей полости.
Figure 6. Raman spectra of datolite from inclusion in native copper of the Taymet deposit and chrysocolla from cavities.

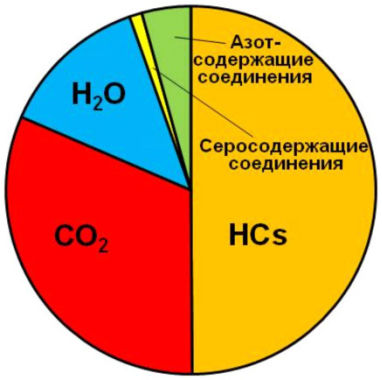


Рисунок 7. Относительное содержание углеводородов (HCs), углекислоты (CO_2), воды (H_2O) и азот- и серосодержащих соединений из флюидных включений в самородке меди из Тайметского месторождения [10].
Figure 7. Relative content of hydrocarbons (HCs), carbon dioxide (CO_2), water (H_2O) and nitrogen- and sulfur-containing compounds from fluid inclusions in a copper nugget from the Taymet deposit, according to [10].

зиса переносят химические элементы в форме ионов, которые посредством ионно-ковалентных связей образуют комплексы с лигандами углеводородов, углекислоты, хлоридов и других соединений. Если удельный вес комплекса окажется ниже удельного веса элемента, то его способность к миграции будет выше, чем у отдельного атома. На геохимических барьерах, т. е. при смене *P-T* условий, окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных потенциалов происходит распад этих комплексов и отложение переносимых ими веществ. Некоторые исследователи полагают, что в большинстве случаев медь транспортируется гидротермальными растворами в составе Cu-хлоридных и Cu-сульфидных комплексов [7–9], и что при низкой фугитивности серы и кислорода она осаждается именно в самородной форме. В частности, относительно месторождения меди на п-ве Кивино (США) названные авторы полагают, что оно сформировалось в результате восстановления меди из сульфидов слабощелочными метаморфогенными гидротермами во время их инфильтрации сквозь сульфидсодержащие базальты. При этом основным переносчиком меди считается ее хлоридный комплекс. По оценкам названных выше исследователей, восстановление, перенос и отложение меди проходило в температурном интервале 300–500 °C.

При изучении фрагментов самородной меди из Тайметского месторождения не обнаружены сульфиды или сульфаты меди, что может косвенно указывать на низкое содержание серы в питающем гидротермальном растворе. Дополнительно к этому факту результаты исследования хромато-масс-спектрометрическим методом отдельного фрагмента этого самородка, визуально не содержавшего какие-либо включения, показали присутствие в нем разнообразных летучих соединений, среди которых существенно преобладали углеводороды и углекислота [10; рис. 7]. Результаты исследований позволяют смоделировать процесс восстановления и переноса меди, который в общем согласуется со сложившимися взглядами на механизмы формирования ее самородков [7–9].

По нашим представлениям, возможен следующий процесс восстановления, переноса и отложения меди в самородном виде. В его основе рассматривается взаимодействие между гидротермальным раствором и медьсодержащими сульфидами из пород, сквозь которые он просачивался. Например, для борнита и халькопирита реакции восстановления меди с присутствующей в растворе водой с последующим удалением из системы сероводорода и сернистого газа на геохимическом барьере могут выглядеть следующим образом:

$$9CuFeS_2+16H_2O \rightarrow 9Cu+3Fe_3O_4+16H_2S+2SO_2$$

$$9Cu_5FeS_4+28H_2O \rightarrow 45Cu+3Fe_3O_4+28H_2S+8SO_2.$$

В качестве продукта этих реакций образуется оксид железа, поскольку у последнего сродство к кислороду значительно выше, чем у меди. При этом удаление сероводорода и сернистого газа должно привести к снижению фугитивности серы и кислорода в системе. Восстановление меди из ее безжелезистых сульфидных фаз, допустим, из халькозина, ассоциирующего с пиритом, может произойти по реакции:

$$Cu_2S+3FeS_2+6H_2O \rightarrow 2Cu+Fe_3O_4+6H_2S+SO_2.$$

Касаясь возможных условий образования самородка меди из Тайметского месторождения, отметим, что в этом

случае восстановленная медь, вероятно, транспортировалась в составе комплексных соединений с углеводородами, углекислотой и в меньшей степени с другими летучими компонентами, присутствующими в составе гидротермальных растворов не выясненного нами происхождения, и отлагалась в полости в базальте.

Вопрос о времени образования куприта и других эпигенетических минералов меди, обнаруженных в порах самородка, остается дискуссионным. С одной стороны, эти минералы могли образоваться в результате воздействия поздних порций раствора, генетически связанного с формированием самородка. С другой – такая минерализация могла быть обусловлена просачиванием окисленных приповерхностных растворов, значительно оторванных по времени от основного минералообразующего процесса. Свидетельством этому может служить отложение хризоколлы и малахита по трещинам спайности, и, вероятно, деформационным двойниковым швам в кристаллах кальцита (см. рис. 5 d), а также присутствие редких их прожилков в куприте. Однако последний факт и наличие незаполненных карбонатами полостей, инкрустированных купритом, предполагают более раннее формирование куприта по отношению к прочим эпигенетическим минералам меди. Дополнительным аргументом в пользу такого сценария могут быть как полигональность выделений куприта в самородной меди, так и структуры его замещения хризоколлой (рис. 5 c). Образование мелких включений ртутистого серебра в купритовых оторочках связано либо с его высвобождением из самородной меди в процессе окисления, либо с кристаллизацией непосредственно из раствора. Однако постоянное присутствие в выделениях серебра значительных концентраций ртути не нашло явного отражения в составе самородной меди, концентрация ртути в которой в среднем составляет 0,01 мас. %.

Выводы

1. В самородке из Тайметского месторождения среднее содержание меди превышает 99 мас. %. Среди элементов-примесей в меди по содержанию преобладает серебро, средняя концентрация которого равна 0,050 мас. %.

2. В меди самородка обнаружены разрозненные включения кварца, датолита, кальцита, калиевого полевого шпата. В самородке также присутствуют мелкие полости, частично или полностью заполненные кварцем, кальцитом и подчиненными им купритом с мелкими включениями ртутистого серебра, хризоколлой, малахитом и, возможно, другими фазами.

3. Самородок меди образовался в процессе инфильтрации очень бедных серой восстановленных гидротермальных растворов, содержавших летучие компоненты, в крупную полость в базальтах. В составе последних существенную роль играли углеводороды, в комплексах с лигандами которых транспортировалась медь.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источники

1. Объяснительная записка к Государственной геологической карте масштаба 1 : 1 000 000. Лист N-45 / под ред. Г. А. Бабина. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 2007. – 404 с.
2. Синяков, В. И. Крупная плита самородной меди из Горной Шории / В. И. Синяков, Т. А. Чичкова // Записки Всесоюзного минералогического общества. – 1961. – Ч. 90, № 3. – С. 282–283.
3. Смагунова, А. Н. Методы математической статистики в аналитической химии: учебное пособие / В. И. Синяков, О. М. Карпукова. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Феникс», 2012. – 352 с.
4. Laurent, Y. Nouvelles données sur la bisbeeite / Y. Laurent, R. Pierrot // Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie. – 1962. – 85. – P. 177–180.
5. Frost, R. L. Thermal analysis and vibrational spectroscopic characterization of the boro silicate mineral datolite – CaBSiO4(OH) / R. L. Frost, Y. Xi, R. Scholz [et al.] // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2013. – 115. – P. 376–381.
6. Frost, R. L. Is chrysocolla $(CuAl)_2H_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ related to serpertiniite $Cu(OH)_2$? – A vibrational spectroscopic study / R. L. Frost, Y. Xi // Vibrational Spectroscopy. – 2013. – 64. – P. 33–38.
7. White, W. S. The native-copper deposits of northern Michigan / W. S. White // In: Ore Deposits of the United States, 1933–1967 (Graton Sales Volume); Ridge, J.D., Ed.; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: New York, NY, USA. – 1968. – P. 303–325.
8. Bornhorst, T. Copper isotope constraints on the genesis of the Keweenaw Peninsula native copper district, Michigan, USA / T. Bornhorst, R. Mathur // Minerals. – 2017. – 7. – P. 185.
9. Schmidt, C. Copper complexation and solubility in high-temperature hydrothermal fluids: A combined study by Raman, X-ray fluorescence, and X-ray absorption spectroscopies and ab initio molecular dynamics simulations / C. Schmidt, A. Watenphul, S. Jahn [et al.] // Chemical Geology. – 2018. – 494. – P. 69–79.
10. Томиленко, А. А. Геохимия летучих компонентов в крупном штуфе самородной меди из Тайметского месторождения (Горная Шория) / А. А. Томиленко, Ф. П. Леснов, В. Н. Королюк // Ультрамафит-мафитовые комплексы: геология, строение, рудный потенциал. – Новосибирск: Изд-во ИГМ СО РАН, 2023. – С. 189–191.

References

1. Obyasnitelnaya zapiska k Gosudarstvennoj geologicheskoj karte masshtaba 1:1 000 000. List N-45 [Explanatory note to the State Geological Map at a scale of 1:1,000,000. Sheet N-45]. – SPb: Publishing House of the Saint-Petersburg Cartographic Factory VSEGEI, 2007. – 404 p.
2. Sinyakov, V. I. Krupnaya plita samorodnoj medi iz Gornoj Shorii [Large slab of native copper from Gornaya Shoria] / V. I. Sinyakov, T. A. Chichkova // Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva [Notes of the All-Union

Mineralogical Society]. – 1961. – Part 90, № 3. – P. 282–283.
3. Smagunova, A. N. Metody matematicheskoj statistiki v analiticheskoj himii. Uchebnoe posobie [Methods of mathematical statistics in analytical chemistry: Tutorial] / A. N. Smagunova, O. M. Karpukova. – Rostov-on-Don: Phoenix Publishing House, 2012. – 352 p.
4. Laurent, Y. Nouvelles données sur la bisbeeite / Y. Laurent, R. Pierrot // Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de Cristallographie. – 1962. – 85. – P. 177–180.
5. Frost, R. L. Thermal analysis and vibrational spectroscopic characterization of the boro silicate mineral datolite – CaBSiO4(OH) / R. L. Frost, Y. Xi, R. Scholz [et al.] // Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy. – 2013. – 115. – P. 376–381.
6. Frost, R. L. Is chrysocolla $(CuAl)_2H_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot nH_2O$ related to serpertiniite $Cu(OH)_2$? – A vibrational spectroscopic study / R. L. Frost, Y. Xi // Vibrational Spectroscopy. – 2013. – 64. – P. 33–38.
7. White, W. S. The native-copper deposits of northern Michigan / W. S. White // In: Ore Deposits of the United States, 1933–1967 (Graton Sales Volume); Ridge, J.D., Ed.; American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers: New York, NY, USA. – 1968. – P. 303–325.
8. Bornhorst, T. Copper isotope constraints on the genesis of the Keweenaw Peninsula native copper district, Michigan, USA / T. Bornhorst, R. Mathur // Minerals. – 2017. – 7. – P. 185.
9. Schmidt, C. Copper complexation and solubility in high-temperature hydrothermal fluids: A combined study by Raman, X-ray fluorescence, and X-ray absorption spectroscopies and ab initio molecular dynamics simulations / C. Schmidt, A. Watenphul, S. Jahn [et al.] // Chemical Geology. – 2018. – 494. – P. 69–79.
10. Tomilenko, A. A. Geohimiya letuchih komponentov v krupnom shtufe samorodnoj medi iz Tajmetskogo mestorozhdeniya (Gornaya Shoriya) [Geochemistry of volatile components in a large ore of native copper from the Taymet deposit (Gornaya Shoria)] / A. A. Tomilenko, F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk [et al.] // Ultramafit-mafitovye kompleksy: geologiya, stroenie, rudnyj potencial [Ultramafite-Mafite Complexes: Geology, Structure, Ore Potential]. – Novosibirsk: IGM SB RAS, 2023. – P. 189–191.

Благодарность (госзадание):

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИГМ СО РАН (№ 0330-2018-0023; № 220414001-59-3; № FWZN-2022-0027).

Acknowledgements (state task)

The work was performed within the frames of the state tasks of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (№ FWZN-2022-0037; № FWZN-2022-0032; № FWZN-2022-0027).

Информация об авторах:

Леснов Феликс Петрович – доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: lesnovfp@list.ru).

Королюк Владимир Николаевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: camebax@igm.nsc.ru).

Вишневский Андрей Владиславович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий Центральным Сибирским геологическим музеем Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: vishnevsky@igm.nsc.ru).

Подгорных Николай Михеевич – кандидат геолого-минералогических наук Института геологии и минералогии СО РАН (630090, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-кт академика В. А. Коптюга, д. 3; e-mail: nmpodgornykh@yandex.ru).

About the authors:

Felix P. Lesnov – Doctor of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: felix@igm.nsc.ru).

Vladimir N. Korolyuk – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences ((3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: camebax@igm.nsc.ru).

Andrei V. Vishnevsky – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: vishnevsky@igm.nsc.ru).

Nikolai M. Podgornykh – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Senior Researcher at the V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (3 Academician Koptyug ave., Novosibirsk, 630090 Russian Federation; e-mail: nmpodgornykh@yandex.ru).

Для цитирования:

Леснов, Ф. П. Особенности состава и условия образования крупного самородка меди из Тайметского месторождения (Горная Шория, Россия) / Ф. П. Леснов, В. Н. Королюк, А. В. Вишневский [и др.] // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 78–86.

For citation:

Lesnov, F. P. Osobennosti sostava i usloviya obrazovaniya krupnogo samorodka medi iz Tajmetskogo mestorozhdeniya (Gornaya Shoria, Rossiya) [Composition characteristics and formation conditions of a large copper nugget from the Taymet deposit (Gornaya Shoria, Russia)] / F. P. Lesnov, V. N. Korolyuk, A. V. Vishnevsky [et al.] // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 78–86.

Дата поступления статьи: 17.10.2024
Прошла рецензирование: 06.11.2024
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 17.10.2024
Reviewed: 06.11.2024
Accepted: 01.04.2025

УДК 622.01:551.24:553.07
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-87-101

Результаты исследований напряженно-деформированного состояния геосред в задачах геомеханики, геотектоники, горного машиностроения

Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

gmmlab@misd.ru

Аннотация

В статье кратко изложены новые, включая неопубликованные, результаты, полученные группой прикладной геомеханики отдела горной и строительной геотехники ИГД СО РАН при выполнении цикла работ в областях геомеханики, геотектоники, горного машиноведения. Для связанных с ними задач объединяющими стали дискретный характер и большие деформации геоматериалов – участников исследованных процессов. С учетом этого при их изучении использованы представления механики сыпучих сред и модифицированный метод дискретных элементов. На его основе разработана компьютерная программа, эффективность которой подтверждена результатами решений для тестовых задач. Численно и на физических моделях обоснована, а также подтверждена независимыми инструментальными измерениями связь абсолютных значений и ориентации повышенных тектонических напряжений в области месторождений полезных ископаемых с тектоникой вмещающих их эндокольцевых структур. Показана актуальность данного раздела геотектоники с точки зрения освоения запасов полезных ископаемых ложа Мирового океана. Решены задачи: повышения несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой; снижения пиковых нагрузок на пластинчатые питатели раздробленной руды обогатительных фабрик; повышения точности объемных дозаторов непрерывного действия для трудносыпучих материалов; противоэрозионной защиты изгиба пневмотранспортного трубопровода; влияния формы сечения и скорости вращения горизонтального трубопровода на эффективность транспортирования в нем твердых частиц. Усовершенствована и передана горнопроектной организации ранее разработанная компьютерная программа для численного моделирования течения отбитой руды при добыче с подэтажным обрушением и выпуском под обрушенными породами; на основе результатов международного сотрудничества предложен критерий оптимизации упаковки полидисперсных сред.

Ключевые слова:

геомеханика, геотектоника, механика сыпучих сред, метод дискретных элементов, компьютерные программы, тестовые и прикладные задачи, численное и физическое моделирование

Investigation results of the stress-strain state of geomedia for the purposes of geomechanics, geotectonics, mining engineering

E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan

N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk

gmmlab@misd.ru

Abstract

The article summarises new results, including unpublished data, obtained by the Applied Geomechanics Group of the Department of Mining and Construction Geotechnics at the Mining Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences while performing a series of works in the fields of geomechanics, geotectonics, and mining engineering. The discrete nature and serious deformations of geomaterials – participants of the studied processes – were unifying factors for the tasks these disciplines have to solve. With this in mind, the concepts of loose media mechanics and the modified method of discrete elements were used to study these issues. On the basis of this method, a computer program is developed, the efficiency of which is confirmed by the solving results of test activities. Numerically and on physical models, we have substantiated and confirmed by independent instrumental measurements the dependence between absolute values and orientation of elevated tectonic stresses in the area of mineral deposits and the tectonics of the surrounding endocircular structures. The work shows the relevance of this section of geotectonics from the point of the development of mineral reserves of the World Ocean bed. The following tasks are solved: increase of bearing capacity of ground anchors with flexible traction; decrease of peak loads on plate feeders of crushed ore of concentrating factories; increase of accuracy of volumetric dosers of continuous action for hard-to-flow materials; anti-erosion protection of pneumatic transport pipe bend; about the influence of cross-sectional shape and rotation speed of horizontal pipeline on the efficiency of pneumatic transport. The previously developed computer program for numerical simulation of the flow of broken ore during mining with sub-level caving and release under caved rocks has been improved and given to the mining organization. On the basis of the international cooperation results, the optimisation criterion of polydisperse media packing has been proposed.

Keywords:

geomechanics, geotectonics, bulk mechanics, method of discrete elements, computer programs, test- and applied tasks, numerical and physical modeling

Введение

Значительная часть актуальных для горного дела и строительства задач связана со взаимодействием конструкций, машин (либо их рабочего органа) с ненарушенными, а также фрагментированными горными породами, т. е. сыпучими материалами. В случае тех и других технические решения, которые бы в полной мере удовлетворили требования практики, могут быть найдены только с использованием адекватных моделей геосред, взаимодействующих с конкретными объектами, методов расчета и с опорой на результаты экспериментальных лабораторных и/или натурных исследований. Как известно [1–5], между горными породами и дискретными средами существует глубокая внутренняя связь. В ее основе лежат общие для них фундаментальные свойства – дилатансия, трение, сцепление *c* [6]. Они являются определяющими прочностные характеристики, поведение этих геоматериалов при нагружении и в целом их напряженно-деформированное состояние (НДС). Породный массив отличается от образованного сыпучим материалом с его *c*=0 лишь заполнителем межзерновых пустот, который имеет *c*>0 и иной, чем у элементов скелета, модуль упругости.

Осознание общности рассматриваемых сред привело к заключению о перспективности использования при решении связанных с ними задач такого эффективного «инструмента», к каким относится метод дискретных элементов (МДЭ) [7]. Он является вариантом метода частиц [8] и, по сравнению с другими известными, с прикладной точки зрения обладает существенными достоинствами: 1) универсальностью (применимостью для описания в целом сред со структурой); 2) способностью автоматически учитывать дилатансию – ключевое для формирования их НДС свойство; 3) отслеживать изменение НДС этих сред на допредельной и запредельной стадиях деформирования.

Проделанные в течение ряда лет с привлечением МДЭ собственные исследования привели к заключению о целесообразности модификации модели сред, используемой в его классическом варианте. Сделанные в этом направлении шаги дали положительные результаты [9]. Они же убедили в перспективности дальнейшего основывающегося на представлениях [6] развития работ по совершенствованию модели сред со структурой. В этой связи прокомментируем основные результаты, полученные в исследованиях. Они включают МДЭ, который модифицирован за счет общей для дискретных сред модели, компьютерную программу, основанную на данном его варианте, а также найденные с ее помощью и физического моделирования принципиально новые решения для ряда задач геомеханики, геотектоники и машиностроения. Статья, являясь обзорной, демонстрирует суть результатов без обсуждения исходных данных, принятых в этих задачах, а также использованных в опытах стендов, оборудования, методик и детального анализа. С ними можно ознакомиться в публикациях, приведенных в работе.

Модель среды со структурой и компьютерная программа

На рис. 1 показаны модели контактных сил взаимодействия между частицами Ω_i и Ω_j среды со структурой при *c*=0 (рис. 1 *а*) и *c*>0 (рис. 1 *б*), где *c* – сцепление на контакте.

Вариант МДЭ, включающий модель среды, приведенную на рис. 1, положен в основу компьютерной программы PM2D [10]. Она предназначена для решения в двухмерной постановке задач механики горных пород, сыпучих сред, грунтов, композитных материалов.

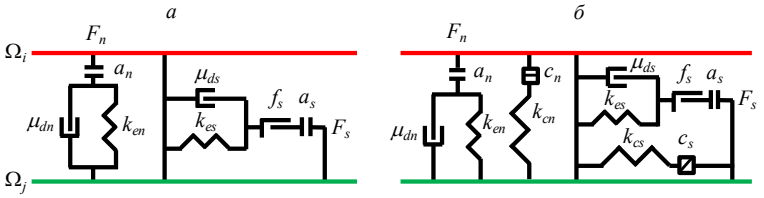


Рисунок 1. Компоненты линейной вязкоупругой модели несвязного *(а)* и связного *(б)* контактов: F_n, F_s – нормальная и касательная компоненты силы взаимодействия; a_n,a_s – установочные зазоры (installation gap) по нормали и касательной к контакту; μ_{dn}, μ_{ds} – коэффициенты вязкости по нормали и касательной к контакту; k_{en}, k_{es} – жесткость пружин по нормали и касательной к контакту; k_{cn}, k_{cs} – жесткость дополнительных пружин сцепления по нормали и касательной к контакту; f_s – коэффициент трения скольжения на контакте; c_n, c_s – компоненты сцепления по нормали и касательной к контакту.

