

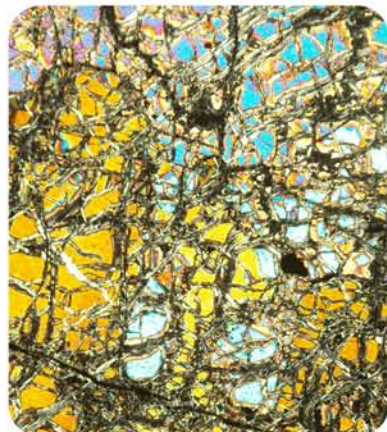


ISSN 2712-7761

№ 2 (362), февраль 2025



# Вестник геонаук





# *Vestnik of Geosciences* **Вестник геонаук**

Февраль  
February  
2025,  
№ 2 (362)

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

**Главный редактор** А. М. Асхабов

**Зам. главного редактора** И. Н. Бурцев

**Зам. главного редактора** О. Б. Котова

**Ответственный секретарь** И. В. Козырева

**Chief Editor** A. M. Askhabov

**Deputy Chief Editor** I. N. Burtsev

**Deputy Chief Editor** O. B. Kotova

**Executive Secretary** I. V. Kozyreva

## **Редакционный совет**

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

**Технический редактор** Г. Н. Каблис

**Заведующий редакцией** Т. А. Некучаева

## **Editorial Board**

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

**Technical Editor** G. N. Kablis

**Managing Editor** T. A. Nekuchaeva

## **НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**

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

**Предыдущее название:**

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор  
РИНЦ журнала (2025) — 0.540



## **SCIENTIFIC JOURNAL**

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

**Former title:**

Vestnik of Institute of Geology of Komi SC UB RAS

Two-year RSCI  
impact factor (2023) — 0.540

[geo.komisc.ru/vestnik](http://geo.komisc.ru/vestnik)

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

Минералого-петрогеохимические особенности субщелочных порфировых пород зоны ГУР (балбукский комплекс, Магнитогорская мегазона Южного Урала) <i>А. А. Самигуллин, И. Р. Рахимов</i> .....3	Mineralogical and petrogeochemical features of subalkaline porphyries (Balbuk complex, Southern Urals) <i>A. A. Samigullin, I. R. Rakhimov</i> .....3
Геохимическая зональность вторичных ореолов рассеяния флангов Нежданинского золоторудного месторождения, Якутия <i>Ю. М. Панасенко, Д. Н. Чужин</i> .....17	Geochemical zoning of secondary dispersion halos on the flanks of the Nezhdaninskoye gold ore deposit, Yakutia <i>Y. M. Panasenko, D. N. Chuzhinov</i> .....17
Геохимические особенности почвенного покрова острова Валаам <i>Е. Г. Панова, А. А. Шешукова, К. А. Бахматова, Г. А. Русаков, С. Н. Чуков</i> .....27	Geochemical features of soils of Valaam Island <i>E. G. Panova, A. A. Sheshukova, K. A. Bakhmatova, G. A. Rusakov, S. N. Chukov</i> .....27
Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году <i>Н. Н. Носкова, Ф. Г. Верхоланцев</i> .....34	Temporary seismic observations in the north of the Komi Republic (Polar Urals) in 2023 <i>N. N. Noskova, F. G. Verkholtantsev</i> .....34
Вильгельм Оствальд. Творец физической химии <i>А. М. Асхабов</i> .....44	Wilhelm Ostwald. The Creator of Physical Chemistry <i>A. M. Askhabov</i> .....44
Оценка объемного содержания фаз по случайным сечениям <i>А. В. Журавлев</i> .....50	Estimation of volumetric content of phases from random cross sections <i>A. V. Zhuravlev</i> .....50

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

ДЕНЬ РОССИЙСКОЙ НАУКИ — 2025	RUSSIAN SCIENCE DAY 2025
Загадки недр .....54	Riddles of Mineral Resources .....54
День открытых дверей «Твой успех» в СГУ им. Питирима Сорокина — направление подготовки «геология» .....55	Open Day “Your Success” at the Pitirim Sorokin Syktyvkar State University — “Geology” training program .....55

Правила  
оформления  
статей



Vestnik  
article  
Formatting



## Минералого-петрогеохимические особенности субщелочных порфировых пород зоны ГУР (балбукский комплекс, Магнитогорская мегазона Южного Урала)