Figure 1. Components of the linear viscoelastic model of non-cohesive *(a)* and cohesive *(б)* contacts: F_n, F_s – normal and tangential components of the interaction force; a_n,a_s – installation gaps along the normal and tangential to the contact; μ_{dn}, μ_{ds} – viscosity coefficients along the normal and tangential to the contact; k_{en}, k_{es} – stiffness of springs along the normal and tangential to the contact; k_{cn}, k_{cs} – stiffness of additional springs of adhesion along the normal and tangential to the contact; f_s – coefficient of sliding friction at the contact; c_n, c_s – components of adhesion along the normal and tangential to the contact.

Тестовые задачи

Использование программы PM2D в анализе проблем горного производства предварено проверкой ее эффективности. Сделано это с привлечением двух групп тестовых задач – квазистатических и динамических (программа ФНИ, проект № АААА-А17-117121140065-7). При их выборе приняты во внимание известность в кругах специалистов и адекватность, надежно подтвержденная результатами физических экспериментов. В первую группу вошли задачи об НДС: 1) цилиндрического образца горных пород при испытаниях по бразильской схеме; 2) породного образца, ослабленного круговым отверстием, для случая двухосного сжатия; 3) надрезанной посередине балки на двух опорах, нагруженной сосредоточенной силой; 4) сыпучего материала при выпуске из плоского сходящегося канала (рис. 2-5).

Для задач по динамическому нагружению геосред, исследование которого – предмет ближайшей перспективы, тестовыми стали задачи об НДС массива горных пород при подрывании в нем зарядов взрывчатого вещества (ВВ) (рис. 6).

Сопоставим результаты вычислений для отдельных, наиболее ярких задач с известными для них же, полученными опытным путем [11-14]. Сделаем это с использованием в основном иллюстративного материала. Для всех тестов приведем расчетную картину разрушения, которую сравним с экспериментальной. В одном из примеров пока-

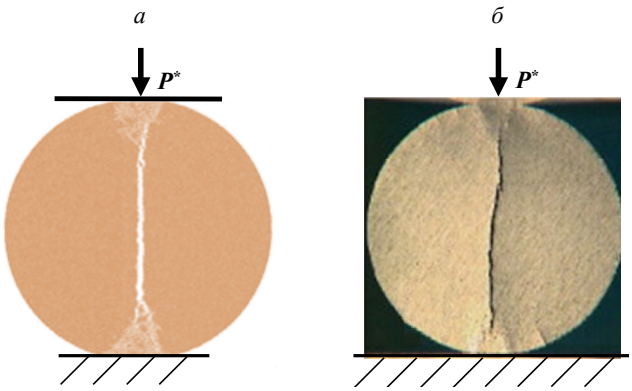


Рисунок 2. Расчетная *(а)* и экспериментальная *(б)* [11] картины разрушения образца горных пород при испытании по бразильской схеме.
Figure 2. Calculated *(а)* and experimental *(б)* [11] failure patterns of a rock sample during the Brazilian scheme test.

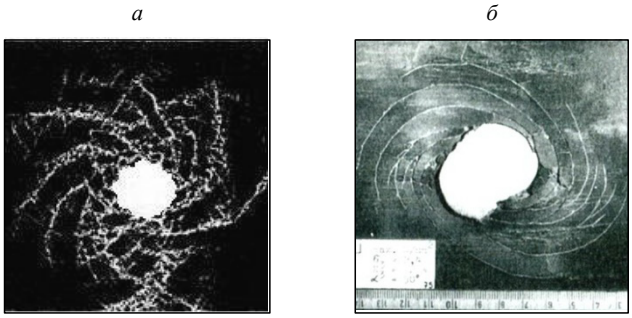


Рисунок 3. Деформированное состояние породного образца, ослабленного отверстием, при двухосном сжатии: *а, б* – результаты соответственно численного и физического [12] экспериментов.
Figure 3. Deformed condition of a rock sample, weakened by a hole, after biaxial compression: *а, б* – results of numerical and physical [12] experiments, respectively.

жем также вычисленное НДС образца на промежуточной стадии его деформирования. Такого рода «селекция» вызвана ограничениями на допустимое число рисунков в публикациях. Подрисуночные подписи – те комментарии, которых после изложенного выше для данных примеров достаточно, чтобы понять суть иллюстраций.

В свое время в работе [14] в механике сыпучих сред экспериментально обнаружен новый, на первый взгляд, неожиданный эффект. Оказалось, что с началом выпуска песка из плоского сходящегося канала, несмотря на симметрию конструкции и условий на ее внутренних границах, гравитационное течение сыпучего в емкости существенно неоднородно и асимметрично (рис. 5). Геоматериал по мере продвижения к ее выпускному отверстию системой характерных полос скольжения, развивающихся от его кромок по восстанию, разделяется на отдельные все более раздрабливаемые блоки. Решению задачи о течении сыпучих материалов в обсуждаемом канале посвящен ряд публикаций [16–18 и др.]. В данном случае результаты, полученные для нее численно (рис. 5 *а–в*), вместе с многократно воспроизведенными в опытах с песком (рис. 5 *а′–в′*) использованы в качестве теста на адекватность модели среды и программы PM2D применительно к задачам механики дискретных сред. Из сравнения деформационных картин на рис. 5 следует, что обе успешно прошли это испытание.

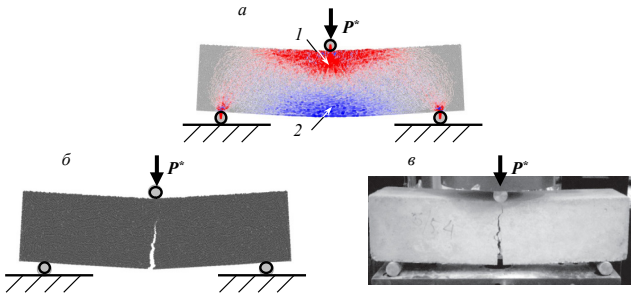


Рисунок 4. К НДС бетонной балки на двух опорах нагруженной центральной сосредоточенной силой *P**: *а* – напряженное состояние на стадии предразрушения, *1, 2* – сжимающие и растягивающие напряжения соответственно; *б, в* – расчетная и экспериментальная [13] картины разрушения.
Figure 4. To the stress-stain condition of a concrete beam on two supports loaded by a central concentrated force *P**: *а* – stress condition at the pre-fracture stage; 1, 2 - compressive and tensile stresses, correspondingly; *б, в* – design and experimental [13] patterns of fracture.

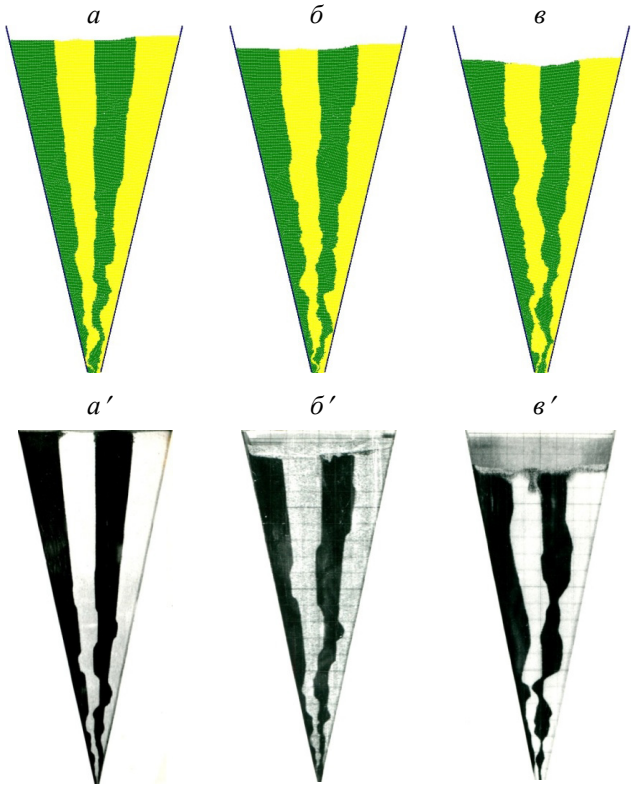


Рисунок 5. Характерные стадии деформирования сыпучего материала при асимметричном режиме гравитационного течения в плоском сходящемся канале: *а–в* – численный; *а′–в′* – физический [14] эксперименты.
Figure 5. Characteristic deformation stages of bulk material under asymmetric regime of gravitational flow in a flat converging channel: *а-в* – numerical; *а′–в′* – physical [14] experiments.

Материалы тестирования, приведенные выше, убеждают в том, что использование компьютерной программы PM2D при анализе двухмерных задач геомеханики, включая связанные с машиностроением, является гарантом адекватности найденных с ее помощью для них решений. Ниже кратко охарактеризуем ряд таких научных и инженерных геомеханических задач и прокомментируем найденные для них решения. Сделаем это, как и выше, с использованием иллюстраций, число которых, по уже отмеченной причине, ограничено. Приоритет отдадим

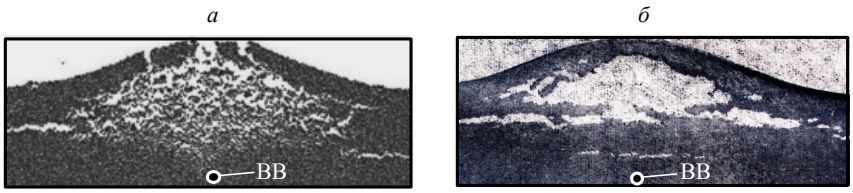


Рисунок 6. Результаты численного (а) и физического [15] (б) экспериментов по подрыванию в образцах материалов заглубленного заряда ВВ.
Figure 6. Results of numerical *(а)* and physical [15] *(б)* experiments on detonation of a buried explosive charge in material samples.

рисункам, поясняющим фундаментальные составляющие исследований.

Фундаментальные задачи геомеханики, геотектоники

Первыми покажем результаты исследований, связанные с проблемой горного давления. В труде [19] подчеркивается, что «источником, первопричиной всех проявлений горного давления при <…> разработке месторождений (полезных ископаемых) являются <…> тектонические напряжения от современных движений земной коры». Там же отмечается, что эти субгоризонтальные напряжения $\sigma_т$ сжатия много больше диктуемых гравитацией. О механизме формирования $\sigma_т$ в верхах коры «в геологической литературе высказан целый ряд гипотез, что только подчеркивает неясность природы рассматриваемого феномена» [20]. Таким образом, для антропогенной толщи Земли характерны аномально высокие значения $\sigma_т$, за которые ответственна геотектоника. Механизм их реализации неизвестен. Это, с учетом коррелируемости горного давления с тектоническими напряжениями, означает, что до конца понять его природу станет возможным лишь в том случае, если будет достигнут прогресс в понимании происхождения напряжений $\sigma_т$. Отсюда следует, что разрешение проблемы горного давления, генетически связанной с тектоникой Земли, напрямую зависит от успешного решения соответствующих геотектонических задач. Ниже рассмотрены три из них (программа ФНИ, проект № АААА-А17-117121140065-7). Две первые позволяют проследить возможные изменения в НДС массива горных пород за период с начала формирования в нем месторождения полезных ископаемых до начала его разработки.

Карты различных регионов планеты [21, 22 и др.], литературные источники [23, 24 и др.], съемки из космоса свидетельствуют, что практически вся ее суша покрыта самого разного размера кольцевыми структурами (К-структурами) или образованиями. Это указывает на их высокую тектоническую значимость. О том же говорят приуроченность к данным морфообразованиям более 75 % месторождений разнообразных полезных ископаемых [23], включая углеводороды [25] и алмазы [24], а также сейсмичности [26]. Та же принадлежность свидетельствует об эндогенной природе К-структур. Затухающая в них со временем сейсмическая активность – проявление их продолжающегося сотни миллионов лет постдегазационного залечивания, которое характеризуется гравитационной консолидацией вмещающих пород, нарушенных актами дегазации и всплывания структур [27]. Осуществляется залечивание при поддержке твердоприливной «вибрацией» и иной природы волновыми движениями литосферы. Этот процесс является нестационарным и чрезвычайно медленным даже по геологическим меркам; сопровождается изменением НДС породного массива в области кольцевых морфообразований в режимах stick-slip и крипа. В работе [28] с учетом изложенного предложена принципиально новая версия, которая объясняет развитие напряжений $\sigma_т$ в верхах земной коры тектоническими процессами, протекающими многие миллионы лет в ее залечивающихся эндогенных кольцевых структурах, в том числе осложненных месторождениями полезных ископаемых.

- В работе [29] в рамках новой гипотезы с использованием программы PM2D численно исследована эволюция НДС осложненного К-структурой породного массива с момента зарождения до начала отработки сформировавшегося в нем флюидогенного рудного месторождения. Результаты вычислений сопоставлены с материалами [30, 31], полученными для гипабиссального Капаевского месторождения магнетита при бурении и изучении его геофизическими методами, а также в [32] – экспериментально (рис. 7). Данное месторождение может рассматриваться как тектонотип множества других таких же. О механизме образования вмещающих их рудоконтролирующих структур «существуют самые противоречивые представления» [31].

Особенности деформированного состояния (ДС) массива горных пород, представленные на рис. 7 *а, б*, вместе с рассмотренными в [30–32] позволили заключить следующее. Генезис Капаевского месторождения, подобно его аналогам, является результатом взрывной, преимущественно водородной дегазации локального насыщенного флюидами глубинного очага. Одно из свидетельств этого – видимые на рис. 7 *а* радиальные разломы. Акт дегазации осуществлен с помощью всплывшей из этой очаговой области эндоэксплозивной кольцевой структуры. Сформировалось ее столбообразное сложенное брекчированным геоматериалом тело (см. рис. 7 *б*) в соответствии с закономерностями, подробно рассмотренными в [33]. Их реализация сопровождалась последовательной начиная от очага локализацией сдвигов вдоль системы конических поверхностей скольжения 1 и участков 2, развивавшейся по восстанию цилиндрической поверхности (см. рис. 7 *в*). Следствием этого стали дробление и разделение породного массива на отдельные блоки. На рис. 7 показано, что деформационные картины, полученные в опыте с песком на плоской модели (см. рис. 7 *в*), а также из решения задачи в двухмерной постановке (см. рис. 7 *г*) в принципе мало чем отличаются от картины ДС, установленной для осесимметричной ситуации на натуре (см. рис. 7 *б*), т. е. согласуются с ней качественно. Иллюстрацией на рис. 7 *д* обращено внимание на тот факт, что полосы локализованных деформаций и дилатансионного разуплотнения геоматериалов, на самом деле имеют мощность $m_l > m$ (см. рис. 7 *г*),

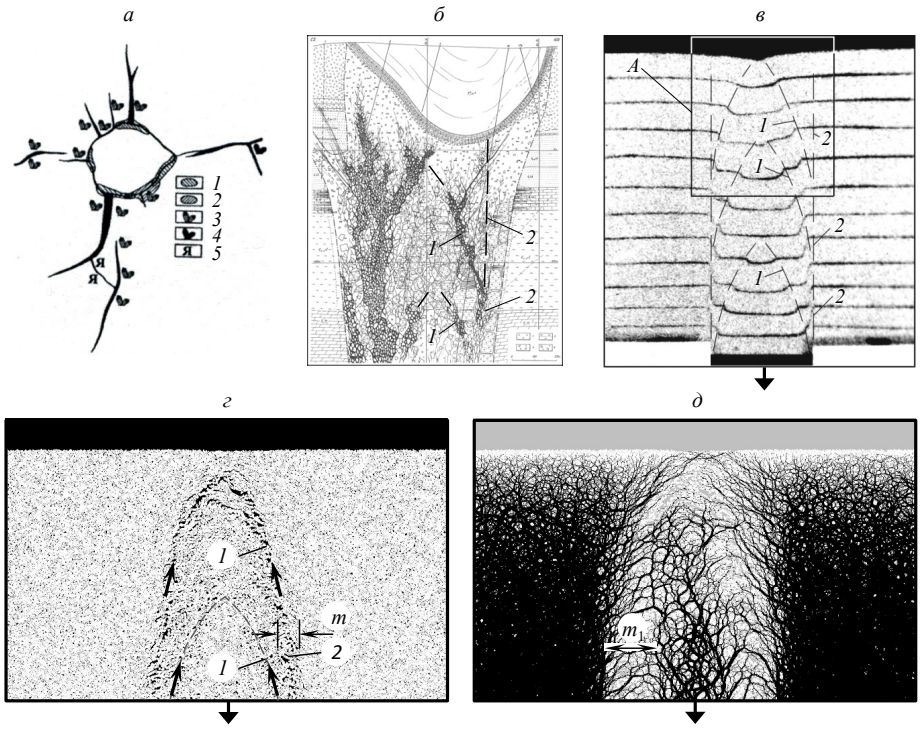


Рисунок 7. К генезису полигенных месторождений твердых полезных ископаемых: *а* – план Капаевского месторождения магнетита [31], черным выделено рудное тело, *1–5* – проявления соответственно ртути, меди, аметиста, горного хрусталя, яшмы; *б* – его центральное вертикальное сечение П-160 [30], темное – магнетит, *1* – конические полосы скольжения, *2* – участки цилиндрической полосы; *в* – результат опыта с песком [32], область *А* – аналог П-160; *г, д* – соответственно расчетные деформированное состояние и силовое поле в области образующейся К-структуры [29].

Figure 7. To the genesis of polygenic deposits of solid minerals: *а* – plan of Kapaevsky magnetite deposit [31], the ore body is highlighted in black, *1–5* – manifestations of mercury, copper, amethyst, rock crystal, jasper, respectively; *б* – its central vertical section П-160 [30], magnetite is dark-coloured, *1* – conical slip bands, *2* – sections of cylindrical band; *в* – result of the experiment with sand [32], area *A* – analogue of П-160; *г, д* – calculated deformed state and force field in the area of formed K-structure, respectively [29].

которая в опыте оказалась контрастно выраженной из-за концентрации разрывных деформаций в основном в центральной части сместителей.

Данные разупрочненные полосы, приоткрывающиеся в процессе рождения и эволюционирования К-структуры, представляют собой те единственные и уникальные каналы, которые обеспечивают миграцию к поверхности раскаленных газонасыщенных находящихся под сверхгидростатическим давлением глубинных флюидов, включая рудную магму [33]. Они перколируют с мантийных горизонтов сквозь литосферу по восстанию (см. рис. 7 *в*) под действием собственной подъемной силы, градиента давлений, твердых лунных приливов, как показано наклонными стрелками на рис. 7 *г*. Этот процесс носит, о чем уже говорилось, нестационарный характер: периодическому в ходе всплывания кольцевой структуры раскрытию поверхностей скольжения *1, 2* в массиве сопутствуют такие же акты «впрыскивания» в них снизу новых «порций» высокобарного рудосодержащего субстрата. В результате формирующееся в кольцевом морфообразовании месторождение превращается в полигенное. Его приуроченные к полосам сдвига локальные насыщенные рудным расплавом порово-трещинные раздувы превращаются в наиболее богатые полезным ископаемым залежи. Таким образом, происхождение приуроченных к эндогенным К-структурам месторождений полезных ископаемых и их напряженно-деформированное состояние определяются геотектоническими и геомеханическими процессами, которые реализуются в ходе генезиса этих эксплозивных изометричных в плане трубо- или столбообразных полигенных морфообразований.

● Прокомментируем результаты изучения изменений НДС породного массива в области эндогенной К-структуры с показанным происхождением в ходе ее поствзрывного залечивания (программа ФНИ, проект № АААА-А17-117121140065-7). Эти результаты, учитывая вероятность существования в ней месторождения, приобретают особую значимость. Именно они должны приниматься в качестве исходных данных при оценке возможных трансформаций его НДС за счет техногенного вмешательства.

Залечивание эксплозивных кольцевых морфообразований характеризуется погружением днища, носит циклический характер, протекает многие миллионы лет [27]. Спецификой каждого единичного цикла является осуществление в два характерных продиктованных дилатансией шага [33]. С привлечением PM2D исследовано изменение НДС геосреды в ходе реализации в теле эволюционирующей кольцевой структуры (детально в ее антропогенной толще) одного такого цикла. Численное моделирование показало, что напряженно-деформированное состояние слагающих ее горных пород в процессе консолидации оказывается существенно непостоянным и неоднородным (рис. 8). На рис. 8 *в* наклонная стрелка указывает на локальное поднятие поверхности в области К-структуры. Его появление – результат роста тектонических напряжений $\sigma_т$ и потери в какой-то момент времени под их действием приповерхностным породным слоем днища морфообразования устойчивости. Подобный эффект наблюдали, в частности, в каменоломнях США и Канады [19].

Результаты, полученные при решении задач в двухмерной постановке, позволили сделать следующие обобщения для трехмерных ситуаций: 1) происхождение сублатеральных тектонических напряжений $\sigma_т$ сжатия в границах кольцевых морфообразований, включая осложненные месторождениями, связано с протекающим сотни миллионов лет, подчиняясь определенным закономерностям, процессом их залечивания; 2) $\sigma_т$ зависят от прочностных и деформационных свойств пород, слагающих К-структуру и 3) больше, чем на порядок могут

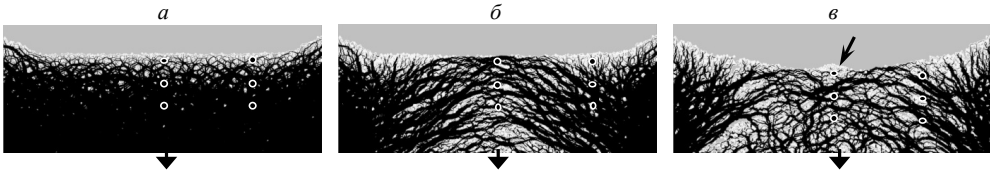


Рисунок 8. Характерные стадии НДС в пределах приповерхностной (антропогенной) толщи залечивающегося кольцевого морфообразования (силовые линии на фоне деформационных картин) [28].
Figure 8. Characteristic stages of the stress-stain state within the near-surface (anthropogenic) layer of the healing ring morpho-formation (force lines against the background of deformation patterns) [28].