А. А. Самигуллин, И. Р. Рахимов

Институт геологии УФИЦ РАН, Уфа, Россия, samigullinaidar85@gmail.com

В статье впервые даётся детальное минералого-петрогеохимическое описание порфировых пород шариповской группы балбукского комплекса зоны Главного Уральского разлома Южного Урала. Они визуально разделяются на 4 основных типа по окраске, количеству и составу вкрапленников, но в целом обладают близким минеральным составом, являясь членами единой трахиандезит-трахитовой ассоциации. Важнейшим минералом, определяющим условия образования пород, является амфибол, соответствующий паргаситу и магнезиогастингситу ( $Mg\#$  варьирует от 0.80 до 0.35). Кристаллизация амфибола началась при температуре около 842–973 °С. Фракционирование амфибола в трахитовой магме обусловило петрогеохимические вариации пород, выраженные в распределении главных петрохимических компонентов и ряда несовместимых элементов. Геохимически шариповские порфировые породы близки к адакитам (высокие  $Sr/Y$ ,  $La/Yb$ -отношения), а их источниками могли быть породы нижней коры Южного Урала (включающие ультрабазит-базиты Главного Уральского разлома и рифейские осадочно-метаморфические образования).

**Ключевые слова:** шариповская группа, балбукский комплекс, минералогия, амфибол, геохимия, адакитоподобные порфировые породы

## Mineralogical and petrogeochemical features of subalkaline porphyries (Balbuk complex, Southern Urals)

A. A. Samigullin, I. R. Rakhimov

Institute of geology UFRS RAS, Ufa, Russia

The article provides a novel detailed mineralogical and petrogeochemical description of the Sharip group porphyries. They are visually divided into 4 main type by color, quantity and composition of inclusions, but in general have a similar mineral composition, being members of a single trachyandesite-trachyte association. The most important mineral determining the conditions of rock formation is amphibole, corresponding to pargasite and magnesiohastingsite ( $Mg\#$  varies from 0.80 to 0.35). Amphibole crystallization began at a temperature of about 842–973 °C. Amphibole fractionation in trachyte magma caused petrogeochemical variations in the rocks, expressed in the distribution of the main petrochemical components and the level of accumulation of a number of incompatible elements. Geochemically, the Sharip porphyries are close to adakites (high  $Sr/Y$ ,  $La/Yb$  ratios), and their sources could have been rocks of the lower crust of the Southern Urals (including ultramafic-mafic rocks of the Main Ural Fault and Riphean sedimentary-metamorphic formations).

**Keywords:** Sharipovo group, Balbuk complex, mineralogy, amphibole, geochemistry, adakite-like porphyries

### Введение

Магнитогорская мегазона (ММ) представляет собой реликт хорошо сохранившейся девонской островной дуги, включающий в себя разнообразные по составу и металлогеническому потенциалу магматические образования как субдукционной, так и постсубдукционной стадий (Салихов, Митрофанов, 1994; Салихов и др., 2019; Ферштатер, 2013). Мегазона вытянута с севера на юг на 400 км и находится в центральной части Южного Урала между двумя сутурными зонами — зоной Главного Уральского разлома (ГУР) на западе и Уйско-Новооренбургской шовной зоной на востоке (Пучков, 2010). ММ вмещает уникальные медно-цинково-колчеданные и различные по генезису и запасам золоторудные месторождения. Часть месторождений золота связывается с монцитонитовидным магматизмом балбукского комплекса (т. н. балбукидами), расположенного внутри одноимённого гранитоидно-

го ареала в северной части ММ (Салихов, Бердников, 1985; Знаменский, 2009). Происхождение этого комплекса весьма дискуссионно, что связано и с его сложным геолого-структурным положением, и со слабой минералого-геохимической изученностью (Салихов и др., 2019). Чаще всего его формирование связывается с коллизионными обстановками (Рахимов и др., 2024). В составе балбукского комплекса выделяется группа массивов, состоящих из порфировых пород среднего состава и локализованных в зоне Главного Уральского разлома. Она названа нами шариповской группой, а её изучение даёт возможность уточнить не только развитие балбукского комплекса, но и проследить тектоно-магматическую эволюцию пограничной зоны ММ и ГУР. Статья освещает результаты минералого-петрографического и геохимического изучения пород шариповской группы балбукского комплекса в петрогенетическом контексте. Целью данной рабо-