превышать вертикальные напряжения от веса пород; 4) в различных областях любого из горизонтов структуры напряжения σ_T в одно и то же время существенно разные; 5) их азимутальный вектор и значения в ее границах переменные; 6) изменяются они в ходе консолидации породного массива квазистатически и/или скачком.

На рис. 9 приведена совмещенная модель рельефа и геологического строения, осложненного месторождениями удароопасного Хибинского массива [34]. Он представляет собой одноименную эндогенную кольцевую структуру с рассматриваемым генезисом. Новейший анализ ее локальных палео стресс-состояний показывает «большое разнообразие положения осей главных нормальных напряжений и лишь их частичное соответствие таковым современного поля <…> (а также) как минимум два этапа активизации с относительно автономным развитием тектоники и соответствующих полей напряжений. <…> В целом для Хибинского … массив(а) отмечена нестабильность ориентировок осей девиаторного сжатия и растяжения…» [35].

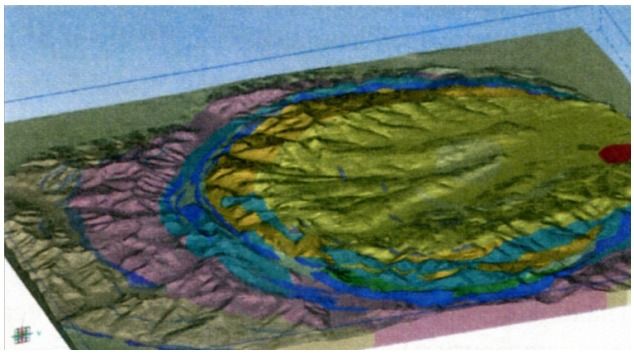


Рисунок 9. Совмещенная модель рельефа и геологического строения Хибинского массива [34].
Figure 9. Combined model of relief and geological structure of the Khibiny massif [34].

Таким образом, процитированными материалами, базирующимися на данных полевых инструментальных наблюдений над реальным геологическим объектом кольцевой формы, прямо подтверждается адекватность качественной составляющей результатов, полученных при численном в двухмерной постановке моделировании изменения НДС породного массива в границах залечивающейся К-структуры. Отмеченные выше два этапа активизации эволюционирующего Хибинского массива отвечают двум основным этапам его консолидации. Один из них связан с погружением залечивающейся структуры, другой, не рассматриваемый в работе, – с ее активизацией и инверсионным воздыманием.

В целом результаты, полученные при исследовании особенностей формирования горного давления, служат ответом на вопрос о «происхождении наблюдаемых вариаций локальных деформаций при стабильности региональных силовых воздействий» [36].

- В рамках проекта № АААА-А17-117121140065-7 программы ФНИ исследована также актуальная проблема, которая стоит в одном ряду с рассмотренными выше и касается НДС ложа Мирового океана. В последние десятилетия «центр тяжести» мировой добычи многих полезных ископаемых заметно смещается в сторону его морей. Данная тенденция понятна. Осадочный чехол их дна содержит ~$2 \cdot 10^7$ м^3 газогидратов [37], шельфы богаты далеко не до конца разведанными запасами нефти и газа [38], а срединно-океанические хребты (СОХ) осложнены черными курильщиками с их впечатляющими скоплениями массивных полисульфидов [39]. По последним данным, японскими геофизиками в акватории Пацифики обнаружено беспрецедентно гигантское месторождение крайне дефицитных редкоземельных металлов [40].

Промышленное освоение недр ложа Мирового океана наряду со специфичными трудностями морских (особенно высокоширотных) условий сталкивается со всеми теми, что преследуют извлечение ископаемых на суше. Главными, как и в ее случае, оказываются геотектонические. Для их разрешения привлекаются представления господствующей сегодня плейт-тектонической парадигмы [41]. Однако ее положения разделяются далеко не всеми исследователями [42]. Есть основания считать, что данная позиция имеет право на существование. Весомый аргумент в пользу этого – отсутствие до сих пор ясного понимания физических механизмов формирования и эволюции структурно-тектонических ловушек полезных ископаемых как на континентах, так и на шельфах, в осадочном чехле абиссалей океанов, а также вдоль их срединных хребтов. Последние являются одним из трех ключевых элементов тектоники плит. Остановимся на результатах исследований СОХ, магматические расплавы в коре которых, судя по геофизическим данным, перемещаются к поверхности по «трубообразным каналам» [43], т. е. каналам, которые подобны приведенному на рис. 7.

В работе [44] выдвинута и экспериментально обоснована версия о связи срединно-океанических поднятий и осложняющей их гребень глобальной рифтовой системы, с вертикальной тектоникой. Исследования проделаны на специальном лабораторном стенде с использованием модельных материалов. Изучены особенности деформированного состояния выполненных из этих материалов сплошных, а также ослабленных системой нарушений слоев, моделирующих литосферу планеты, при образовании и развитии в них изометричных впадин. В опытах получены основные морфоструктурные элементы срединных хребтов; с единых позиций объяснена реализа-

ция у них ряда характерных черт. Показано, что пересекающие СОХ трансформные разломы океанского дна имеют возраст больший, чем у первых, являются «пассивными» участниками их сегментации, а также формирования вдоль их простирания латеральной «ступенчатости». Эффективность выдвинутой геотектонической гипотезы подтверждается сопоставлением результатов физических экспериментов с существующими фактическими данными (рис. 10). В соответствии с ней запускается механизм образования СОХ и их рифтогенеза прогибаниями литосферы, которые развиваются на фоне ее сжатия, связанного с сокращением размеров остывающей Земли [45], и сопровождаются нагнетанием мантийного геосубстрата под растущие срединно-океанические хребты. Новые модельные представления позволяют по-новому взглянуть на механическую сторону генезиса полезных ископаемых в условиях СОХ, а также на особенности развития тектонических напряжений $\sigma_т$ и горного давления в области скоплений этих продуктов подводной гидротермальной деятельности.

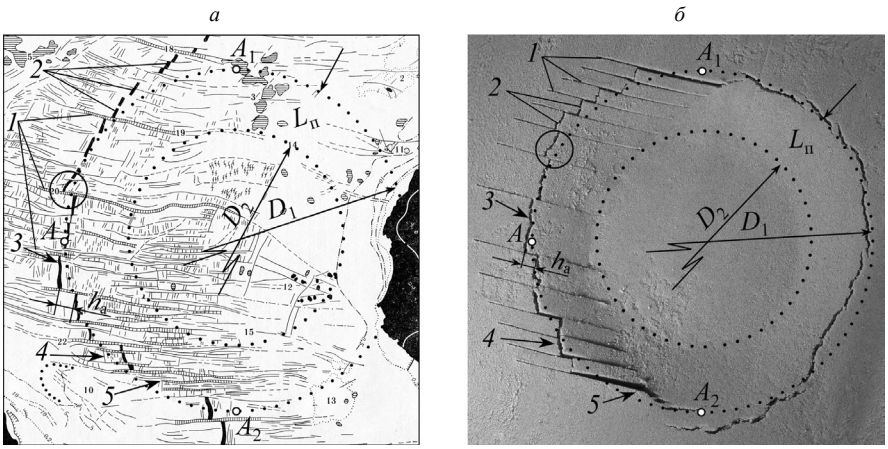


Рисунок 10. Деформационная картина дна Атлантики в области Канарской котловины (*а*; по [46] с изменениями); ДС модельного слоя после прогибания (*б*): *1* – трансформные разломы, *2* – проявления сегментации СОХ, *3-5* – общие детали деформированного состояния дна океана и модельного слоя; в кружке – область разлома Кейн.

Figure 10. Deformation pattern of the Atlantic floor in the Canary Basin region *(a)*: according to [46] with changes; design system of the model layer after deflection *(б)*: *1* – transform fractures, *2* – manifestations of segmentation of the mid-ocean ridge, *3–5* – general details of the deformed state of the ocean floor and the model layer; in circle – Kane fracture zone.

Рассмотренные результаты являются новыми фундаментальными в геомеханике, геотектонике, геологии.

Прикладные задачи

● В развитие исследований по ФЦП (соглашение с Минобрнауки РФ № 8183 от 27.07.12, проект «Разработка инновационной технологии и комплекса технических средств для крепления инженерных объектов грунтовыми анкерами с гибким тяговым элементом») в рамках проекта VIII.74.3.3. предложено новое конструктивное решение для анкеров с гибкой тягой (Э-анкеров), предусматривающее промежуточную опору естественного или искусственного происхождения. Они благодаря развитию «эйлеровского эффекта» при ее взаимодействии с этим опорным элементом приобретают повышенную несущую способность и улучшенные эксплуатационные характеристики [47]. Предназначены Э-анкеры для временного крепления откосов и бортов котлованов, включая сооружаемые под различного назначения инженерными объектами в слабых грунтах. Взаимодействие обсуждаемой анкерной конструкции с грунтовым основанием численно промоделировано с использованием программы PM2D. В условиях полигона «Зеленая горка» ИГД СО РАН проверены работоспособность Э-анкеров и оборудования для их установки в основание, а также приемы монтажа в него этих конструкций. С учетом полученных в исследованиях результатов рассмотрен вариант технологической схемы анкерования бортов котлована строящихся открытым способом станций метрополитена.

● На полотно подбункерных питателей обогатительных фабрик и питателей напольных складов со стороны их заполнителя – фрагментированных горных пород – действуют пиковые пусковые нагрузки P_{max}. В данной связи известны случаи разрушения этих транспортирующих устройств при первом же их пуске. Как парадокс воспринимается тот факт, что реализуется P_{max} даже при весьма незначительной толщине слоя перерабатываемого геоматериала в его емкостях-накопителях, т. е. при сравнительно малом вертикальном давлении на полотно питателей в статике.

В [48] численно с использованием программы PM2D, а также экспериментально на физических моделях исследовано изменение НДС раздробленной рудной массы в бункере при взаимодействии с подбункерным пластинчатым питателем на начальной и развитой стадиях его движения. Объяснен парадокс пиковой нагрузки. Обосновано, что связан он с развитием в геоматериале подбункерного узла с началом работы питателя, даже при маломощном слое геоматериала над ним, эффекта дилатансии. Показано, что абсолютное значение P_{max} зависит от физико-механических характеристик дробленой руды, конструктивных особенностей накопителя и его разгрузочного узла, а также стесненности в нем условий ее деформирования. Продемонстрирована возможность усовершенствования, с целью исключения действия P_{max} на полотно питателей, одной из традиционных схем подбункерного узла.

● В работе [49] численно и в опытах на моделях исследовано НДС раздробленных пород, заполняющих секцию напольного склада, при взаимодействии с расположенным под ней в галерее пластинчатым питателем. Показано, что известные для складских узлов разгрузки конструктивные решения не способны нейтрализовать дилатирование материала при перемещениях и, таким образом, предотвратить действие P_{max} на питатель с началом его работы. На основе результатов исследований

предложены новые технологический прием заполнения раздробленными породами напольных складов, а для узла разгрузки их секций – конструктивная схема. Экспериментально и численно подтверждено, что использование этих технических решений способно блокировать влияние дилатансии на напряженное состояние перерабатываемого сыпучего продукта и, как результат, снять актуальную для питателей напольных складов проблему пиковой нагрузки.

- В пищевой промышленности (в частности, Новосибирска и Минска) более 30 лет успешно эксплуатируются непрерывного действия объемные «Дозаторы ИГД» порошковых со слабым сцеплением материалов [50]. Разработаны устройства по инициативе СО РАН в рамках программы оказания Сибирским отделением помощи городу. Создана их конструкция на основе результатов экспериментальных исследований; до рабочего состояния доведена методом «проб и ошибок» в производственных условиях в ходе внедрения.

В связи с открывшимися перспективами расширения области применения этой проверенной временем разработки в рамках программы ФНИ (проект № АААА-А17-117122090003-2) с привлечением компьютерной программы PM2D с опорой на опытные данные численно обоснованы рациональная конструктивная схема бункера дозатора, а также принципиально новая оптимальная конструкция его узла дозирования [51, 52]. Таким образом, для рассматриваемого устройства найдено решение более совершенное, чем известные. Его использование позволяет проектировать объемные дозаторы непрерывного действия, которые способны обеспечить выполнение возлагаемой на них операции с порошками (C>0), а также мелкофракционными сыпучими материалами (C=0) с точностью, принятой для весовых систем.

- В системах трубопроводного транспорта в горнодобывающей промышленности, металлургии, нефтегазовой отрасли и т. д. воздействие твердых частиц, переносимых потоком транспортирующей фазы, приводит к интенсивному эрозионному износу изгибов труб [53–55]. Эрозионные повреждения в некоторых случаях могут быть причиной катастрофических и опасных происшествий для персонала, оборудования и окружающей среды [56]. С привлечением численного и физического моделирования методом дискретных элементов на лабораторном макете [57] обоснован вариант противоэрозионной защиты изгиба пневмотранспортного трубопровода путем установки наклонных пластин на внутренней поверхности изгиба (рис. 11). Транспортируемые частицы, попадая в ловушки между пластинами и поверхностью трубы, образуют защитный футерующий слой, препятствующий развитию эрозии. Установлены рациональные количество, геометрические параметры и координаты размещения пластин, обеспечивающие эффективную защиту изгиба от эрозионного износа.

- В технологиях проходки в горных породах и грунтах горизонтальных скважин с пневматическим выносом продуктов разрушения по центральному вращающемуся каналу возникает проблема неэффективного транспорта буровой мелочи. Это может приводить к блокировке шламотранспортной магистрали и остановке процесса проходки. Такие осложнения могут возникать, в частности, при бурении в угольных пластах дегазационных скважин с обратной циркуляцией воздуха и вакуумным отбором проб, при расширении грунтовых скважин с напорным или вакуумным шламотранспортом [58–60] и т. п.

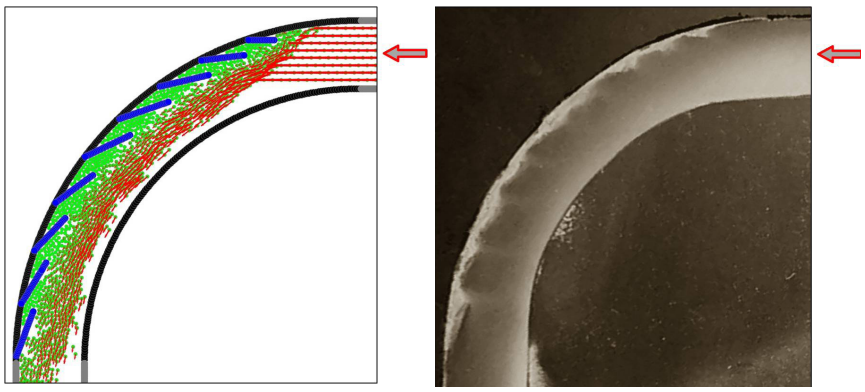
С привлечением физического и численного методом дискретных элементов моделирования (рис. 12) впервые показано, что для транспорта частиц по вращающемуся вокруг продольной оси трубопроводу наиболее выгодны не круглая, а эллиптическая или прямоугольная форма его поперечного сечения с соотношением размеров по осям 1 : 2. Для этих форм при оптимальной скорости вращения во взвешенном состоянии находится наибольшее количество частиц [61]. За счет этого концентрация транспортируемого материала в воздушном потоке увеличивается, а необходимый расход воздуха уменьшается. В итоге процесс удаления буровой мелочи улучшается и повышается эффективность проходки горизонтальных скважин.

Результаты сотрудничества с организациями страны и международного

- Разработчиками с целью апробации и получения экспертной оценки консалтинговой компании «СПб-Гипрошахт» передана компьютерная программа SideDraw. Предназначена она для численного моделирования гравитационного течения отбитой руды в системе добычи с подэтажным обрушением и выпуском под обрушенными породами. Создана программа в ИГД СО РАН на основе результатов [62, 63], полученных в ходе совместных исследований с Техническим университетом Лулео (Швеция) в рамках национальной программы «Горное дело 2000» (Mining 2000) этой страны. Результаты [там же] использованы также шведской стороной при обосновании Программ 2013 и 2016 гг. [64–66] стратегических исследований и инноваций шведской горно-металлургической промышленности (Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry), ориентированных на период до 2030 г.

- Согласно отзыву компании «СПб-Гипрошахт», программа SideDraw была привлечена для «…моделирования технологий действующих рудников <…>, например, на подземном руднике ОАО "Олкон" ПАО "Северсталь" <…>, а также для проверочного моделирования проектной технологии», которая совместно с зарубежными партнерами разработана «СПб-Гипрошахт». Специалисты компании пришли к заключению об «универсальности <…> и достаточности программы SideDraw <…> для принятия обоснованных решений по конструированию системы добычи».

- В 2018 г. в рамках совместного инициированного и профинансированного Корейским институтом строительных технологий международного проекта «МДЭ-подходы к оптимизации упаковки полидисперсного зернистого материала и содержания импрегнированного полипропиленом мультифиламентного стекловолокна в горячей асфальтной смеси» предложены и численно с привлечением программы PM2D обоснованы новый в до-



а *б*

Рисунок 11. Самофутеровка изгиба трубопровода транспортируемыми частицами: *а)* численная модель; *б)* физический эксперимент. Стрелкой показано направление потока воздуха.

Figure 11. Self-fouling of a pipeline bend by transported particles: *а)* – numerical model; *б)* – physical experiment. The arrow shows the direction of air flow.

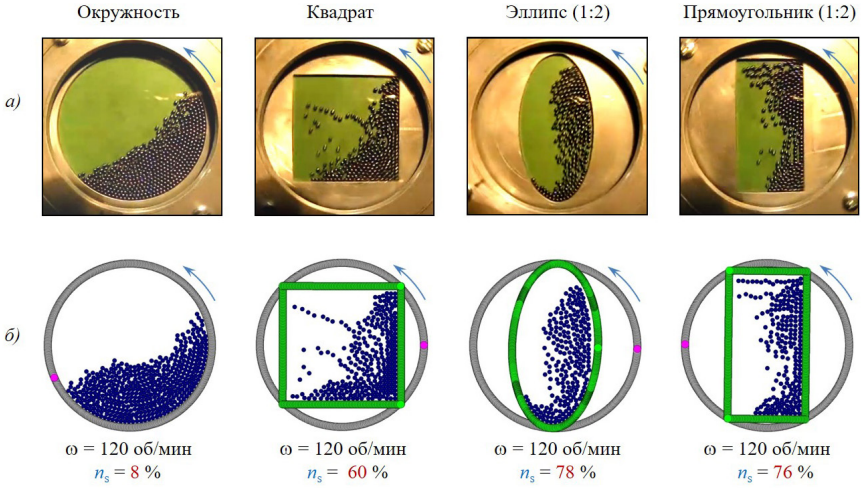


Рисунок 12. Картины распределения частиц в поперечном сечении трубопровода при его вращении с оптимальной для данной формы угловой скоростью *ω*: *а*) физический эксперимент, *б*) расчет; n_s – доля взвешенных частиц в просвете трубопровода.

Figure 12. Distribution patterns of particles in the pipeline cross-section at its rotation with optimal for this shape angular velocity *ω*: *а)* physical experiment, *б)* calculation; n_s – percent of suspended particles in the pipeline clean space.

рожном строительстве эффективный критерий оптимизации упаковки полидисперсных сред – ее максимальная учитывающая их кусковатость структурная прочность [6], а также пути достижения такой прочности. Полученным в ИГД решениям корейской стороной дана высокая оценка. Развитие работ в этом направлении актуально для разработки составов дорожных покрытий, бетонов и других строительных, а также композитных материалов, в горном деле – для создания различных с наперед заданными характеристиками видов закладки и искусственных целиков. Это свидетельствует о фундаментальном характере и уже полученных результатов, и планируемых новых.

Заключение

Таким образом, применительно к методу дискретных элементов усовершенствована модель среды со структурой, и на его основе разработана компьютерная программа. Она предназначена для решения двумерных квазистатических и динамических задач о напряженно-деформированном состоянии горных пород, грунтов, сыпучих и композитных материалов. С использованием программы и физического моделирования изучены актуальные для горного дела и геотектоники проблемы и задачи. При их решении получены принципиально новые геомеханические, геотектонические научные, а также прикладного характера результаты. Адекватность решений подтверждена материалами тестирования, данными лабораторных опытов и/или натурных наблюдений и измерений.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Brace, W. F. Dilatancy in the fracture of crystalline rock / W. F. Brace, B. W. Paulding, C. Scholz // Journal of Geophysical Research. – 1966. – Vol. 71. – № 16. – P. 3939–3952.
2. Шемякин, Е. И. Некоторые модели деформирования горных пород и грунтов / Е. И. Шемякин, А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский // Разрушение и деформирование твердой среды взрывом. – М.: Недра, 1976. – С. 204–208.
3. Николаевский, В. Н. Обзор: земная кора, дилатансия и землетрясения / В. Н. Николаевский // Механика. Вып. 28. Новое в зарубежной науке. – М.: Мир, 1982. – С.133–215.
4. Садовский, М. А. Избранные труды. Геофизика и физика взрыва / М. А. Садовский. – М.: Наука, 2004. – 440 с.
5. Гольдин, С. В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения / С. В. Гольдин // Физика Земли. – 2004. – № 10. – С. 37–54.
6. Ревуженко, А. Ф. О структурно-дилатансионной прочности горных пород / А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин // ДАН СССР. – 1989. – Т. 305, № 5. – С. 1077–1080.
7. Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29. – P. 47–65.
8. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М.: Мир, 1987. – 640 с.
9. Хан, Г. Н. О несимметричном режиме разрушения массива горных пород в окрестности полости // Физическая мезомеханика / Г. Н. Хан. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 109–114.
10. Хан, Г. Н. PM2D. – Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615760 / Г. Н. Хан, А. Л. Ланис. – 2015.