**Для цитирования:** Самигуллин А. А., Рахимов И. Р. Минералого-петрогеохимические особенности субщелочных порфировых пород зоны ГУР (балбукский комплекс, Магнитогорская мегазона Южного Урала) // Вестник геонаук. 2025. 2(362). С. 3–16. DOI: 10.19110/geov.2025.2.1

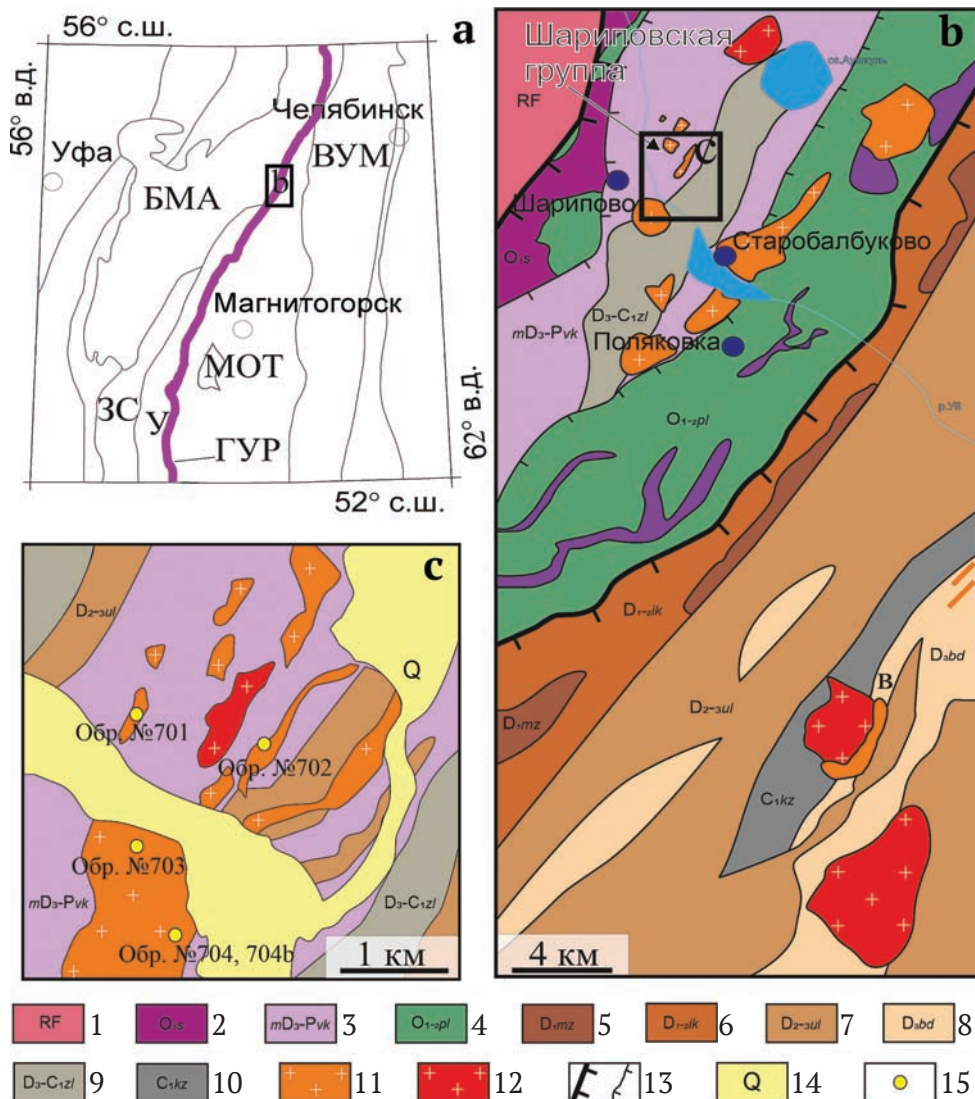
**For citation:** Samigullin A. A., Rakhimov I. R. Mineralogical and petrogeochemical features of subalkaline porphyries (Balbuk complex, Southern Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 2(362). pp. 3–16, DOI: 10.19110/geov.2025.2.1

ты является вещественная характеристика субщелочных порфировых пород шариповской группы, поскольку такие породы ранее не описывались в составе балбукского комплекса.