11. Литвинский, Г. Г. Исследование влияния формы образца при испытаниях на раскол / Г. Г. Литвинский, Ю. Н. Бикяшева / Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск, 2013. – Вып. 39. – С. 44–51.
12. Zischinsky, U. Effects of rock bolts in tunnelling. Anchor in theory and practice / U. Zischinsky // Proceedings of the International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg. Austria. 9–10 October 1995. – Widmann (ed.). Rotterdam, Balkema, 1995. – P. 147–154.
13. Богданова, Е. Р. Экспериментальное исследование бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй / Е. Р. Богданова // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2015. – № 2. – С. 91–98.
14. Ревуженко, А. Ф. О несимметрии пластического течения в сходящемся симметричном канале / А. Ф. Ревуженко, С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин // ФТПРПИ. – 1977. – № 3. – С. 3–9.
15. Никифоровский, В. С. Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 272 с.
16. Бабаков, В. Кинематически возможное несимметричное поле скоростей в задаче о плоском сходящемся канале / В. Бабаков, А. Шиманская // ФТПРПИ. – 2011. – № 6. – С. 30–34.
17. Клишин, С. В. Численное моделирование выпуска раздробленного материала методами дискретных элементов и клеточных автоматов / С. В. Клишин, С. В. Лавриков, А. Ф. Ревуженко / Труды XX Всероссийской научной конференции «Геодинамика и напряженное состояние недр Земли» (7–11 октября 2013 г.). – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2013. – С. 208–215.
18. Бушманова, О. П. Численное моделирование процесса деформирования материала в сходящемся канале в условиях возникновения линий локализации сдвигов / О. П. Бушманова, С. Б. Бушманов // ФТПРПИ. – 2009. – № 4. – С. 33–38.
19. Айтматов, И. Т. Методы и результаты изучения напряженного состояния скальных массивов и создание на их основе эффективных способов управления горным давлением при подземной разработке руд / И. Т. Айтматов, В. И. Ахматов, В. И. Борщ-Компониец // ФТПРПИ. – 1987. – № 4. – С. 3–22.
20. Курленя, М. В. Напряженное состояние породных массивов в верхних слоях земной коры / М. В. Курленя, Г. И. Кулаков // ФТПРПИ. – 1998. – № 3. – С. 3–9.
21. Космогеологическая карта линейных и кольцевых структур территории СССР / гл. ред. А. Д. Щеглов. – М.: Мингео СССР, 1979.
22. Космогеологическая карта дочетвертичных образований Северо-Восточной части Балтийского щита / под. ред. О. Я. Даркшевича. – М.: Мингео СССР, 1987.
23. Космическая информация в геологии / под ред. академиков: А. В. Пейве, А. В. Сидоренко, А. Л. Яншина [и др.]. – М.: Наука, 1983. – 534 с.
24. Серокуров, Ю. Н. Космические методы при прогнозе и поисках месторождений алмазов / Ю. Н. Серокуров, В. Д. Колмыков, В. М. Зуев. – М.: Недра, 2001. – 198 с.
25. Смирнова, М. Н. Нефтегазоносные кольцевые структуры и научно-методические аспекты их изучения / М. Н. Смирнова // Геология нефти и газа. – 1997. – № 9. – С. 51-55.
26. Стажевский, С. Б. Кольцевые структуры как источник сейсмичности / С. Б. Стажевский // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 23–32.
27. Стажевский, С. Б. Механика становления и развития некоторых морфоструктур Земли: Ч. I. К происхождению и эволюции Патомского кратера / С. Б. Стажевский // ФТПРПИ. – 2011. – № 4. – С. 23-39.
28. Стажевский, С. Б. О связи повышенных тектонических напряжений с эндогенными кольцевыми структурами / С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // ФТПРПИ. – 2017. – № 6. – С. 50–60.
29. Стажевский, С. Б. Об изменениях напряженно-деформированного состояния месторождений полезных ископаемых / С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 2, № 2. – С. 157–162.
30. Фон-дер-Флаасс, Г. С. Структура Нерюндинского и Капаевского месторождений магнетита (Ангарская железорудная провинция) / Г. С. Фон-дер-Флаасс // Геология и геофизика. – 1977. – № 6. – С. 63–69.
31. Амиржанов, А. А. Признаки глубинной дегазации в рудоносных диатремах Ангарской провинции: материалы Всероссийской конференции «Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть, газ и их парагенезы» (22–25 апреля 2008 г.) / А. А. Амиржанов. – М.: ГЕОС, 2008. – С. 29–32.
32. Стажевский, С. Б. Кольцевые структуры – вклад в генезис и напряженно-деформированное состояние месторождения полезных ископаемых / С. Б. Стажевский // ФТПРПИ. – 2004. – № 3. – С. 45–51.
33. Стажевский, С. Б. Кольцевые структуры в эволюции небесных тел Солнечной системы / С. Б. Стажевский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. – 106 с.
34. Лукичев, С. В. Информационная поддержка освоения и эксплуатации месторождений Хибинского горнорудного района / С. В. Лукичев, О. В. Наговицын // ФТПРПИ. – 2012. – № 6. – С. 98–105.
35. Сим, Л. А. Напряженно-деформированное состояние Хибинского и Ковдорского массивов. Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием (6–9 июня 2017 г.) / Л. А. Сим, А. В. Маринин, Д. В. Жиров. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 91.
36. Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 78–103.
37. Геологический словарь. Т. 1 / под ред. О. В. Петрова. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2010. – 432 с.

38. Мировой океан. Т. 1. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане / под ред. Л. И. Лобковского. – М.: Научный мир, 2013. – 644 с.
39. Дубинин, Е. П. Океанический рифтогенез / Е. П. Дубинин, С. А. Ушаков. – М.: ГЕОС, 2001. – 293 с.
40. Takaya, Y. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements / Y. Takaya, K. Yasukawa, T. Kawasaki [et al.] // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – Article number: 5763.
41. Ле Пишон, К. С. Спрединг океанского дна и дрейф континентов. Новая глобальная тектоника / К. С. Ле Пишон – М.: Мир, 1974. – С. 93–132.
42. Спорные аспекты тектоники плит и возможные альтернативы / под ред. В. Н. Шолпо. – М.: ОИФЗ РАН, 2002. – 236 с.
43. Magde, L. Crustal magma plumbing within a segment of the Mid-Atlantic Ridge, 35°N / L. Magde, A. Barclay, D. Toomey [et al.] // Earth and Planetary Science Letters. – 2000. – Vol. 175. – № 1–2. – P. 55–67.
44. Стажевский, С. Б. О триггерах и механизме океанского рифтогенеза. Триггерные эффекты в геосистемах: тезисы докладов IV Всероссийской конференции с международным участием (6–9 июня 2017 г.) / С. Б. Стажевский. – М.: ГЕОС, 2017. – С. 95–96.
45. Хаин, В. Е. Геотектоника с основами геодинамики / В. Е. Хаин, М. Г. Ломизе. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.
46. Мазарович, А. О. Разломы северной части Центральной Атлантики / А. О. Мазарович // Геотектоника. – 1986. – № 5. – С. 25–34.
47. Крамаджян, А. А. О повышении несущей способности грунтовых анкеров с гибкой тягой / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский [и др.] // ФТПРПИ. – 2014.– № 6. – С. 96-106.
48. Крамаджян, А. А. О механизме формирования пиковой нагрузки на подбункерные питатели обогатительных фабрик / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский [и др.] // ФТПРПИ. – 2015.– № 6. – С. 19-27.
49. Крамаджян, А. А. О пике нагрузок на питатели напольных складов полезных ископаемых / А. А. Крамаджян, Е. П. Русин, С. Б. Стажевский [и др.] // ФТПРПИ.– 2016.– № 5. – С. 30-39.
50. А.с. СССР № 1557033. Дозатор сыпучих материалов / С. Б. Стажевский, Е. И. Шемякин, А. А. Крамаджян [и др.]. // Опубл. в БИ. – 1990. – № 14.
51. Русин, Е. П. К обоснованию конструкции бункера-накопителя для высокоточного объемного дозатора / Е. П. Русин, Г. Н. Хан // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2020. – Т. 2. – С. 173–179.
52. Русин, Е. П. Высокоточный объемный дозатор порошковых материалов / Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // Прикладная механика и техническая физика, 2022. – Т. 63, № 3. – С. 173-182.
53. Смолдырев, А. Е. Гидравлический и пневматический транспорт в металлургии и горном деле / А. Е. Смолдырев. – М.: Металлургия, 1967. – 357 с.
54. Venkatesh, E. S. Erosion damage in oil and gas wells. Paper No. SPE-15183-MS – SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Billings, Montana, USA, May 19-21, 1986. – SPE, 1986. – P. 489–500.
55. Изюмченко, Д. В. Эксплуатация газовых скважин в условиях активного водо- и пескопроявления / Д. В Изюмченко, Е. В. Мандрик, С. А. Мельников [и др.] // Научно-технический сборник Вести газовой науки. – 2018. – Т. 33, № 1. – С. 235–242.
56. Barton, N. A. Erosion in elbows in hydrocarbon production systems. Review document. Research Report 115 / N. A. Barton. – Health & Safety Executive. – East Kilbride, Glasgow, UK: TÜV NEL Limited, 2003. – 35 p.
57. Русин, Е. П. К разработке стенда для моделирования элементов систем переработки зернистых материалов / Е. П. Русин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 99–107.
58. Han, X. Pressure drop characteristics of reverse circulation pneumatic cuttings removal during coal seam drilling / X. Han, S. Song, J. Li // Science Progress. – 2020. – Vol. 103, № 2. – P. 1–20.
59. Данилов, Б. Б. Определение условий транспортирования пластичного грунта сжатым воздухом по горизонтальному трубопроводу при бурении скважин / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий, Е. Н. Шер // ФТПРПИ. – 2014. – № 3. – С. 66–74.
60. Данилов, Б. Б. Определение длины горизонтальной пневмотранспортной магистрали бурового станка для удаления шлама разрежением / Б. Б. Данилов, Б. Н. Смоляницкий // ФТПРПИ. – 2016. – № 4. – С. 80–86.
61. Хан, Г. Н. О влиянии формы сечения и скорости вращения горизонтального трубопровода на эффективность транспортирования твердых частиц / Г. Н. Хан, Е. П. Русин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2023. – Т. 2, № 1. – С. 12-17.
62. Stazhevsky, S. B., Lindqvist, P. A. (Eds.). Gravity flow of disrupted rock. Final report. – Luleå, Sweden: Luleå University of Technology; Novosibirsk, Russian Federation: Institute of Mining. – 1995.
63. Стажевский, С. Б. Об особенностях течения раздробленных горных пород при добыче руд с подэтажным обрушением / С. Б. Стажевский // ФТПРПИ. – 1996. – № 5. – С. 72–89.
64. Lindqvist, P.-A. Sustainable mining and innovation for the future – research, development and innovation program. August 2012 / P.-A. Lindqvist. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre, Luleå University of Technology, 2012. – 51 p.
65. Björkman, B., Bäckblom, G., Greberg, J., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). April 2013. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2013. – 104 p.
66. Greberg, J., Andersson, C., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). 2016. - Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2016. – 120 p.

References

1. Brace, W. F. Dilatancy in the fracture of crystalline rock / W. F. Brace, B. W. Paulding, C. Scholz // Journal of Geophysical Research. – 1966. – Vol. 71. – № 16. – P. 3939–3952.

2. Shemyakin, E. I. Nekotorye modeli deformirovaniya gornyh porod i gruntov [Some models of deformation of rocks and grounds] / E. I. Shemyakin, A. F. Revuzhenko, S. B. Stazhevsky // Razrushenie i deformirovanie tverdoj sredy vzryvom [Destruction and Deformation of Solid Medium by Explosion]. – M.: Nedra, 1976. – P. 204–208.
3. Nikolaevsky, V. N. Obzor: zemnaya kora, dilatansiya i zemletryaseniya [Review: Earth crust, dilatancy and earthquakes] / V. N. Nikolaevsky // Mekhanika. Vyp. 28. Novoe v zarubezhnoj nauke [Mechanics. Iss. 28. New in Foreign Science]. – M.: Mir, 1982. – P. 133–215.
4. Sadovsky, M. A. Izbrannye trudy. Geofizika i fizika vzryva [Selected works. Geophysics and physics of explosion] / M. A. Sadovsky. – M.: Nauka, 2004. – 440 p.
5. Goldin, S. V. Dilatansiya, pereupakovka i zemletryaseniya [Dilatancy, repacking and earthquakes] / S. V. Goldin // Fizika Zemli [Physics of the Earth]. – 2004. – № 10. – P. 37–54.
6. Revuzhenko, A. F. O strukturno-dilatansionnoj prochnosti gornyh porod [About structural-dilatancy strength of rocks] / A. F. Revuzhenko, S. B. Stazhevsky, E. I. Shemyakin // DAN USSR. – 1989. – Vol. 305, № 5. – P. 1077–1080.
7. Cundall, P. A. A discrete numerical model for granular assemblies / P. A. Cundall, O. D. L. Strack // Geotechnique. – 1979. – Vol. 29. – P. 47–65.
8. Hockney, R. Chislennoe modelirovanie metodom chastic [Numerical modelling by particle method] / R. Hockney, J. Eastwood. – M.: Mir, 1987. – 640 p.
9. Khan, G. N. O nesimmetrichnom rezhime razrusheniya massiva gornyh porod v okrestnosti polosti [About the asymmetric fracture mode of the rock massif in the vicinity of a cavity // Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics] / G. N. Khan. – 2008. – Vol. 11, № 1. – P. 109–114.
10. Khan, G. N. PM2D. – Svidetelstvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM № 2015615760 [PM2D. - Certificate of state registration of the computer program № 2015615760] / G. N. Khan, A. L. Lanis. – 2015.
11. Litvinsky, G. G. Investigation on the influence of the sample's shape during splitting tests / G. G. Litvinsky, Y. N. Bikyasheva // Collection of Scientific Papers of the Donbass State Technical University. – 2013. – Vol. 39. – P. 44–51.
12. Zischinsky, U. Effects of rock bolts in tunnelling. Anchor in theory and practice / U. Zischinsky // Proceedings of the International Symposium on Anchors in Theory and Practice. Salzburg. Austria. 9–10 October 1995. – Widmann (ed.). Rotterdam, Balkema, 1995. – P. 147–154.
13. Bogdanova, E. R. Eksperimentalnoe issledovanie betona, dispersno armirovannogo sinteticheskoj polipropilenovoj fibroj [Experimental study of concrete, reinforced with synthetic polyropylene fibre] / E. R. Bogdanova // Proceedings of the Petersburg University of Railway Engineering. – 2015. – № 2. – P. 91–98.
14. Revuzhenko, A. F. O nesimmetrii plasticheskogo techeniya v skhodyashchemsya simmetrichnom kanale [About the asymmetry of plastic flow in a converging symmetrical channel] / A. F. Revuzhenko, S. B. Stazhevskiy, E. I. Shemyakin // FTPRPI. – 1977. – № 3. – P. 3–9.
15. Nikiforovsky, V. S. Dinamicheskoe razrushenie tverdyh tel [Dynamic destruction of solid bodies] / V. S. Nikiforovsky, E. I. Shemyakin. – Novosibirsk: Nauka, 1979. – 272 p.
16. Babakov, V. Kinematicheski vozmozhnoe nesimmetrichnoe pole skorostej v zadache o ploskom skhodyashchemsya kanale [Kinematically possible asymmetric velocity field in the problem about a flat converging channel] / V. Babakov, A. Shimanskaya // FTPRPI. – 2011. – № 6. – P. 30–34.
17. Klishin, S. V. Chislennoe modelirovanie vypuska razdroblennogo materiala metodami diskretnyh elementov i kletochnyh avtomatov [Numerical simulation of the release of split material by methods of discrete elements and cellular automata] / S. V. Klishin, S. V. Lavrikov, A. F. Revuzhenko / Proceedings of the XX All-Russian Scientific Conference 'Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior' (October 7–11, 2013). – Novosibirsk: SB RAS, 2013. – P. 208–215.
18. Bushmanova, O. P. Chislennoe modelirovanie processa deformirovaniya materiala v skhodyashchemsya kanale v usloviyah vozniknoveniya linij lokalizacii sdvigov [Numerical modeling of the process of material's deformation in a converging channel in the conditions of shear-fault localisation lines] / O. P. Bushmanova, S. B. Bushmanov // FTPRPI. – 2009. – № 4. – P. 33–38.
19. Aitmatov, I. T. Metody i rezultaty izucheniya napryazhennogo sostoyaniya skalnyh massivov i sozdanie na ih osnove effektivnyh sposobov upravleniya gornym davleniem pri podzemnoj razrabotke rud [Methods and results of studying the stressed state of rock massifs and creating effective methods on their basis for controlling the mountain pressure during underground ore development] / I. T. Aitmatov, V. I. Akhmatov, V. I. Borsch-Komponyets [et al.] // FTPRPI. – 1987. – № 4. – P. 3–22.
20. Kurlenya, M. V. Napryazhennoe sostoyanie porodnyh massivov v verhnih sloyah zemnoj kory [Stress state of rock massifs in the upper layers of the Earth's crust] / M. V. Kurlenya, G. I. Kulakov // FTPRPI. – 1998. – № 3. – P. 3–9.
21. Kosmogeologicheskaya karta linejnyh i kolcevyh struktur territorii SSSR [Cosmogeological map of linear and ring structures of the USSR territory]. – M.: Ministry of Geology of the USSR, 1979.
22. Kosmogeologicheskaya karta dochetvertichnyh obrazovanij Severo-Vostochnoj chasti Baltijskogo shchita [Cosmogeological map of pre-Quaternary formations in the North-Eastern part of the Baltic Shield]. – M.: Ministry of Geology of the USSR, 1987.
23. Kosmicheskaya informaciya v geologii [Space information in geology] / ed. by academicians: A. V. Peive, A. V. Sidorenko, A. L. Yanshin [et al.]. - Moscow: Nauka, 1983. – 534 p.
24. Serokurov, Yu. N. Kosmicheskie metody pri prognoze i poiskah mestorozhdenij almazov [Space methods in forecasting and prospecting diamond deposits] / Yu. N. Serokurov, V. D. Kolmykov, V. M. Zuev. – M.: Nedra, 2001. – 198 p.
25. Smirnova, M. N. Neftegazonosnye kolcevye struktury i nauchno-metodicheskie aspekty ih izucheniya [Oil and