### Геологическое строение района

Вдоль границы ММ и ГУР (рис. 1, а), имеющей сложные геолого-структурные очертания, развиты блоки разнообразных по составу, условиям происхождения

и возрасту пород: фрагменты мантийной и коровой частей разреза офиолитов, включая осадочные породы, океанические(?) базальты и туфобазальты, кремни, глубоководные известняки, а также вулканогенно-осадочные толщи островодужной стадии. Кроме того, вдоль этой границы развиты габбро-монзонит-гранитовые ассоциации пород, объединяемые в самостоятельные краснохтинский и балбукский комплексы. Если возраст первого определен  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -методом в  $357 \pm 8$  млн лет (Рязанцев и др., 2019), то с изотопными датировками



**Рис. 1.** Геологическое строение района: а — схематическое строение Южного Урала, б — геологическое строение зоны ГУР и прилегающих территорий (Жданов и др., 2015), с — шариповская группа массивов в зоне ГУР (Анисимов и др., 1983).

Условные обозначения: 1 — рифей, 2 — сакмарский дунит-гарцбургитовый комплекс, 3 — войкаро-кемпирсайский меланжевый комплекс, 4 — поляковская свита, 5 — мазовская свита, 6 — ирендыкская свита, 7 — улутауская свита, 8 — бугодакская толща, 9 — зилайская свита, 10 — кизильская свита, 11 — балбукский комплекс (преимущественно монзониты), 12 — риолит-порфиры, 13 — надвиги, 14 — четвертичные образования, 15 — места пробоотбора

*Примечание:* БМА — Башкирский мегантиклинорий, ЗСУ — Зилайский синклиний, У — антиклинорий Уралтау, МОТ — Магнитогорский островодужный террейн (Магнитогорская мегазона), ВУМ — Восточно-Уральская мегазона, ГУР — Главный Уральский разлом (Вознесенско-Присакмарская зона)

**Fig. 1.** Geological structure of the area: а — schematic structure of the Southern Urals, б — geological structure of GYP zone and adjacent territories (Zhdanov et al., 2015), с — Sharipovskaya group of massifs in GYP zone (Anisimov et al., 1983).

Legend: 1 — Riphean, 2 — Sakmara dunite-harzburgite complex, 3 — Voikaro-Kempirsai melange complex, 4 — Polyakov formation, 5 — Mazovskaya formation, 6 — Irendyk formation, 7 — Ulutau formation, 8 — Bugodak sequence, 9 — Zilair formation, 10 — Kizil formation, 11 — Balbuk complex (mainly monzonites), 12 — rhyolite-porphyr, 13 — thrusts, 14 — Quaternary formations, 15 — sampling sites

*Note:* БМА — Bashkir meganticlinorium, ЗСУ — Zilair synclinorium, У — Uraltau anticlinorium, МОТ — Magnitogorsk island-arc terrane (Magnitogorsk megazone), ВУМ — East Ural megazone, ГУР — Main Uralian fault (Voznesensk-Prisakmara zone)



второго существуют многолетние сложности, связанные с широким диапазоном изотопных определений — от ~360 до ~280 млн лет (Жданов и др., 2003; Салихов и др., 2019). Недавно авторами настоящей работы по результатам Rb-Sr-изохронных датировок сделан вывод о том, что к балбукскому комплексу следует относить лишь монцонитоиды с раннекаменноугольным возрастом, тогда как гранитоиды имеют позднекаменноугольный возраст и должны быть отделены от «балбукид» (Рахимов и др., 2024). В частности, нами датирован образец монцонит-порфира шариповской группы массивов —  $354.2 \pm 1.4$  млн лет (Rb-Sr).