gas bearing ring structures and scientific-methodological aspects of their study] / M. N. Smirnova // Geologiya nefti i gaza [Oil and Gas Geology]. – 1997. – № 9. – P. 51–55.
26. Stazhevsky, S. B. Kolcevye struktury kak istochnik sejsmichnosti [Ring structures as a source of seismicity] / S. B. Stazhevsky // Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]. – 2006. – Vol. 9, № 1. – P. 23–32.
27. Stazhevsky, S. B. Mekhanika stanovleniya i razvitiya nekotoryh morfostruktur Zemli: Ch. I. K proiskhozhdeniyu i evolyucii Patomskogo kratera [Mechanics of formation and development of some morphostructures of the Earth: Part I. To the origin and evolution of the Patom crater] / S. B. Stazhevsky // FTPRPI. – 2011. – № 4. – P. 23–39.
28. Stazhevsky, S. B. O svyazi povyshennyh tektonicheskih napryazhenij s endogennymi kolcevymi strukturami [On the dependence of the increased tectonic stresses with endogenous ring structures] / S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // FTPRPI. – 2017. – № 6. – P. 50–60.
29. Stazhevsky, S. B. Ob izmeneniyah napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya mestorozhdenij poleznyh iskopaemyh [About changes in the stress-strain state of mineral deposits] / S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // Fundamentalnye i prikladnye voprosy gornyh nauk [Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences]. – 2017. – Vol. 2, № 2. – P. 157–162.
30. Von-der-Flaass, G. S. Struktura Neryundinskogo i Kapaevskogo mestorozhdenij magnetita (Angarskaya zheleznorudnaya provinciya) [Structure of the Neryunda and Kapaevo magnetite deposits (Angara iron-ore province) / G. S. Von-der-Flaass // Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]. – 1977. – № 6. – P. 63–69.
31. Amirzhanov, A. A. Priznaki glubinnoj degazacii v rudonosnyh diatremah Angarskoj provincii [Signs of deep degassing in ore-bearing diatremes of the Angarsk province]: Materials of the All-Russian Conference 'Degassing of the Earth: Geodynamics, Geofluids, Oil, Gas and their Parageneses' (April 22–25, 2008) / A. A. Amirzhanov. – M.: GEOS, 2008. – P. 29–32.
32. Stazhevsky, S. B. Kolcevye struktury – vklad v genezis i napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie mestorozhdeniya poleznyh iskopaemyh [Ring structures – contribution to the genesis and stress-strain state of mineral deposit] / S. B. Stazhevsky // FTPRPI. – 2004. – № 3. – P. 45–51.
33. Stazhevsky, S. B. Kolcevye struktury v evolyucii nebesnyh tel Solnechnoj sistemy [Ring structures in the evolution of celestial bodies of the Solar System] / S. B. Stazhevsky. – Novosibirsk: SB RAS, 1998. – 106 p.
34. Lukichev, S. V. Informacionnaya podderzhka osvoeniya i ekspluatacii mestorozhdenij Hibinskogo gornorudnogo rajona [Information support of development and exploitation of deposits of the Khibiny mining district] / S. V. Lukichev, O. V. Nagovitsyn // FTPRPI. – 2012. – № 6. – P. 98–105.
35. Sim, L. A. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie Hibinskogo i Kovdorskogo massivov. Triggernye effekty v geosistemah [Stress-strain state of the Khibiny and Kovdor massifs. Trigger effects in geosystems]: Abstracts of IV All-Russian Conference with International Participation (June 6–9, 2017) / L. A. Sim, A. V. Marinin, D. V. Zhirov. – M.: GEOS, 2017. – P. 91.
36. Kuzmin, Yu. O. Sovremennaya geodinamika: ot dvizhenij zemnoj kory do monitoringa otvetstvennyh obyektov [Modern geodynamics: from the movements of the Earth's crust to the monitoring of critical objects] / Yu. O. Kuzmin // Fizika Zemli [Earth's Physics]. – 2019. – № 1. – P. 78–103.
37. Geologicheskiy slovar [Geological dictionary]. Vol. 1. – SPb.: VSEGEI, 2010. – 432 p.
38. Mirovoj okean. T. 1. Geologiya i tektonika okeana. Katastroficheskie yavleniya v okeane [World ocean. Vol. 1. Geology and ocean tectonics. Katastrophic phenomena in the ocean] / ed. by L. I. Lobkovsky. – M.: Nauchny Mir, 2013. – 644 p.
39. Dubinin, E. P. Okeanicheskiy riftogenez [Oceanic riftogenesis] / E. P. Dubinin, S. A. Ushakov. – M.: GEOS, 2001. – 293 p.
40. Takaya, Y. The tremendous potential of deep-sea mud as a source of rare-earth elements / Y. Takaya, K. Yasukawa, T. Kawasaki [et al.] // Scientific Reports. – 2018. – Vol. 8. – № 1. – Article number: 5763.
41. Le Pichon, K. S. Spreding okeanskogo dna i drejf kontinentov. Novaya globalnaya tektonika [Spreading of the ocean floor and drift of continents. New global tectonics] / K. S. Le Pichon. – M.: Mir, 1974. – P. 93–132.
42. Spornye aspekty tektoniki plit i vozmozhnye alternativy [Disputable aspects of plate tectonics and possible alternatives]. – M.: OIFZ RAN, 2002. – 236 p.
43. Magde, L. Crustal magma plumbing within a segment of the Mid-Atlantic Ridge, 35°N / L. Magde, A. Barclay, D. Toomey [et al.] // Earth and Planetary Science Letters. – 2000. – Vol. 175. – № 1–2. – P. 55–67.
44. Stazhevsky, S. B. O triggerah i mekhanizme okeanskogo riftogeneza. Triggernye effekty v geosistemah [About triggers and mechanism of oceanic riftogenesis. Trigger effects in geosystems]: Abstracts of the IV All-Russian Conference with International Participation (June 6–9, 2017) / S. B. Stazhevsky. – M.: GEOS, 2017. – P. 95–96.
45. Khain, V. E. Geotektonika s osnovami geodinamiki [Geotectonics with the basics of geodynamics] / V. E. Khain, M. G. Lomise. – M.: KDU, 2005. – 560 p.
46. Mazarovich, A. O. Razlomy severnoj chasti Centralnoj Atlantiki [Faults of the northern part of the Central Atlantic] / A. O. Mazarovich // Geotektonika [Geotectonics]. – 1986. – № 5. – P. 25–34.
47. Kramadzhyan, A. A. O povyshenii nesushchej sposobnosti gruntovyh ankerov s gibkoj tyagoj [Increasing the load-bearing capacity of ground anchors with flexible tie rod] / A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky [et al.] // FTPRPI. – 2014. – № 6. – P. 96–106.
48. Kramadzhyan, A. A. O mekhanizme formirovaniya pikovoj nagruzki na podbunkernye pitateli obogatitelnyh fabrik [About the mechanism of peak load formation on the sub-bunker feeders of the enrichment factories] / A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevskiy [et al.] // FTPRPI. – 2015. – № 6. – P. 19–27.

49. Kramadzhyan, A. A. O pike nagruzok na pitateli napolnyh skladov poleznyh iskopaemyh [About peak loads on the feeders of the ground-level storages of minerals] / A. A. Kramadzhyan, E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky [et al.] // FTPRPI. – 2016. – № 5. – P. 30–39.
50. A.s. USSR № 1557033. Dozator sypuchih materialov [Divider of bulk materials] / S. B. Stazhevsky, E. I. Shemyakin, A. A. Kramadzhyan [et al]. // Publ. in BI. – 1990. – № 14.
51. Rusin, E. P. Substantiation of the design of the hopper-on-copier for the high-precision volumetric divider / E. P. Rusin, G. N. Khan // Interexpo GEO-Siberia. – 2020. – Vol. 2. – P. 173–179.
52. Rusin, E. P. Vysokotochnyj obyemnyj dozator poroshkovyh materialov [High-precision volumetric doser of powder materials] / E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Applied Mechanics and Technical Physics]. – 2022. – Vol. 63. – № 3. – P. 173–182.
53. Smoldyrev, A. E. Gidravlicheskij i pnevmaticheskij transport v metallurgii i gornom dele [Hydraulic and pneumatic transport in metallurgy and mining] / A. E. Smoldyrev. – M.: Metallurgia [Metallurgy], 1967. – 357 p.
54. Venkatesh, E. S. Erosion damage in oil and gas wells. Paper No. SPE-15183-MS – SPE Rocky Mountain Regional Meeting, Billings, Montana, USA, May 19-21, 1986. – SPE, 1986. – P. 489–500.
55. Iziumchenko, D. V. Ekspluataciya gazovyh skvazhin v usloviyah aktivnogo vodo- i peskoproyavleniya [Operation of gas wells in conditions of active water and sand eruption] / D. V. Iziumchenko, E. V. Mandrik, S. A. Melnikov [et al.] // Scientific and Technical Collection 'Vesti gazovoy nauki [Gas Science News]'. – 2018. – Vol. 33, № 1. – P. 235–242.
56. Barton, N. A. Erosion in elbows in hydrocarbon production systems. Review document. Research Report 115 / N. A. Barton. – Health & Safety Executive. – East Kilbride, Glasgow, UK: TÜV NEL Limited, 2003. – 35 p.
57. Rusin, E. P. K razrabotke stenda dlya modelirovaniya elementov sistem pererabotki zernistyh materialov [To the development of the stand for modelling the elements of the processing systems of granular materials] / E. P. Rusin // Interexpo GEO-Siberia. – 2021. – Vol. 2, № 4. – P. 99–107.
58. Han, X. Pressure drop characteristics of reverse circulation pneumatic cuttings removal during coal seam drilling / X. Han, S. Song, J. Li // Science Progress. – 2020. – Vol. 103, № 2. – P. 1–20.
59. Danilov, B. B. Opredelenie uslovij transportirovaniya plastichnogo grunta szhatym vozduhom po gorizontalnomu truboprovodu pri burenii skvazhin [Determination of transportation conditions of plastic soil by compressed air through a horizontal pipeline during well drilling] / B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky, E. N. Sher // FTPRPI. – 2014. – № 3. – P. 66–74.
60. Danilov, B. B. Opredelenie dliny gorizontalnoj pnevmotransportnoj magistrali burovogo stanka dlya udaleniya shlama razrezheniem [Determination of the length of the horizontal pneumatic conveying line of the drilling machine for sludge displacement by rarefaction] / B. B. Danilov, B. N. Smolyanitsky // FTPRPI. – 2016. – № 4. – P. 80–86.
61. Khan, G. N. O vliyanii formy secheniya i skorosti vrashcheniya gorizontalnogo truboprovoda na effektivnost transportirovaniya tverdyh chastic [On the influence of the cross-sectional shape and rotation speed of the horizontal pipeline on the efficiency of transporting solid particles] / G. N. Khan, E. P. Rusin // Interexpo Geo-Siberia. – 2023. – Vol. 2. – № 1. – P. 12–17.
62. Stazhevsky, S. B., Lindqvist, P. A. (Eds.). Gravity flow of disrupted rock. Final report. – Luleå, Sweden: Luleå University of Technology; Novosibirsk, Russian Federation: Institute of Mining. – 1995.
63. Stazhevsky, S. B. Ob osobennostyah techeniya razdroblennyh gornyh porod pri dobyche rud s podetazhnym obrusheniem [About the flow of disrupted rocks during ore mining with sub-level caving] / S. B. Stazhevsky // FTPRPI. – 1996. – № 5. – P. 72–89.
64. Lindqvist, P.-A. Sustainable mining and innovation for the future – research, development and innovation program. August 2012 / P.-A. Lindqvist. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre, Luleå University of Technology, 2012. – 51 p.
65. Björkman, B., Bäckblom, G., Greberg, J., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). April 2013. – Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2013. – 104 p.
66. Greberg, J., Andersson, C., Weihed, P. (Eds.). Strategic research and innovation agenda for the Swedish mining and metal producing industry (STRIM). 2016. - Luleå, Sweden: Rock Tech Centre. – 2016. – 120 p.

Благодарность (госзадание):

Исследования выполнены в рамках ПФНИ, проекты VIII.74.3.3, АААА-А17-117121140065-7, ААА-А-А17-117122090003-2.

Acknowledgments (state task)

The research was done within the frames of the Fundamental Research Program, projects VIII.74.3.3, АААА-А17-117121140065-7, ААА-А-А17-117122090003-2.

Информация об авторах:

Евгений Павлович Русин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; Scopus Author ID: 20434728100, https://orcid.org/0000-0001-7220-8589 (630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, Красный пр-кт, д. 54; e-mail: gmmlab@misd.ru).

Стажевский Станислав Борисович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; Scopus Author ID: 6601922039, http://orcid.org/0000-0002-8185-6884 (630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, Красный пр-кт, д. 54; e-mail: stazh@misd.ru).

Хан Гил Нам – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники Института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН; Scopus Author ID: 7102006001, https://orcid.org/0000-0003-4114-7730 (630091, Российская Федерация, г. Новосибирск, Красный пр-кт, д. 54; e-mail: khan.igd@gmail.com).

About the authors:

Evgeny P. Rusin – Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher at the Mining and Building Geomachinery Department, N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 20434728100, https://orcid.org/0000-0001-7220-8589 (54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091 Russian Federation; e-mail: gmmlab@misd.ru).

Stanislav B. Stazhevsky – Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher at the Mining and Building Geomachinery Department, N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 6601922039, http://orcid.org/0000-0002-8185-6884 (54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091 Russian Federation; e-mail: stazh@misd.ru).

Khan Gil Nam – Candidate of Sciences (Mathematics), Senior Researcher at the Mining and Building Geomachinery Department, N. A. Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus Author ID: 7102006001, https://orcid.org/0000-0003-4114-7730 (54 Krasny ave., Novosibirsk, 630091 Russian Federation; e-mail: khan.igd@gmail.com).

Для цитирования:

Русин, Е. П. Результаты исследований напряженно-деформированного состояния геосред в задачах геомеханики, геотектоники, горного машиностроения / Е. П. Русин, С. Б. Стажевский, Г. Н. Хан // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 87–101.

For citation:

Rusin, E. P. Rezultaty issledovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya geosred v zadachakh geomekhaniki, geotektoniki, gornogo mashinostroeniya [Investigation results of the stress-strain state of geomedia for the purposes of geomechanics, geotectonics, mining engineering] / E. P. Rusin, S. B. Stazhevsky, G. N. Khan // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series “Earth Sciences”. – 2025. – № 3 (79). – P. 87–101.

Дата поступления статьи: 14.11.2024
Прошла рецензирование: 25.01.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 14.11.2024
Reviewed: 25.01.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 622.2
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-102-105

Рациональный объем массового взрыва при разработке карьеров

А. А. Галимьянов, В. И. Мишнев

Институт горного дела Хабаровского ФИЦ ДВО РАН, г. Хабаровск

azot-1977@mail.ru

Аннотация

Нарастающие объемы горных работ выявили ряд задач, одной из которых является краткое обоснование рационального объема взорванной горной массы за один массовый взрыв при проектировании разработки твердых и общераспространенных полезных ископаемых и планировании развития открытых горных работ. В процессе научно-исследовательской работы выявлена связь между единичным объемом взрывного блока и среднесуточной производительностью экскаватора по блоку. А именно, с ростом объема массового взрыва при увеличении времени подготовки горного массива к выемке взрывным способом снижается производительность экскаватора из-за частичной потери детонационных свойств эмульсионного взрывчатого вещества (ЭВВ) и соответственно снижения качества взорванной горной массы.

Ключевые слова:

рациональный единичный объем взорванной горной массы, массовый взрыв, буровзрывные работы, открытые горные работы

Rational volume of the dirtied rock mass of large-scale blast during quarry development

A. A. Galimyanov, V. I. Mishnev

Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Khabarovsk

azot-1977@mail.ru

Abstract

The growing volumes of mining operations have revealed a number of tasks, one of which is a brief justification for evaluation of the rational volume of the blasted rock mass per one massive explosion when projecting the exploitation activities of solid and common minerals and planning the development of open-pit mining. During the research work, we have identified a correlation between the volume of the explosive block and the average productivity of the excavator per block. The article proposes the use of medium-volume blocks against application of a specific number of machines, which prepare the block for blasting, to increase the average productivity of the excavator per block. The identified dependence can help in projecting the exploitation of minerals and planning the development of open-pit mining, which will increase the profitability of mining production.

Keywords:

rational volume of the dirtied rock mass, large-scale blast, drilling and blasting operations, mass explosion, open pit mining

Введение

Рост мировой экономики, повышение технического прогресса и объема добычи полезных ископаемых требуют новых подходов к процессам разработки месторождений твердых и общераспространенных полезных ископаемых открытым способом, где одним из основных технологических процессов является подготовка горного массива к выемке буровзрывным способом. Основная часть буровзрывных работ (БВР) приходится на дробление крепких и средней крепости горных пород. Совершенствования БВР обуславливают необходимость разработки методик, направленных на повышение уровня безопасности и производительности труда, в том числе и в экологической части, где одним из основных, и в тоже время недостаточно изученных вопросов является обоснование рационального единичного объема взрывного блока (РОВБ), а именно части горного массива, взрываемого за один массовый взрыв (МВ). Под рациональным единичным объемом взрывного блока подразумевается нормативный объем взрывного блока, обеспечивающий нормативную производительность и безопасность труда горнодобывающего предприятия, рассчитанный для конкретного месторождения с учетом местных горно-геологических условий [1, 2].

Следует отметить, что рациональный единичный объем взрывного блока в настоящее время не учитывается при проектировании карьеров и планировании развития горных работ, поэтому соответствующий объем рассчитывается в оперативном порядке – на один-три МВ вперед, в лучшем случае на месяц, что зачастую негативно отражается на качестве взорванной горной массы (ВГМ) [3, 4]. К примеру, объем подготовки горного массива к выемке за один МВ (ОПГМ-МВ) сверх нормы может повлечь за собой низкое качество ВГМ из-за продолжительного нахождения и снижения качества взрывчатого вещества в обводненных скважинах [5] и отрицательный сейсмический эффект из-за увеличения амплитуды колебаний [6], тогда как ОПГМ-МВ ниже нормы очевидно повлияет на увеличение частоты взрывов и общего времени на организацию проведения МВ [7].

Материалы и методы

Вопросы увеличения объема массового взрыва волнуют ученых и горняков с начала зарождения производства МВ. Только один переход с мгновенного на короткозамедленное взрывание в середине 50-х гг. прошлого века позволил увеличить объем массового взрыва и производительность при ведении горных работ в десятки раз [8–12]. Также имеются факторы, ограничивающие единичный объем взрывного блока, по разным критериям, в первую очередь сейсмическому. Однако пока нет общепринятой методики определения рационального единичного объема взрывного блока. В связи с чем на разрезе Буреинский были проведены пять экспериментальных взрывов по выявлению зависимости производительности экскаватора (Пэкс) от единичного объема взрывного блока и времени нахождения ЭВВ в скважине. Для чистоты эксперимента взрывные блоки выбирались с примерно однотипными горно-геологическими условиями.

На разрезе Буреинский были проведены исследования по выявлению зависимостей средней производительности экскаватора, по блоку от объема взрывного блока и времени нахождения ЭВВ в скважине. Для чистоты эксперимента взрывные блоки выбирались примерно с однотипными горно-геологическими условиями.

Параметры БВР исследуемых взрывных блоков приведены в таблице. В результате проведения экспериментальных взрывов выявлено, что при повышении объема взрывного блока в совокупности с увеличением времени его подготовки к выемке буровзрывным способом, зафиксировано уменьшение среднесуточной производительности экскаватора (рисунок). Это связано с увеличением времени нахождения ЭВВ в скважинах, и в связи с этим частичной потерей детонационных свойств ЭВВ [5] и, как следствие, снижения качества взорванной горной массы [13]. На рисунке указаны средние значения со среднесуточной производительностью экскаватора по результатам пяти экспериментальных взрывов.

Параметры БВР экспериментальных взрывов

Parameters of drilling and blasting operations in explosion experiments

№ п/п	Показатели	Ед. изм.	Данные
1	Крепость породы по шкале проф. М. М. Протодьяконова, среднее значение		5,2
2	Диаметр скважины	мм	215
3	Выход ГМ с 1 п.м.	$м^3$	28
4	Производительность буровой установки DML-1200	п.м./сут	700
5	Буровая установка DML-1200	шт	2
6	Эмульсионное взрывчатое вещество (ЭВВ) с добавкой сухой фазы – 30% гранул селитры		ЭВВ-70*
7	Наименование ПД		ТГЭ -750
8	Плановая суточная производительность экскаватора Komatsu PC-1250	$м^3$	10300
9	Средства инициирования ИСКРА В том числе:		
10	Искра-П-109	мс	109
11	Искра-П-67	мс	67
12	Искра-С-1000	мс	1000
13	Высота уступа	м	10
14	Перебур	м	2
15	Удельный расход	$кг/м^3$	0,79

Прмечание. *производитель ЭВВ не конкретизируется в целях исключения конфликта интересов.

Note. *producer of the emulsion explosive is not given to avoid the conflict of interests.

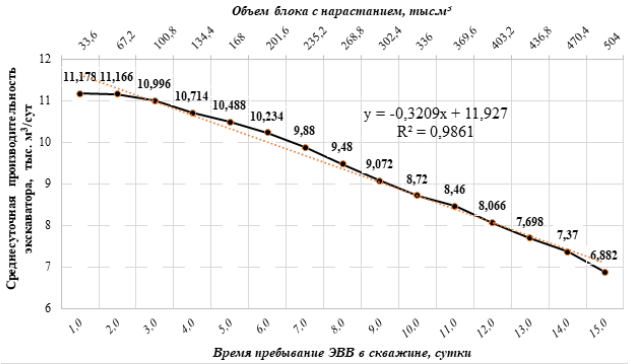


Рисунок. Зависимости среднесуточной Пэкс от единичного объема взрывного блока и времени пребывания ЭВВ в скважинах.

Figure. Average excavator productivity in dependence of the unit volume of blast block and residence time of emulsion explosive in blast holes.

Заключение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Среднесуточная Пэкс снижается по мере отработки взрывного блока в направлении взорванной горной массы скважинными зарядами с большим временем пребывания ЭВВ относительно скважинных зарядов, сформированных ранее, считая с начала отработки взорванного горного массива (рисунок).
2. Снижение качества ЭВВ на местах ведения горных работ начиная от закупки и хранения компонентов для изготовления полуфабрикатов до формирования скважинных зарядов зависит от человеческого фактора, в том числе квалификации персонала на местах.
3. Обоснование рационального объема массового взрыва зависит от горно-геологических и технологических факторов, в том числе от качества приготовления ЭВВ и формирования скважинных зарядов из них.
4. Целесообразно проведение дополнительных исследований, направленных на повышение качества ВГМ посредством улучшения качества скважинных зарядов из ЭВВ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Соболев, А. А. Анализ изменения технико-экономических показателей буровзрывных работ в зависимости от возрастания глубины разработки угольных месторождений Дальнего Востока / А. А. Соболев, А. А. Галимьянов // Уголь. – 2022. – № 2 (1151). – С. 22–25. – DOI 10.18796/0041-5790-2022-2-22-25.
2. Совершенствование процесса подготовки горной массы к выемке на Солнцевском угольном разрезе / А. А. Галимьянов, О. И. Черских, И. Ю. Рассказов [и др.] // Уголь. – 2024. – № 3 (1178). – С. 104–109. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-3-104-109.

3. Исследование влияния параметров взорванной горной массы на производительность экскаваторноавтомобильного комплекса / М. А. Маринин, Р. А. Рахманов, В. В. Должиков [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9-1. – С. 35–48. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35.
4. Сысоев, А. А. Исследование резерва взорванной горной массы на разрезах с автомобильным транспортом / А. А. Сысоев, Я. О. Литвин, К. А. Голубин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2015. – № 1. – С. 4-9.
5. Горинов, С. А. Оценка времени сохранения восприимчивости к инициирующему импульсу эмульсионным взрывчатым веществом, сенсибилизированным газовыми пузырьками / С. А. Горинов, А. С. Корецкий, И. Ю. Маслов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2022. – № 5. – С. 53-65. – DOI 10.21440/0536-1028-2022-5-53-65.
6. Соколов, С. Т. Оценка влияния взрыва протяженного блока на охраняемый объект / С. Т. Соколов, С. В. Хохлов, А. В. Баженова // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 9-1. – С. 122-134. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_91_0_122.
7. Комплексная оценка эффективности буровзрывных и экскаваторных работ при выемке взорванных пород экскаваторами типа ЭКГ / А. С. Ташкинов, А. А. Сысоев, И. А. Ташкинов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2010. – № 2 (78). – С. 59-65.
8. Кокин, С. В. Опыт ООО «Кузбассразрезуголь-Взрывпром» по снижению воздействия массовых взрывов в Кузбассе на охраняемые объекты и окружающую среду / С. В. Кокин, Д. М. Пархоменко, А. В. Бервин // Горная промышленность. – 2019. - №5 (147). – С. 72-75.
9. Фетоденко, В. С. Оптимизация интервалов замедлений при короткозамедленном взрывании вскрышных пород на разрезах Кузбасса / В. С. Фетоденко, С. В. Матва // Устойчивое развитие горных территорий. – 2022. – Т. 14, №4. – С. 623-631.
10. Басарнов, А. И. Испытания устройств неэлектрической системы инициирования на время срабатывания в полигонных условиях / А. И. Басарнов, Д. Н. Батраков // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2023. – № 1. – С. 27-37. – DOI 10.25558/VOSTNII.2023.34.31.003.
11. Кондратьев, С. А. Анализ результатов заводских испытаний устройств «Искра» для инициирования скважинных зарядов / С. А. Кондратьев, А. А. Сысоев, И. Б. Катанов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2019. – № 6 (136). – С. 72-78. – DOI 10.26730/1999-4125-2019-6-72-78.
12. Ильенко, С. М. Технология, механизация и организация открытых горных работ / С. М. Ильенко, П. А. Атамась. – Киев–Донецк: Вища школа, Головное изд-во, 1979. – 224 с.
13. Методика обеспечения качества заряда наливного эмульсионного взрывчатого вещества в обводненных скважинах / А. А. Галимьянов, О. И. Черских, А. В. Рассказова [и др.] // Уголь. – 2024. – № 1 (1176). – С. 100-108. – DOI 10.18796/0041-5790-2024-1-100-108.

References

1. Sobolev, A. A. Analiz izmeneniya tekhniko-ekonomicheskih pokazatelej burovzryvnyh rabot v zavisimosti ot vozrastaniya glubiny razrabotki ugolnyh mestorozhdenij Dalnego Vostoka [Analysis of changes in the technical and economic indicators of drilling and blasting operations depending on the increasing depth of coal deposits in the Far East] / A. A. Sobolev, A. A. Galimyanov // Ugol' [Coal]. – 2022. – № 2 (1151). – P. 22–25. – DOI 10.18796/0041–5790–2022–2–22–25.
2. Galimyanov, A. A. Sovershenstvovanie processa podgotovki gornoj massy k vyemke na Solncevskom ugolnom razreze [Improving the process of rock mass preparation for excavation at the Solntsevsky open-pit coal mine] / A. A. Galimyanov, O. I. Cherskikh, I. Yu. Rasskazov [et al.] // Ugol' [Coal]. – 2024. – № 3 (1178). – P. 104–109. – DOI 10.18796/0041–5790–2024–3–104–109.
3. Marinin, M. A. Issledovanie vliyaniya parametrov vzorvannoj gornoj massy na proizvoditelnost ekskavatorno-avtomobilnogo kompleksa [Study on the influence of the parameters of blasted rock mass on the productivity of the excavator-machine complex] / M. A. Marinin, R. A. Rakhmanov, V. V. Dolzhikov [et al.] // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. – 2023. – № 9–1. – P. 35–48. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_91_0_35.
4. Sysoev, A. A. Issledovanie rezerva vzorvannoj gornoj massy na razrezah s avtomobilnym transportom [Study on the reserve of blasted rock mass in open-pit mines with road transport] / A. A. Sysoev, Ya. O. Litvin, K. A. Golubin // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. – 2015. – № 1. – P. 4–9.
5. Gorinov, S. A. Ocenka vremeni sohraneniya vospriimchivosti k iniciiruyushchemu impulsu emulsionnym vzryvchatym veshchestvom, sensibilizirovannym gazovymi puzyrkami [Estimation of the time of maintaining susceptibility to the initiating pulse by an emulsion explosive sensitised with gas bubbles] / S. A. Gorinov, A. S. Koretsky, I. Yu. Maslov // Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal [News of Higher Educational Institutions. Mining Journal]. – 2022. – № 5. – P. 53–65. – DOI 10.21440/0536–1028–2022–5–53–65.
6. Sokolov, S. T. Ocenka vliyaniya vzryva protyazhennogo bloka na ohranyaemyj obyekt [Assessing the impact of an explosion of extended block on the protected object] / S. T. Sokolov, S. V. Khokhlov, A. V. Bazhenova // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. – 2023. – № 9–1. – P. 122–134. – DOI 10.25018/0236_1493_2023_91_0_122.
7. Tashkinov, A. S. Kompleksnaya ocenka effektivnosti burovzryvnyh i ekskavatornyh rabot pri vyemke vzorvannyh porod ekskavatorami tipa EKG [Comprehensive

assessment of the efficiency of drilling and blasting and excavation operations when removing blasted rocks using EKG type excavators] / A. S. Tashkinov, A. A. Sysoev, I. A. Tashkinov [et al.] // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2010. – № 2 (78). – P. 59–65.
8. Kokin, S. V. Opyt OOO «Kuzbassrazrezugol-Vzryvprom» po snizheniyu vozdejstviya massovyh vzryvov v Kuzbasse na ohranyaemye obyekty i okruzhayushchuyu sredu [Experience of OOO 'Kuzbassrazrezugol-Vzryvprom' in reducing the impact of massive explosions in Kuzbass on protected objects and the environment] / S. V. Kokin, D. M. Parkhomenko, A. V. Bervin // Gornaya promyshlennost [Mining Industry]. – 2019. – № 5 (147). – P. 72–75.
9. Fetodenko, V. S. Optimizaciya intervalov zamedlenij pri korotkozamedlennom vzryvanii vskryshnyh porod na razrezah Kuzbassa [Optimization of deceleration intervals during short-delay blasting of overburden rocks in Kuzbass open-pit mines] / V. S. Fetodenko, S. V. Matva // Ustojchivoe razvitie gornyh territorij [Sustainable Development of Mountain Territories]. – 2022. – Vol. 14. – № 4. – P. 623–631.
10. Basarnov, A. I. Ispytaniya ustrojstv neelektricheskoj sistemy iniciirovaniya na vremya srabatyvaniya v poligonnyh usloviyah [Testing of devices of a non-electric initiation system for response time in field conditions] / A. I. Basarnov, D. N. Batrakov // Bulletin of the Scientific Centre of the Eastern Research Institute for Industrial and Environmental Safety. – 2023. – № 1. – P. 27–37. – DOI 10.25558/VOSTNII. 2023.34.31.003.
11. Kondratiev, S. A. Analiz rezultatov zavodskih ispytanij ustrojstv «Iskra» dlya iniciirovaniya skvazhinnyh zaryadov [Analysis of the results of factory tests of Iskra devices for initiating borehole charges] / S. A. Kondratiev, A. A. Sysoev, I. B. Katanov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2019. – № 6 (136). – P. 72–78. – DOI 10.26730/1999-4125-2019-6-72-78.
12. Ilyenko, S. M. Tekhnologiya, mekhanizaciya i organizaciya otkrytyh gornyh rabot [Technology, mechanization and organization of open-pit mining] / S. M. Ilyenko, P. A. Atamas. – Kiev. – Donetsk : Vishcha shkola, Head Publishing House, 1979. – 224 p.
13. Galimyanov, A. A. Metodika obespecheniya kachestva zaryada nalivnogo emulsionnogo vzryvchatogo veshchestva v obvodnennyh skvazhinah [Methodology of quality assurance of the charge of the bulk emulsion explosive in watered wells] / A. A. Galimyanov, O. I. Cherskikh, A. V. Rasskazova [et al.] // Ugol [Coal]. – 2024. – № 1 (1176). – P. 100–108. – DOI 10.18796/0041–5790–2024–1–100–108.

Информация об авторах:

Галимьянов Алексей Алмазович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института горного дела ДВО РАН; Scopus ID: 58034592900, https://orcid.org/0000-0002-8003-7502 (680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51; e-mail: azot-1977@mail.ru).

Мишнев Владимир Игоревич – младший научный сотрудник, Института горного дела ДВО РАН; Scopus ID: 58030888800, https://orcid.org/0009-0004-7859-8572 (680000, Российская Федерация, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51; e-mail: mishnev.vl@mail.ru).

About the authors:

Alexey A. Galimyanov - Candidate of Sciences (Engineering), Leading Researcher at the Institute of Mining of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus ID: 58034592900, https://orcid.org/0000-0002-8003-7502 (51 Turgenev st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation; e-mail: azot-1977@mail.ru).

Vladimir I. Mishnev – Junior Researcher at the Institute of Mining, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences; Scopus ID: 58030888800, https://orcid.org/0009-0004-7859-8572 (51 Turgenev st., Khabarovsk, 680000, Russian Federation; e-mail: mishnev.vl@mail.ru).

Для цитирования:

Галимьянов, А. А. Рациональный объем массового взрыва при разработке карьеров / А. А. Галимьянов, В. И. Мишнев // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 102–105.

For citation:

Galimyanov, A. A. Ratsionalnyi obyem massovogo vzryva pri razrabotke karyerov [Rational volume of the dirtied rock mass of large-scale blast during quarry development] / A. A. Galimyanov, V. I. Mishnev // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 102–105.

Дата поступления статьи: 28.11.2024
Прошла рецензирование: 13.03.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 28.11.2024
Reviewed: 13.03.2025
Accepted: 01.04.2025

Юбилеи

Anniversaries

УДК 553.98.048(470.13+470.111)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-106-111

«Ей покорялись Уральские горы» (памяти Р. Г. Тимониной)

Н. Н. Тимонина

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 научной деятельности кандидата геолого-минералогических наук Р. Г. Тимониной, известного исследователя метаморфических пород, внесшей весомый вклад в изучение геологического строения и истории геологического развития Приполярного Урала. Ею были впервые выделены и охарактеризованы основные этапы регионального метаморфизма образований Приполярного Урала. В основе ее исследований лежит детальное изучение петрографии и петрохимии метаморфических пород.

В ходе подготовки статьи проведен анализ опубликованных и фондовых работ Р. Г. Тимониной, отдавшей более 20 лет жизни изучению геологии севера Урала.

Ключевые слова:

метаморфизм, Приполярный Урал, акцессорные минералы

“The Ural Mountains were conquered by her” (in memory of R. G. Timonina)

N. N. Timonina

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 scientific activity of the candidate of geological and mineralogical sciences R. G. Timonina, a famous researcher of metamorphic rocks, who made a significant contribution to the study of the geological structure and history of geological development of the Subpolar Urals. She was the first to identify and characterize the main stages of regional metamorphism of formations in the Subpolar Urals. Her research is based on a detailed study of the petrography and petrochemistry of metamorphic rocks. In the course of preparing the article, the author analysed published and archived works written by R. G. Timonina, who devoted more than 20 years of her life to studying the geology of the Northern Urals.

Keywords:

metamorphism, Subpolar Urals, accessory minerals

13 июля 2025 г. исполнилось бы 90 лет со дня рождения **Риммы Гавриловны ТИМОНИНОЙ (Ардашевой).** Она родилась в пос. Кузино Свердловской области, была третьим ребенком в семье. Ее отец был инспектором Наркомата путей сообщения, поэтому семья часто меняла место жительства: в первый класс она пошла в г. Свердловске, с 1944 по 1949 г. училась в г. Ярославле, а закончила школу уже в г. Рославле Смоленской области. В 1960 г. Римма Гавриловна закончила Свердловский горный институт им. В. В. Вахрушева и получила квалификацию горного инженера по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых». После окончания института работала в Восточно-Оренбургской партии, которая располагалась в пос. Никель-Рудник. С 1961 г. семья переехала в г. Сыктывкар и началась работа в Институте геологии Коми филиала АН СССР. С тех пор, в течение 21 года, Римма Гавриловна работала в лаборатории петрографии и рудных полезных ископаемых, которой руководил Борис Алексеевич Голдин, а позднее – Виталий Николаевич Охотников. Лаборатория славилась прекрасными специалистами, неутомимыми исследователями, среди которых, помимо названных руководителей, трудились Евгений Павлович Калинин, Владимир Иванович Мизин, Михаил Николаевич Костюхин и др.

В 1962 г. начались многолетние исследования крупнейшего на севере Урала гранитного массива Маньхамбо, с этим периодом связано начало полевых работ Риммы Гавриловны. В то время научным руководителем был М. В. Фишман, начальником отряда – Е. П. Калинин. Участники экспедиции исследовали все геологические объекты, но у каждого были свои увлечения: М. В. Фишмана интересовали граниты, Б. А. Голдина – апограниты и редкоземельная минерализация, Е. П. Калинин специализировался на геохимии, Р. Г. Тимониной выделили метаморфические породы.

Н. П. Юшкин, который работал с Риммой Гавриловной в первой экспедиции, вспоминал, что условия были крайне трудными – дикий край, высокие горы, утомительные маршруты. Но в то же время было крайне интересно и увлекательно, каждый маршрут приносил новые открытия [1, 2].

С этого времени началось углубленное изучение метаморфических пород, минералогии типоморфных породообразующих и акцессорных минералов метаморфитов, генетических и парагенетических связей формирования



Р. Г. Тимонина (1979).
Rimma G. Timonina (1979).

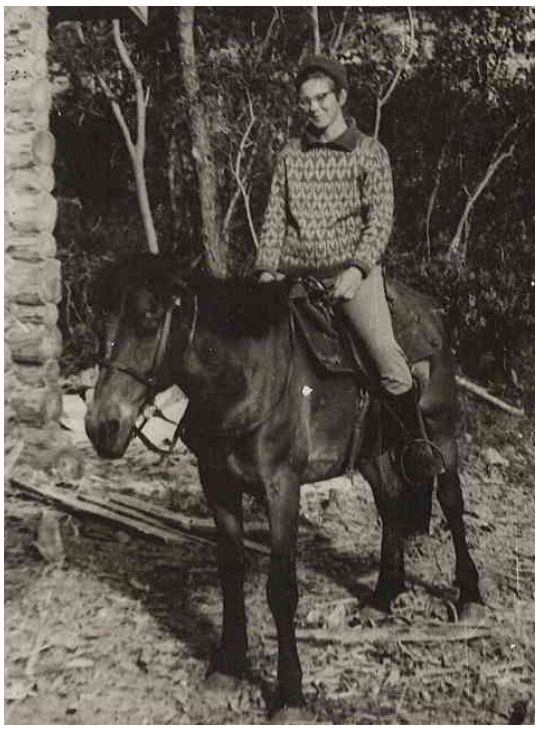


Римма Гавриловна (вторая слева) и Николай Иосифович (крайний справа) Тимонины с друзьями, г. Свердловск (1957).
Rimma Gavrilovna Timonina (second from the left) and Nikolai Iosifovich (first from the right) Timonin with friends, Sverdlovsk (1957).



Б. А. Голдин, Н. И. Тимонин, В. И. Есева и Р. Г. Тимонина (слева направо) (1961).
B. A. Goldin, N. I. Timonin, V. I. Eseva and R. G. Timonina (from left to right) (1961).

рудопроявлений с процессами метаморфизма [3–5]. Вторым районом был бассейн Щугора, а третьим – верховья р. Кожым. Здесь ею было проведено детальное изучение неизвестных ранее дистен-хлоритоидных пород [6]. Кожымский район представляет особенный интерес, так как в его пределах область развития метаморфических пород охватывает наибольшую площадь. Именно здесь эти породы наиболее разнообразны, одинаково широко развиты образования, свойственные самым разным ступеням метаморфизма [7, 8].



Р. Г. Тимонина в экспедиции.
R. G. Timonina in the expedition.

Важным моментом исследований Р. Г. Тимониной является то, что основу ее работ составляют фактические материалы и наблюдения, полученные во время экспедиций, охвативших практически всю территорию приосевой зоны севера Урала, в геологическом строении которой основную роль играют в разной степени метаморфизованные первично осадочные и вулканогенные породы.

В основу своих исследований Римма Гавриловна положила детальное изучение петрографии и петрохимии метаморфических пород в связи с общими особенностями геологического строения региона.

Р. Г. Тимонина детально изучила особенности химического состава выделенных разновидностей пород, взяв за основу результаты более 200 полных силикатных анализов. В результате ей удалось классифицировать метаморфические породы по особенностям химического состава, существенно расширить их характеристики, выделить основные элементы-примеси. Большое внимание она уделяла изучению типоморфных минералов метаморфических пород, ею детально описаны гранаты, амфиболы, мусковиты, биотиты, хлорит, эпидот, характеризующиеся чувствительностью к изменениям термодинамической обстановки [9–12].

Римме Гавриловне удалось обосновать выделение трех важнейших этапов метаморфизма. Первый, древний метаморфизм, проявившийся в породах николайшорской свиты и отвечающий условиям амфиболитовой фации. Его продуктами являются амфиболиты и роговообманковые гнейсы с гранатом. Второй этап – зональный метаморфизм, захвативший все отложения позднепротерозойского возраста и соответствующий условиям эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций [13, 14]. Для пород эпидот-амфиболитовой фации различаются низко- и высокотемпературные зоны. Третий этап – метаморфизм фации зеленых сланцев, преобразовавший отложения позднего протерозоя и ордовика. Для пород протерозойского возраста – это региональный диафторез фации зеленых сланцев, для отложений ордовикского возраста – региональный прогрессивный метаморфизм фации зеленых сланцев [15, 16]. В результате изучения цирконов из отложений на западном склоне Приполярного Урала она указала на связь генезиса пород и типоморфных особенностей этого минерала [17].

Р. Г. Тимонина отмечала, что в регионе получили развитие процессы гранитизации, выделила две разновидности регионального метасоматоза: щелочную и кислотную. Первый проявился в пределах гнейсовых куполов в перекристаллизации гнейсов и амфиболитов, второй тип нашел выражение в процессах кислотного выщелачивания.

В результате изучения химического состава и физических свойств минералов метаморфических пород Римма Гавриловна определила термодинамические условия изменения пород и границы распространения метаморфических фаций. Метаморфизм пород эпидот-амфиболитовой фации происходил при температуре 430-600^0 С.

Проведенные исследования позволили ей составить первую для региона схему распространения фаций регионального метаморфизма и указать основные типы (однородный, зональный, повторный и гранитизацию) [15].

В 1977 г. она защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук на тему «Региональный метаморфизм позднепротерозойско-ордовикских отложений осевой зоны Приполярного Урала». По мнению геологов объединения «Североуралгеология», практическое значение исследований Р. Г. Тимониной состояло в том, что ею была установлена приуроченность месторождений горного хрусталя к зонам распространения пород зеленосланцевой фации прогрессивного метаморфизма и к зонам пород, измененных в условиях эпидот-амфиболитовой фации, затем претерпевшим преобразования в условиях диафтореза зеленосланцевой фации метаморфизма. Р. Г. Тимонина выделила область распространения дистенсодержащих пород, которые могут быть перспективными на глиноземное сырье.

Результаты исследований были опубликованы в более чем 30 научных работах. По словам М. В. Фишмана [18], она очень требовательно относилась к своей работе: неоднократно возвращалась к своим эталонным объектам, снова и снова перепроверяла свои выводы и заключения.

Несмотря на слабое здоровье, Римма Гавриловна увлеченно проводила полевые исследования в труднодоступных горных районах Северного, Приполярного и Полярного Урала. В те годы, когда она начинала свои исследования, основным средством передвижения были собственные ноги. Вездеходы и другие современные средства появились значительно позже. По воспоминаниям Е. П. Калинина [19], в лаборатории петрографии в те времена в основном были одни мужчины, так как работа в горах требовала значительных сил и выносливости. Однако эта хрупкая на вид женщина никогда не пасовала перед трудностями и всегда отличалась ровным неунывающим характером, доброжелательным отношением к окружающим. С ней легко работалось, она была лишена присущей многим амбициозности, много читала и всегда была в курсе новинок в ее области науки.

Римма Гавриловна ушла из жизни 20 декабря 1982 г. в возрасте 47 лет, в самом расцвете своих творческих сил и способностей. Ее работы, несомненно, относятся к одним из первых наиболее детальных и глубоко обосно-



Р. Г. Тимонина и Л. А. Юшкина (слева направо) на фоне цветущей черемухи.
R. G. Timonina and L. A. Yushkina (from left to right) on the background of wild cherry flowers.



Римма Гавриловна и Николай Иосифович Тимонины в сквере у Вечного огня, г. Сыктывкар (1980).
Rimma Gavrilovna Timonina and Nikolai Iosifovich Timonin in the square by the Eternal Flame, Syktyvkar (1980).

ванных исследований по проблеме метаморфизма горных пород севера Урала. Полученные ею результаты выходят далеко за региональные рамки и представляют несомненный интерес и в настоящее время.

Р. Г. Тимонина была интересным исследователем, отличалась широким кругозором, очень любила свою работу, стремилась выезжать в поле, даже когда была уже тяжело больна. Она всегда находилась в гуще людей, с удовольствием помогала коллегам по работе. Римма Гавриловна до конца жизни оставалась жизнерадостным человеком, любившим жизнь во всех ее проявлениях, была искренней и отзывчивой, честной, скромной и мужественной. Она принимала жизнь спокойно, мудро и достойно, обладала удивительной способностью слушать собеседника и ненавязчиво давать дельные советы, возможно, поэтому вокруг нее постоянно вращались разные люди: от молодых коллег по работе до соседок по больничной палате. Она любила принимать дома друзей, угощала удивительно вкусными пышными пирогами.