Шариповская группа массивов (ШГМ) включает более десятка мелких тел, локализованных к северо-востоку от с. Шарипово в серпентинитовом меланже войкаро-кемпирсайского комплекса тектонитов (рис. 1, b, c) с блоками известняков и туфогенных пород вулканогенных и осадочных пород девона и карбона. Массивы, крупнейший из которых имеет размеры  $1.2 \times 1$  км, сложены субвулканитами — порфиrowыми породами с трахиандезитовой или микромонцонитовой основной массой. Многие тела ШГМ имеют субизометричную ( $\sim 50 \times 50$  м) и продолговатую ( $\sim 50 \times 100$  м) форму на плане, на местности они выражены как небольшие сопки размером до  $100 \times 100$  м и высотой до 20 м. Контакты с вмещающими породами задернованы. С монцонит-порфирами ШГМ ассоциируют линзовидные тела риолит-порфиrow аушкульского типа (Самигуллин, Рахимов, 2023), имеющие тектонические контакты с породами серпентинитового меланжа, что видно в местах задира экскаватора. Таким образом, тектонические контакты можно предположить и для монцонитоидных тел.

### Материалы и методы исследований

Объект исследования — шариповская группа массивов, расположенная к юго-западу от озера Аушкуль в пределах Главного Уральского разлома, представленная субизометричными и вытянутыми сопками, которые сложены порфиrowыми субвулканитами. Полевые геологические исследования с отбором штучных проб (рис. 1) проведены авторами в 2012 и 2022—2024 гг. Отобрано 9 образцов, из которых 4 пробы по 5 кг — для характеристики их минералогического и химического состава. Из 9 отобранных образцов ШГМ было изготовлено 15 шлифов и пластин, изученных с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии. В статье приводится описание 4 проб (№ 701, 702, 703, 704), характеризующих самые распространенные типы пород. Состав минералов определен с помощью энергодисперсионного спектрометра Xplorer 15 Oxford Instruments, установленного на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 4 Compact (ИГ УФИЦ РАН, Уфа). Обработка спектров производилась автоматически при помощи программного пакета AzTec One с методикой TrueQ. При съемке использованы следующие параметры: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда в диапазоне 3—4 нА, время накопления спектра 20 с в режиме Point&ID.

Химический состав пород определен методами рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) и масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС). Методом РФА определены содержания петроген-

ных элементов на спектрометре X-Calibur (Израиль) в ИГ УФИЦ РАН. Пределы обнаружений для элементов составляли от 0.01 до 0.02 мас. %, для V, Ni и Cr — в диапазоне 5—10 г/т. Для построения калибровочных графиков использовались аттестованные государственные образцы магматических пород. Определение микроэлементного состава выполнено на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой Agilent 7500cx, Agilent Technologies (США) в ТРЦКП (Томск).

### Результаты

#### Петрографическая характеристика порфиrowых пород

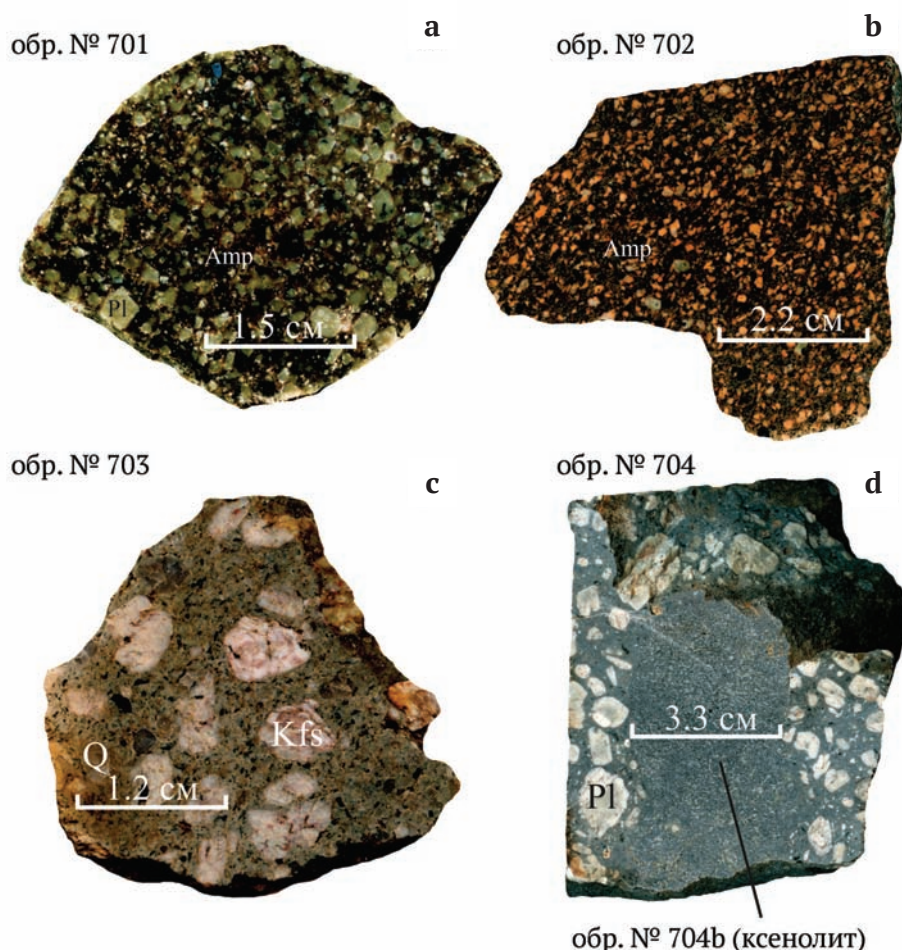
Изучаемые породы обладают массивной текстурой и имеют разнообразную цветовую окраску (от зеленоватой до красноватой) (рис. 2). Среди образцов по окраске и ряду отличительных петрографических признаков (состав, размеры и количество порфиrowых вкрапленников) нами выделены 4 типа порфиrowых пород.