К сожалению, уходят люди, которые знали и работали с Риммой Гавриловной и сохранили о ней добрую память, но останутся результаты ее исследований. Благодаря Якову Эльевичу Юдовичу, назвавшему ручей, на котором Римма Гавриловна впервые описала хлоритоидные сланцы, ручьем Тимониной, ее имя останется в памяти геологов. По мнению Якова Эльевича [20], на некогда безымянном ручье есть два интересных геологических объекта: уникальное обнажение кианит-хлоритоидных сланцев и проявление зеленых мраморов – редкое проявление красивого поделочного камня. Благодаря этим объектам ручей может служить природным памятником Риммы Гавриловны.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Юшкин, Н. П. Ей покорялись Уральские горы (к 50-летию Р. Г. Тимониной / Н. П. Юшкин // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. – 1995. – № 6. – С. 3–4.
2. Юшкин, Н. П. Первый маршрут / Н. П. Юшкин // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2010. – № 7. – С. 40–43.
3. Некоторые особенности процессов метаморфизма пород массива Мань-Хамбо // Геология и полезные ископаемые северо-востока Европейской части СССР и севера Урала (Труды VI геологической конференции Коми АССР). Т. 1. – Сыктывкар, 1965. – С. 574–576.
4. Региональный метаморфизм пород южной части Печорского Урала // Материалы II Коми республиканской молодежной конференции. – Сыктывкар, 1967. – С. 230–232.
5. Литий в метаморфических породах Урала (совместно с Г. Е. Юшковой) // Материалы III Коми республиканской молодежной конференции. – Сыктывкар, 1969. – С. 138–139.
6. Дистен-хлоритоидные породы бассейна реки Кожим (Приполярный Урал) // Вопросы геологии и метаморфизма Урала (Труды Уральской конференции молодых геологов и геофизиков). – Свердловск, 1970. – С. 129–134.
7. О метаморфизме пород Приполярного Урала // Материалы Всесоюзного совещания по метаморфизму. – Новосибирск, 1971. – С. 91–92.
8. Метаморфизм пород центральной части Ляпинского антиклинория // Магматизм, метаморфизм и металлогения севера Урала и Пай-Хоя. – Сыктывкар, 1972. – С. 65.
9. О составе гранатов метаморфических пород // Материалы III Коми республиканской молодежной конференции. – Сыктывкар, 1969. – С. 123–124.
10. Гранаты пород Приполярного Урала // Очерки общей и региональной минералогии (Труды Института геологии Коми филиала АН СССР. Вып. 15). – Сыктывкар, 1971. – С. 89–93.
11. Парагенетический анализ амфиболитов Приполярного Урала // Ежегодник Института геологии Коми филиала АН СССР. – Сыктывкар, 1973. – С. 115–120.
12. Амфиболы метаморфических пород Приполярного Урала // Геология и полезные ископаемые Северо-Востока европейской части СССР (Ежегодник Института геологии Коми филиала АН СССР) / отв. ред. М. В. Фишман. – Сыктывкар, 1974. – С. 123–128.
13. О температуре образования и возрасте мусковитов некоторых метаморфических пород Приполярного Урала (совместно с В. В. Хлыбовым) // Ежегодник Института геологии Коми филиала АН СССР. – Сыктывкар, 1972. – С. 121–123.
14. Региональный метаморфизм позднепротерозойско-ордовикских отложений осевой зоны Приполярного Урала: автореф. дис. ... канд. геолого-минералогических наук. – Свердловск, 1977. – 27 с.
15. Петрология метаморфических пород Приполярного Урала / отв. ред. М. В. Фишман – Л.: Наука, 1980. – 102 с.
16. Региональный метаморфизм доордовикских отложений Приполярного Урала // Магматизм и металлогения Европейского северо-востока СССР (Труды IX геологической конференции Коми АССР) / отв. ред. Н. П. Юшкин. – Сыктывкар, 1982. – С. 61–64.
17. Использование типоморфных особенностей циркона для решения вопроса генезиса пород (на примере г. Юма-Мыльк, Приполярный Урал) // Геология и полезные ископаемые Северо-Востока европейской части СССР / отв. ред. М. В. Фишман.– Сыктывкар, 1978. – С. 89–93.
18. Фишман, М. В. Римма Гавриловна Тимонина / М. В. Фишман. – Сыктывкар, 2001. – 28 с. (Серия «Люди науки» / Коми НЦ УрО РАН. Вып. 32).
19. Калинин, Е. П. Р. Г. Тимонина – известный исследователь метаморфитов севера Урала / Е. П. Калинин // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана. – Сыктывкар, 2005. – Вып. 3. – С. 6–11 (Тр. Ин-та геологии Коми науч. центра РАН).
20. Юдович, Я. Э. Ручей Тимониной / Я. Э. Юдович // Петрология и минералогия севера Урала и Тимана. – Сыктывкар, 2005. – Вып. 3. – С. 168–173 (Тр. Ин-та геологии Коми науч. центра РАН).

References

1. Yushkin, N. P. Ej pokoryalis Uralskie gory (k 50-letiyu R. G. Timoninoj) [The Ural Mountains were conquered by her (towards the 50th anniversary of R. G. Timonina)] // Bulletin of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 1995. – № 6. – P. 3–4.
2. Yushkin, N. P. Pervyj marshrut [The first route] // Bulletin of the Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. – 2010. – № 7. – P. 40–43.
3. Nekotorye osobennosti processov metamorfizma porod massiva Man'-Hambo [Some features of the metamorphism processes of rocks of the Man-Khambo massif] // Geologiya i poleznye iskopaemye severo-vostoka Evropejskoj chasti SSSR i severa Urala [Geology and Useful Fossils of the North-East of the European Part of the USSR and the North of the Urals] (Proceedings of the VI Geological Conference of the Komi ASSR). Vol. 1. – Syktyvkar, 1965. – P. 574–576.
4. Regionalnyj metamorfizm porod yuzhnoj chasti Pechorskogo Urala [Regional metamorphism of rocks in the southern part of the Pechora Urals] // Proceedings of the II Komi Republican Youth Conference. – Syktyvkar, 1967. – P. 230–232.
5. Litij v metamorficheskih porodah Urala (sovmestno s G. E. Yushkovoj) [Lithium in metamorphic rocks of the Urals (in co-authorship with G. E. Yushkova) // Proceedings of the III Komi Republican Youth Conference. – Syktyvkar, 1969. – P. 138–139.
6. Disten-hloritoidnye porody bassejna reki Kozhim (Pripolyarnyj Ural) [Disthene-chloritoid rocks of the Kozhim River basin (Subpolar Urals)] // Voprosy geologii i metamorfizma Urala [Issues of Geology and Metamorphism of the Urals] (Proceedings of the Ural Conference of Young Geologists and Geophysicists. – Sverdlovsk, 1970. – P. 129–134.
7. O metamorfizme porod Pripolyarnogo Urala [On the metamorphism of rocks in the Subpolar Urals] // Proceedings of the All-Union Conference on Metamorphism. – Novosibirsk, 1971. – P. 91–92.
8. Metamorfizm porod centralnoj chasti Lyapinskogo antiklinoriya [Metamorphism of rocks in the central part of the Lyapinsky anticlinorium] // Magmatizm, metamorfizm i metallogeniya severa Urala i Paj-Hoya [Magmatism, Metamorphism, and Metallogeny of the Northern Urals and Pai-Khoi]. – Syktyvkar, 1972. – P. 65.
9. O sostave granatov metamorficheskih porod [On the composition of garnets from metamorphic rocks] // Proceedings of the III Komi Republican Youth Conference. – Syktyvkar, 1969. – P. 123–124.
10. Granaty porod Pripolyarnogo Urala [Garnets from rocks of the Subpolar Urals] // Ocherki obshchej i regionalnoj mineralogii [Essays on General and Regional Mineralogy] (Proceedings of the Institute of Geology, Komi Branch of the USSR Academy of Sciences). – Issue 15. – Syktyvkar, 1971. – P. 89–93.
11. Parageneticheskij analiz amfibolitov Pripolyarnogo Urala [Paragenetic analysis of amphibolites of the Subpolar Urals] // Yearbook of the Institute of Geology, Komi Branch of the USSR Academy of Sciences. – Syktyvkar, 1973. – P. 115–120.
12. Amfiboly metamorficheskih porod Pripolyarnogo Urala [Amphiboles from metamorphic rocks of the Subpolar Urals] // Geologiya i poleznye iskopaemye severo-vostoka Evropejskoj chasti SSSR i severa Urala [Geology and Useful Fossils of the North-East of the European Part of the USSR and the North of the Urals] (Yearbook of the Institute of Geology, Komi Branch of the USSR Academy of Sciences) / ed. by M. V. Fishman. – Syktyvkar, 1974. – P. 123–128.
13. O temperature obrazovaniya i vozraste muskovitov nekotoryh metamorficheskih porod Pripolyarnogo Urala (sovmestno s V. V. Khlybovym) [On the formation temperature and age of muscovites of some metamorphic rocks of the Subpolar Urals] // Yearbook of the Institute of Geology, Komi Branch of the USSR Academy of Sciences. – Syktyvkar, 1972 – P. 121–123 (In co-authorship with V. V. Khlybov).
14. Regional metamorphism of the Late Proterozoic-Ordovician deposits of the axial zone of the Subpolar Urals [Regionalnyj metamorfizm pozdneproterozojsko-ordovikskih otlozhenij osevoj zony Pripolyarnogo Urala]: extended abstract of Candidate's thesis (Geology and Mineralogy). – Sverdlovsk, 1977. – 27 p.
15. Petrologiya metamorficheskih porod Pripolyarnogo Urala [Petrology of metamorphic rocks of the Subpolar Urals] / ed. by M. V. Fishman. – L.: Nauka, 1980. – 102 p.
16. Regionalnyj metamorfizm doordovikskih otlozhenij Pripolyarnogo Urala [Regional metamorphism of pre-Ordovician deposits of the Subpolar Urals] // Magmatizm i metallogeniya Evropejskogo severo-vostoka SSSR [Magmatism and Metallogeny of the European North-East of the USSR] (Proceedings of the IX Geological Conference of the Komi ASSR) / ed. by N. P. Yushkin. – Syktyvkar, 1982. – P. 61–64.
17. Ispolzovanie tipomorfnyh osobennostej cirkona dlya resheniya voprosa genezisa porod (na primere g. Yuma-Mylk, Pripolyarnyj Ural) [Using typomorphic features of zircon to solve the question of rock genesis (on the example of Yuma-Mylk Mountain, Subpolar Urals)] // Geologiya i poleznye iskopaemye severo-vostoka Evropejskoj chasti SSSR i severa Urala [Geology and Useful Fossils of the North-East of the European Part of the USSR and the North of the Urals] / ed. by M. V. Fishman. – Syktyvkar, 1978. – P. 89–93.
18. Fishman, M. V. Rimma Gavrilovna Timonina / M. V. Fishman. – Syktyvkar, 2001. – 28 p. (series 'People of Science' / Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Issue 32).
19. Kalinin, E. P. R. G. Timonina – izvestnyj issledovatel metamorfitov severa Urala [R. G. Timonina is a famous researcher of metamorphites of the Northern Urals] / E. P. Kalinin // Proceedings of the Institute of Geology, Komi

Science Centre of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Petrologiya i mineralogiya severa Urala i Timana [Petrology and Mineralogy of the Northern Urals and Timan]. – Syktyvkar, 2005. – Iss. 3. – P. 6–11.
20. Yudovich, Ya. E. Ruchei Timoninoi [Timonina Stream] / Ya. E. Yudovich // Proceedings of the Institute of Geology, Komi Science Centre of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Petrologiya i mineralogiya severa Urala i Timana [Petrology and Mineralogy of the Northern Urals and Timan]. – Syktyvkar, 2005. – Iss. 3. – P. 168–173.

Информация об авторе:

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, ГСП-2, ул. Первомайская, д. 54; e-mail: nntimonina@geo.komisc.ru).

About the author:

Natalia N. Timonina – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, Head of the Laboratory of Geology of Oil and Gas Basins 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, 167982 Russian Federation; e-mail: nntimonina@geo.komisc.ru).

Для цитирования:

Тимонина, Н. Н. «Ей покорялись Уральские горы» (памяти Р. Г. Тимониной) / Н. Н. Тимонина // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 106-111.

For citation:

Timonina, N. N. «Ej pokoryalis Uralskie gory» (pamyati R. G. Timoninoj) ["The Ural Mountains were conquered by her" (in memory of R. G. Timonina)] / N. N. Timonina // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 106-111.

Дата поступления статьи: 25.03.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 25.03.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 551(733, 7734):567.47
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-112-114

Воспоминание о Валентине Николаевне Каратаюте-Талимаа

З. П. Юрьева

г. Архангельск
urevazinaida5@gmail.com

Аннотация

Валентина Николаевна Каратаюте-Талимаа – известный ученый-палеонтолог. Она изучала фауну палеозойских позвоночных различных регионов Северного полушария. Разработала важные аналитические методы изучения позвоночных. Комплексы позвоночных позволили проследить латеральное изменение палеозойских отложений. В 2025 г. геологическое палеонтологическое общество будет отмечать 95-ю годовщину со дня рождения Валентины Николаевны.

Ключевые слова:

палеонтология, позвоночные, девон, силур, стратиграфия

To the memory of Valentina Nikolaevna Karatayute-Talimaa

Z. P. Yurieva

Arkhangelsk
urevazinaida5@gmail.com

Abstract

Valentina Nikolaevna Karatayute-Talimaa was a well-known palaeonthologist. She studied the Palaezoic vertebrates from different regions of the Northern hemisphere. She developed important analytical methods for studying vertebrates. The vertebrate complexes allowed to trace the lateral change of the Paleozoic deposits. The Geological Palaeonthological Society would celebrate the 95th anniversary of the birth of Valentina Nikolaevna in 2025.

Keywords:

palaeonthology, vertebrates, Devonian, Silurian, stratigraphy

Для расчленения и сопоставления палеозойских осадочных толщ используется биостратиграфический метод. В практическом применении биостратиграфического метода, в создании основы по развитию групп ихтиофауны ведущую роль занимала **Валентина Николаевна КАРАТАЮТЕ-ТАЛИМАА.**

Валентина Николаевна в 1953 г. участвовала в геологических экскурсиях, что стало для нее судьбоносным. Студентке Вильнюсского университета представилась прекрасная возможность не только увидеть известные обнажения Прибалтики, но и поработать со знаменитыми учёными – геологами и палеонтологами России, Белоруссии, республик Балтии. Среди таких знаменитых ученых был профессор Дмитрий Владимирович Обручев, который стал опекать молодую студентку Валю. Объяснял, как надо работать на обнажениях.

В 1955–1957 гг. Валентина Николаевна училась в аспирантуре в Москве, в Палеонтологическом институте АН СССР у профессора Д. В. Обручева. Кандидатская диссертация была посвящена астеролепидам среднего и позднего девона северо-западной части Главного Девонского Поля (Псковская и Ленинградская области).

В 1958–1959 гг. в полевых работах в Новгородской области, на территории Литвы и Латвии, был собран большой материал по ботриолепидам и кистепёрым (этот материал хранится в Москве). Работа на обнажениях была продолжением учебы палеоихтиологов: как вести раскопки и как подготовить к транспортировке кости рыб.

Важным поворотом в пути геолога-палеонтолога, уже ставшей кандидатом биологических наук, были подготовка и участие в 1968 г. в Международном симпозиуме по границе силура и девона в Праге. Для подготовки симпозиума были запланированы полевые экскурсии на основные разрезы, в которых граница силура и девона лучше всего представлена. Следовало установить «стратотип границы». На территории СССР были намечены два разреза: в Подолии (Украина) и на Салаире. Подготовка к симпозиуму происходила значительно раньше: Валентине Николаевне было поручено организовать полевые работы в 1963 г. и 1965 г. для изучения разрезов Подолии по р. Днестр и ее притокам.

Во время Международного симпозиума в 1968 г. был не только подтвержден девонский возраст красноцветных отложений в подольском разрезе, но и доказано значение позвоночных (в том числе их микроостатков) при установлении возраста терригенных отложений. Результаты исследования были включены в монографию, изданную в Литве [1]. В период подготовки к Международному симпозиуму была подготовлена статья, опубликованная затем в престижных изданиях Великобритании и СССР [2]. С тех пор Валентина Николаевна начала исследования силурийских и девонских отложений в разных регионах их распространения.

В 1978 г. вышла в свет монография Валентины Николаевны «Телодонты силура и девона СССР и Шпицбергена» [3], подготовленная на основе докторской диссертации. В работе изложены результаты обработки собственных полевых сборов и наблюдений, а также коллекций, переданных геологами из разных регионов. Была доказана стратиграфическая ценность телодонтов, которая определяется относительно быстрым развитием группы и широким горизонтальным распространением ее представи-

телей в отложениях силура и нижнего девона Северного полушария. Обосновано большое значение телодонтов при расчленении и корреляции разнофациальных разрезов нижнего и среднего девона. Проведено сопоставление разрезов СССР с разрезами Англии, Швеции, Норвегии, Шпицбергена, Канадской Арктики.

Изучение ихтиофауны в отложениях палеозоя Тимано-Североуральского региона выполнялось по материалам, которые присылали геологи Ухты, Сыктывкара, Архангельска.

После заключения договора Литовского института геологии и географии с государственным предприятием «Архангельскгеология» (1988–1992) работы проводились по программе «Биостратиграфический анализ и расчленение поддоманиковой части разреза северо-востока Тимано-Печорской провинции». Более 2,5 тыс. образцов керна глубоких скважин были исследованы на определение позвоночных. В соответствии с договором составлены списки позвоночных по группам. Валентина Николаевна выполнила определения телодонтов, гетеростраков, остеостраков, плакодерм, кистеперых, лучеперых и хрящевых. Устанавливалось вертикальное распространение позвоночных в разрезах осадочных отложений силура и девона. Материалы обобщались и анализировались по тектоническим зонам, площадям геологоразведочных работ. Валентина Николаевна всегда отмечала в породах присутствие флоры, другой фауны: брахиоподы, остракоды, криноидеи, пелециподы, конодонты, эвриптериды и др. Обращалось внимание на условия захоронения органических остатков. При фиксировании перерывов осадконакопления учитывались фациальные особенности пограничных отложений. Определения фрагментов ихтиофауны сопровождались ссылкой на результаты исследования костных остатков, обнаруженных в разных геологических регионах планеты.

В рамках договора были поездки в нефтегазоразведочные экспедиции, на базе которых находился керн пород, поднятый с больших глубин при проходке скважин. Кернохранилища экспедиций в г. Нарьян-Мар, поселках Варандей и Амдерма содержали уникальный каменный материал, при изучении которого открывались интересные, порой неожиданные геологические обстоятельства.

Вспоминаю некоторые эпизоды в общении с Валентиной Николаевной. Ее исследования доказали преимущество костных микроостатков при расчленении разрезов разнофациальных отложений, вскрытых скважинами.

В череде стратиграфических открытий стало выделение пражского и эмсского ярусов нижнего девона в северных разрезах Варандей-Адзьвинской структурно-тектонической зоны (ВАСЗ).

Многочисленные фрагменты телодонтов *Katoporus timanicus*, установленных в светло-серых алевролитах, подтвердили полный разрез силура в северной части ВАСЗ и регрессивную направленность осадконакопления в позднем силуре.

В породах, поднятых с глубин 4499–4516 м в скв.300 Восточно-Ярейюской (Колвинский мегавал Печоро-Колвинского авлакогена), обнаружена мелкая форма, близкая балтийской *Bothriolepis prima* (Gross, 1942). В глинистых алевролитах вместе с фрагментами панцырей



Отбор образцов нижнедевонских пород, слева направо: Т. М. Безносова (сидит), Г. Вайтекунене, В. Н. Каратаюте-Талимаа. Хорейверская нефтегазоразведочная экспедиция, г. Нарьян-Мар (1986).
Sampling of the Lower Devonian rocks, from left to right: T. M. Beznosova (sitting), G. Vaitekunene, V. N. Karatayute-Talimaa. The Khoreyverskaya oil and gas exploration expedition, Naryan-Mar (1986).



В. Н. Каратаюте-Талимаа в кернохранилище Амдерминской нефтегазоразведочной экспедиции, пос. Амдерма (1987).
V. N. Karatayute-Talimaa in the core storage of the Amderminskaya oil and gas exploration expedition, Amderma village (1987).

ботриолепид установлены и дискретные чешуи *Moythomasia perforata* (Gross, 1942). Этот род был распространен в палеобассейнах позднего девона (франа) Балтийского региона и Главного Девонского Поля. Находки чешуй Moythomasia и панцырей Bothriolepis были аргументами, которые при сопоставлении франских разрезов не позволили пачку глинистых отложений с фауной рыб в скв. 300 сопоставлять с верхней глистой пачкой старооскольского надгоризонта среднего девона, установленного в опорном Харьягинском разрезе мегавала. Тем самым определены стратиграфические объемы и граница отложений средне-

го и верхнего девона. А также уточнен контур распространения среднедевонских отложений, которые являются традиционно нефтеносными.

В терригенно-глинистых отложениях, вскрытых скважиной 1 Южно-Вангурейской (север Колвинского мегавала), Валентина Николаевна выделила фрагменты рыб, определение которых опровергло ожидание среднедевонских отложений в разрезе скв.1 и позволило установить более полный стратиграфический объем нижнего девона в разрезе восточного тектонического блока мегавала.

Валентина Николаевна – Заслуженный геолог СССР, всегда энергичная, со множеством научных планов, была душой геологического общества. Сотрудничала с коллегами России, Латвии, Эстонии, Германии, Франции, Австралии. Она участвовала в конференциях, проходивших в Китае, Канаде, странах Западной Европы. Ее ученики приезжали в Литовский институт из российских, китайских, французских и др. институтов.

В одном из писем Валентина Николаевна написала: «Приходит весна и я все чаще думаю о полевых работах. Грустно, что нельзя вот так запросто сесть и полететь в дорогие моему сердцу места. Поездки по всяким там Лондонам и Парижам, конечно, хорошо, но поле есть поле и ничем его не заменишь».

2 августа 2022 г. ушла из жизни Великая женщина. Так называл ее Владимир Владимирович Меннер. В 2025 г. геологическое палеонтологическое общество будет отмечать юбилейную дату со дня рождения Валентины Николаевны – 95 лет.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Нарбутас, В. В. Красноцветная формация нижнего девона Прибалтики и Подолии / В. В. Нарбутас. – Вильнюс: Мокслас, 1984. – 136 с.
2. Обручев, Д. В. Фауна позвоночных и корреляция лудловских и нижнедевонских отложений Восточной Европы / Д. В. Обручев, В. Н. Каратаюте-Талимаа // Очерки по филогении и систематике ископаемых рыб и бесчелюстных. – М.: Наука, 1968. – С. 63–70.
3. Каратаюте-Талимаа, В. Н. Телодонты силура и девона СССР и Шпицбергена / В. Н. Каратаюте-Талимаа. – Вильнюс: Мокслас, 1978. – 338 с.

References

1. Narbutas, V. V. Krasnozvetnaya formaziya nizhnego Devona Pribaltiki i Podolii [Red-Coloured Formation of the Lower Devonian of the Baltic and Podolia Mountains] / V. V. Narbutas. – Vilnius: Mokslas, 1984. – 136 p.
2. Obrutsev, D. V. Fauna pozvonochnyh i korrelyaziya ludlovskih i nizhnedevonskih otlozheniy Vostochnoy Evropy [Vertebrate fauna and correlation of the Ludovian and Lower Devonian sediments of Eastern Europe] / D. V. Obrutsev, V. N. Karatayute-Talimaa // Ocherki po filogenii i sistematike iskopaemyh i beschelyustnyh [Essays on the Phylogeny and Systematics of Fossil Fishes and Pelagic Fishes]. – Moscow: Nauka, 1968. – P. 63–70.
3. Karatayute-Talimaa, V. N. Telodonty silura i devona SSSR i Shpizbergena [Silurian and Devonian telodonts of the USSR and Svalbard] / V. N. Karatayute-Talimaa. – Vilnius: Mokslas, 1978. – 338 p.

Информация об авторе:

Юрьева Зинаида Петровна – кандидат геолого-минералогических наук (Российская Федерация, г. Архангельск, ул. Воскресенская, д. 108; e-mail: urevazinaida5@gmail.com).

About the author:

Zinaida P. Yurieva – Candidate of Sciences (Geology and Mineralogy) (108 Voskresenskaya st., Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: urevazinaida5@gmail.com).

Для цитирования:

Юрьева, З. П. Воспоминание о Валентине Николаевне Каратаюте-Талимаа / З. П. Юрьева // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 112–114.

For citation:

Yurieva, Z. P. Vospominanie o Valentine Nikolaevne Karatayute-Talimaa [To the memory of Valentina Nikolaevna Karatayute-Talimaa] / Z. P. Yurieva // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 112–114.

Дата поступления статьи: 28.03.2025
Принято решение о публикации: 01.04.2025
Received: 28.03.2025
Accepted: 01.04.2025

УДК 930.2:54(092)
DOI 10.19110/1994-5655-2025-3-115-118

Инженер-исследователь П. И. Толмачев из плеяды академика А. П. Карпинского

Л. П. Рощевская

Отдел гуманитарных междисциплинарных исследований
ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
г. Сыктывкар

lp38rosh@gmail.com

Аннотация

Актуальность темы определяется значимым историко-культурным событием: летом 2025 г. в г. Сыктывкаре ожидают открытие памятника Президенту АН СССР академику А. П. Карпинскому. В 1933 г. он посетил Сыктывкар во главе Печорской бригады АН СССР для оценки ресурсов края. В статье охарактеризована деятельность представителя семьи горных инженеров Карпинских – радиохимика П. И. Толмачева, и показано влияние ряда выдающихся ученых на формирование его характера, деловых качеств, а также выбора профессии. Так, сам академик А. П. Карпинский, который приходится П. И. Толмачеву родным дедом, оказал основополагающее влияние на формирование его характера. Выбор профессии определил академик В. И. Вернадский, которому были близки нравственные устои молодого Толмачева. Академик А. Е. Ферсман представил его статью для публикации в докладах АН СССР. Академик В. Г. Хлопин оценил трудолюбие и неординарный ум по изучению месторождений радия, опубликовал несколько работ в соавторстве и рекомендовал использовать накопленный опыт на радиохимическом производстве в Коми АССР. Под влиянием семьи, научной среды и мирового уровня развития науки П. И. Толмачев стал инженером-исследователем, а промышленная продукция из Ухты, к которой он имел непосредственное отношение, содействовала победе в Великой Отечественной войне.

Ключевые слова:

история науки, научная биография, Печорская бригада Полярной Комиссии АН СССР, академик А. П. Карпинский, академик В. И. Вернадский, академик В. Г. Хлопин.

Research engineer P. I. Tolmachev from the pleiad of academician A. P. Karpinsky

L. P. Roshchevskaya

Department of the Humanitarian Interdisciplinary Studies,
Komi Science Centre of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences,
Syktyvkar

lp38rosh@gmail.com

Abstract

The significance of the topic is determined by an important historical and cultural event: Syktyvkar is expecting the unveiling of a monument to the President of the Academy of Sciences of the USSR academician A. P. Karpinsky in summer 2025. He visited Syktyvkar as head of the Pechora Brigade of the Academy of Sciences of the USSR in 1933 to evaluate the resources of the region. The article characterises the professional career and life journey of the radiochemist P. I. Tolmachev, a representative from the family of the Karpinsky mining engineers. It highlights the influence of a number of prominent scientists on the formation of his character, professional qualities, as well as his choice of occupation. For example, academician A. P. Karpinsky, who was an own grandfather of P. I. Tolmachev, had a principal impact on the formation of his character. The choice of profession was determined by academician V. I. Vernadsky, who shared the moral views of young Tolmachev. Academician A. E. Fersman submitted his article for publication in the reports of the Academy of Sciences of the USSR. Academician V. G. Khlopin appreciated P. I. Tolmachev's diligence and extraordinary mental capabilities demonstrated in works on the radium deposits, published several co-authored papers and recommended to use the accumulated experience in radiochemical production in the Komi ASSR. Under the influence of his family, the scientific environment, and the planet-scale science development level, P. I. Tolmachev became a highly qualified research engineer. The industrial products from Ukhta, where Pavel I. worked for many years, contributed to the victory in the Great Patriotic War.

Keywords:

history of science, scientific biography, Pechora Brigade of the Polar Commission of the Academy of Sciences of the USSR, academician A. P. Karpinsky, academician V. I. Vernadsky, academician V. G. Khlopin

Летом 2025 г. в г. Сыктывкаре ожидают открытия памятника академику Президенту АН СССР А. П. Карпинскому, который в 1933 г. посетил Сыктывкар во главе Печорской бригады АН СССР. Результаты ее работы позволили разработать планы транспортного соединения региона с центром и развития всей страны. Академик выступил перед республиканским активом в доме № 5 по ул. Бабушкина (фото 1). Памятник создал народный художник Российской Федерации скульптор А. И. Неверов.

В связи с открытием памятника, очевидно, представляет интерес не только жизнеописание самого академика-Президента, но и его окружения. Одним из ярких представителей семьи горных инженеров Карпинских был химик П. И. Толмачев (фото 2) – немало сделавший для ста-



Фото 1. Академик А. П. Карпинский и участники Печорской бригады АН СССР (г. Сыктывкар, ул. Бабушкина, 1933 г.).
Photo 1. Academician A. P. Karpinsky and the participants of the Pechora Brigade of the Academy of Sciences of the USSR (Syktyvkar, Babushkin st., 1933).

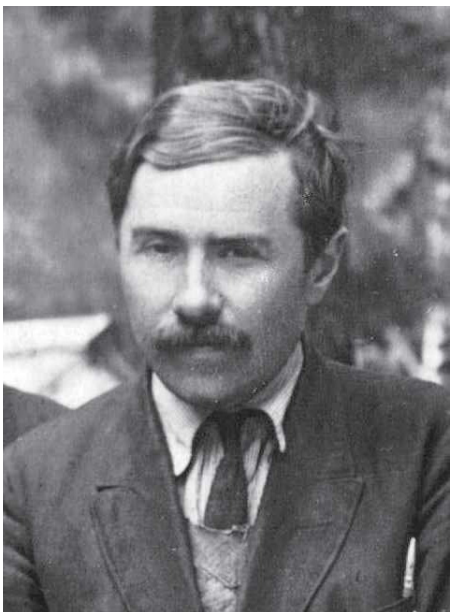


Фото 2. П. И. Толмачев.
Photo 2. P. I. Tolmachev.

новления нового направления науки радиохимии и практической реализации результатов исследований.

Род горных инженеров Карпинских отличался прочными традициями: мальчики обычно учились в лучшем учебном заведении – Горном институте в Петербурге. Академик А. П. Карпинский (1846-1936) стал Президентом императорской Российской академии наук, затем – Президентом АН СССР, имел большое влияние на мировую науку. Дочь академика Е. А. Толмачева-Карпинская с двумя сыновьями всегда жила с отцом [1], а Карпинский очень любил внуков. Старший Павел Толмачев (1901, Ораниенбаум – 1949, Ленинград) стал химиком, младший Александр (1903, С.-Петербург – 1979, Ленинград) – ботаником и часто посещал Коми край.

Литература о П. И Толмачеве невелика из-за засекречивания исследований по радиохимии. Его фамилия впервые появилась только в 1945 г. в связи с разработками Радиевого института [2], а первая биографическая справка – в монографии по истории Печорской бригады АН СССР [3].

Важнейшим источником для реконструкции биографии и научной деятельности П. И. Толмачева являются дневники академика В. И. Вернадского, который назвал Павла «духовно близким ему» биогеохимиком [4].

Основополагающее влияние на формирование Павла оказал сам А. П. Карпинский. Недаром сотрудник Института биологии Коми филиала АН СССР И. С. Хантимер восхищался «изумительно чуткими и человечными отношениями» в семье, что пробуждало «глубочайшее уважение к Вашему роду не только как к роду ученых, но и замечательной русской семье, необыкновенно доброй, душевной и благородной»[1].

[1] Хантимер И. С. Письмо А. И. Толмачеву. 28 декабря 1961 г. // Научный архив Коми НЦ УрО РАН. Ф. 14. Оп. 4. Д. 23. Л. 15.

Павел окончил химическое отделение Петроградского университета, где преподавали известные ученые В. Н. Ипатьев, С. В. Лебедев, А. В. Сапожников и др. В 1922 г. Вернадский создал Радиевый институт и пригласил Толмачева там служить. В институте исследовали радиоактивную руду из рудника на Фергане, а перерабатывали на химическом заводе в дер. Бондюги. Толмачев ездил туда для создания и корректировки промышленного оборудования, чтобы добиться очистки продукции от примесей. В конце 1921 г. в институте получили первые пробы радия, в чем была немалая заслуга Толмачева.

Директор Радиевого института В. Г. Хлопин командировал Толмачева на Московский завод редких элементов для создания сложных опытных химико-технологических установок и изучения новых веществ. П. И. Толмачев самостоятельно ставил и решал научные задачи. Доктор технических наук врач З. В. Ершова отмечала, что «налаженное им производство работало ритмично», но подчеркивала, что ответственные операции на заводе «осуществляли вручную, руки защищались лишь резиновыми перчатками», а Толмачев «производил их собственноручно» [5].

Из-за перебоев с поставкой сырья на юге академик А. Е. Ферсман предложил привлечь ресурсы р. Ухты, где обнаружили радий. Была создана Печорская бригада АН СССР, в которой вместе с А. П. Карпинским трудились его два внука, в том числе и Павел Толмачев. Неподдельный интерес П. И. Толмачева вызывали радийсодержащие воды Ухты, которые, как он особенно подчеркивал, «являются новым видом сырья, впервые используемым в Союзе» [6]. Он предлагал ознакомиться с имеющимися заводскими установками, чтобы дооборудовать химическую лабораторию промысла.

В это время в стране для создания промышленных производств уже активно использовали труд репрессированных. На Ухте возник Ухто-Печорский лагерь с под-

разделением в пос. Водный, где Толмачев стал одним из создателей продукта из переработанной ухтинской воды, а затем на заводе редких элементов в Москве производили новые радиевые препараты. Достоверно известно, что в январе 1937 г. партию препарата повез начальник бромидного отделения вольнонаемный П. И. Толмачев[2], «допущенный к секретному делопроизводству»[3].

К 20 сентября 1942 г. относится последнее упоминание имени П. И. Толмачева в личном дневнике В. И. Вернадского: «На Ухте, где добывается Ra (радий) и где сидит до сих пор Толмачев <…> добыча Ra идет по-прежнему трудом заключенных». Они «(б[ольшей] ч[астью] при сколько-нибудь правильном суде – невинные), по-прежнему работают. Однако положение их ухудшается». Вероятно, академик не догадывался, что до конца войны всем запрещалось покидать пос. Водный.

К послевоенному периоду жизни П.И. Толмачева относятся немногочисленные документы, сохраненные в фонде академика А. П. Карпинского. Одно из наиболее важных – заявление руководства Радиевого института в Высшую Аттестационную Комиссию (ВАК) в июне 1945 г. с просьбой разрешить П. И. Толмачеву защиту диссертации на соискание ученой степени кандидата наук без сдачи экзаменов по кандидатскому минимуму. Подобная практика в годы войны была вызвана перемещением многих вузов из прифронтовой полосы, Москвы и Ленинграда. Так защитили диссертации заведующий химической лабораторией на Водном Ф. А. Торопов и будущий академик репрессированный Г. А. Разуваев. Вероятно, такое разрешение было выдано и Павлу Иннокентьевичу …

Вдова Г. А. Разуваева вспоминала, что в 1934-м – начале 1940-х гг. многие из работавших на Водном погибали: «Работал с нами внук академика Карпинского – через несколько лет умер от этой же болезни <…>, ведь толком никто не знал о последствиях влияния радиации на человека». Павел Иннокентьевич скончался в Ленинграде. 19 октября 1949 г. из Водного поселкового совета отправили соболезнование по поводу его кончины…

Итак, становление П. И. Толмачева как высококлассного специалиста и организатора производства началось в семье Президента АН СССР А. П. Карпинского, где он воспринял лучшие моральные устои. Недаром современники испытывали глубочайшее уважение к замечательной русской семье Карпинских, отмечая их необыкновенную доброту, душевность и благородство. В выборе профессии и занятий П. И. Толмачева основополагающую роль сыграл академик В. И. Вернадский. Нравственные и общественные понятия и взгляды молодого человека совпадали с мировоззрением Вернадского. Неслучайно он отнес его к «духовно близким» ему людям и Павел Толмачев оправдал доверие и высокую оценку выдающегося деятеля мировой науки В. И. Вернадского.

Признавая трудолюбие и хорошие познания в химии, будущий академик В. Г. Хлопин ценил П. И. Толмачева, разработавшего способ отделения радия от бария, отвечавшего за первый выпуск промышленного радия.

При непосредственном участии П. И. Толмачева водный промысел под Ухтой стал центром, где промышленным способом был получен радий. Масштабы деятельности радиохимика П. И. Толмачева охватывали несколько районов страны, но самым существенным стало изучение месторождения радия на р. Ухте. Под влиянием семьи, научной среды и мирового уровня развития науки Толмачев стал высококлассным инженером-исследователем, его поддерживали великие современники, а промышленная продукция из Ухты содействовала победе в Великой Отечественной войне.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Тихомиров, В. В. Евгения Александровна Толмачева-Карпинская: [Некролог] / В. В. Тихомиров // Известия АН СССР. Серия геологическая. – 1963. – № 10. – С. 104–105.
2. 220 лет Академии наук СССР. 1725-1945 / ред. Н. Г. Бруевич; сост.: В. С. Яблоков, Л. А. Плоткин. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945. – С. 164-165.
3. Рощевский, М. П. Печорская бригада академика А. П. Карпинского / М. П. Рощевский, Л. П. Рощевская, А. А. Бровина. – Сыктывкар: Коми научный центр УрО РАН, 2015. – С. 617.
4. Вернадский, В. И. Дневники 1935-1941 в 2-х книгах / В. И. Вернадский; отв. ред. В. П. Волков. Кн. 1. 1935–1938. – М.: Наука, 2006. – С. 100.
5. Ершова, З. В. Мои встречи с академиком В. Г. Хлопиным (1924-1950 гг.) / З. В. Ершова // Академик В. Г. Хлопин. Очерки, воспоминания современников. – Л.: Изд-во «Наука», 1987. – С. 98.
6. Красный север. – Вологда, 1933. – 9 июня. – № 126 (4211).

References

1. Tikhomirov, V. V. Evgeniya Aleksandrovna Tolmacheva-Karpinskaya: [Obituary] / V. V. Tikhomirov // Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Geological series. – 1963. – № 10. – P. 104–105.
2. 220 let Akademii nauk SSSR. 1725-1945 [220 years of the USSR Academy of Sciences. 1725-1945] / edited by N. G. Bruevich; comp. by V. S. Yablokov, L. A. Plotkin. – M.; L.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1945. – P. 164–165.
3. Roshchevsky, M. P. Pechorskaya brigada akademika A. P. Karpinskogo [The Pechora Brigade of academician A. P. Karpinsky] / M. P. Roshchevsky, L. P. Roshchevskaya, A. A. Brovina. – Syktyvkar: Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015.– P. 617.
4. Vernadsky, V. I. Dnevniki 1935-1941 v 2-h knigah [Diaries 1935-1941 in 2 books] / V. I. Vernadsky; ed. V. P. Volkov. Book 1. 1935-1938. – M.: Nauka, 2006. – P. 100.

[2] Ведомственный архив завода «Прогресс». Д. 92. Разрозненные документы. Л. 46.

[3] Центральный государственный архив Санкт-Петербурга. Личное дело сотрудника Комитета по образованию. Ф. Р-5039. Оп. 2. Д. 237.

5. Ershova, Z. V. Moi vstrechi s akademikom V. G. Hlopinym (1924-1950 gg.) [My meetings with academician V. G. Khlopin (1924-1950)] / Z. V. Ershova // Akademik V. G. Hlopin. Ocherki, vospominaniya sovremennikov [Academician V. G. Khlopin. Essays, Memoirs of Contemporaries]. – L.: Nauka, 1987. – P. 98.
6. Krasny sever [Red North]. – Vologda, 1933. – June 9th. – № 126 (4211).

Благодарность (госзадание):

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания по теме НИР № 1022041400015-8-6.1.1 «Наука на Севере России как основа устойчивого развития регионов Европейского Севера и Арктической зоны РФ».

Acknowledgments (state task)

The article was prepared within the frames of the state task on the research theme № 1022041400015-8-6.1.1 'Nauka na Severe Rossii kak osnova ustojchivogo razvitiya regionov Evropejskogo Severa i Arkticheskoj zony RF [Science in the North of Russia as the basis for sustainable development of the regions of the European North and the Arctic zone of the Russian Federation]'.

Информация об авторе:

Рощевская Лариса Павловна – профессор, доктор исторических наук, главный научный сотрудник, отдел гуманитарных междисциплинарных исследований, Федеральный Исследовательский Центр «Коми научный центр, Уральское Отделение РАН»; Researcher ID Y-4434-2019. ORCID iD 0000-0003-2608-0996 (167982, Российская Федерация, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24; e-mail: lp38rosh@gmail.com).

About the author:

Larisa P. Roshchevskaya – Professor, Doctor of Sciences (History), Chief Researcher, Department of Interdisciplinary Humanitarian Studies, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; Researcher ID Y-4434-2019. ORCID iD 0000-0003-2608-0996 (24 Kommunisticheskaya str., Syktyvkar, Komi Republic, 167982 Russian Federation; e-mail: lp38rosh@gmail.com).

Для цитирования:

Рощевская, Л. П. Инженер-исследователь П. И. Толмачев из плеяды академика А. П. Карпинского / Л. П. Рощевская // Известия Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук. Серия «Науки о Земле». – 2025. – № 3 (79). – С. 115–118.

For citation:

Roshchevskaya, L. P. Inzhener-issledovatel P. I. Tolmachev iz pleyady akademika A. P. Karpinskogo [Research engineer P. I. Tolmachev from the pleiad of academician A. P. Karpinsky] / L. P. Roshchevskaya // Proceedings of the Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Series "Earth Sciences". – 2025. – № 3 (79). – P. 115–118.

Дата поступления статьи: 21.04.2025
Принято решение о публикации: 25.04.2025
Received: 21.04.2025
Accepted: 25.04.2025

Научный журнал

ИЗВЕСТИЯ

Коми научного центра
Уральского отделения Российской академии наук

Серия «Науки о Земле»
№ 3 (79)

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 – О. А. Гросу
Переводчик - Е. С. Кузьмина
Оригинал-макет – Е. Н. Старцева
Дизайн обложки – Я. С. Куликова

Лицензия № 0047 от 10.01.1999.
Подписано в печать 30.04.2025. Дата выхода в свет 07.05.2025.
Уч.-изд.л. 17,0. Усл. печ.л. 16,7. Тираж 300. Заказ № 23.
Формат 60x84 1/8. 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 Уральского отделения Российской академии наук».
167982, Российская Федерация, ГСП-2, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, д. 24.