Породы первого типа (обр. 701) наиболее распространены в массивах. Фенокристы занимают 42 % от объема породы (рис. 2, а; 3, а). Они представлены амфиболом размерами от  $1 \times 1.1$  до  $8 \times 3.5$  мм с таблитчатым и субизометричным обликом зёрен и плагиоклазом размерами от  $1.5 \times 0.5$  до  $4.4 \times 4$  мм. Амфибол частично или почти полностью хлоритизирован, плагиоклаз нацело сосюритизирован. Тонкокristаллическая основная масса сложена альбитом, КПШ, амфиболом и эпидотом с размером зёрен от 0.03 до 0.11 мм. Акцессорные минералы представлены титанитом, цирконом, апатитом и манганопатитом.

Породы второго типа (обр. 702) обладают красноватой окраской (рис. 2, b; 3, b). Фенокристы занимают 45 % от объема породы. Они представлены амфиболом, размерами от  $0.5 \times 0.7$  до  $4.2 \times 4$  мм с таблитчатым и шестоватым обликом зёрен и плагиоклазом размерами от  $0.3 \times 0.5$  до  $1.8 \times 3$  мм с таблитчатым и субизометричным обликом. Амфибол слабо затронут вторичными изменениями (хлоритизацией), плагиоклаз сосюритизирован. Тонкокristаллическая основная масса представлена зёрнами альбита, КПШ, амфибола, эпидота размером от 0.02 до 0.09 мм. Акцессорные минералы представлены титанитом, апатитом и баритом.

Породы третьего типа (обр. 703) имеют розовато-серую окраску (рис. 2, c; 3, c). Фенокристы занимают 30 % объема породы. В данном типе отсутствуют порфиrowые вкрапленники амфибола, но присутствуют фенокристы кварца размерами от  $0.6 \times 0.8$  до  $2 \times 1.5$  мм, имеющие субизометричный облик, а также плагиоклаза (размер от  $1 \times 1$  до  $7 \times 2.2$  мм) и КПШ (размер от  $2 \times 3.8$  до  $2.2 \times 4.5$  мм). Тонкозернистая основная масса с размерами зёрен от 0.02 до 0.12 мм представлена альбитом, КПШ и кварцем. Акцессорные минералы представлены цирконом, титаном, рутилом и апатитом.

Породы четвертого типа (обр. 704) имеют синевато-серую окраску (рис. 2, d; 3, d). Фенокристы занимают 40 % объема породы. Они представлены призматическим амфиболом размерами от  $0.3 \times 0.5$  до  $1 \times 1.7$  мм, таблитчатым плагиоклазом размерами от  $2 \times 2.2$  до  $7 \times 3$  мм, КПШ с размером от  $3 \times 5$  до  $6 \times 7$  мм. Тонко-



**Рис. 2.** Пришлифовки образцов порфировых пород шариповской группы: а — первого типа, б — второго типа, с — третьего типа, d — четвёртого типа  
**Fig. 2.** Polishing of morphological types of rocks of the Sharip group:

a — porphyries of the first type, b — porphyries of the second type, c — porphyries of the third type, d — porphyries of the fourth type

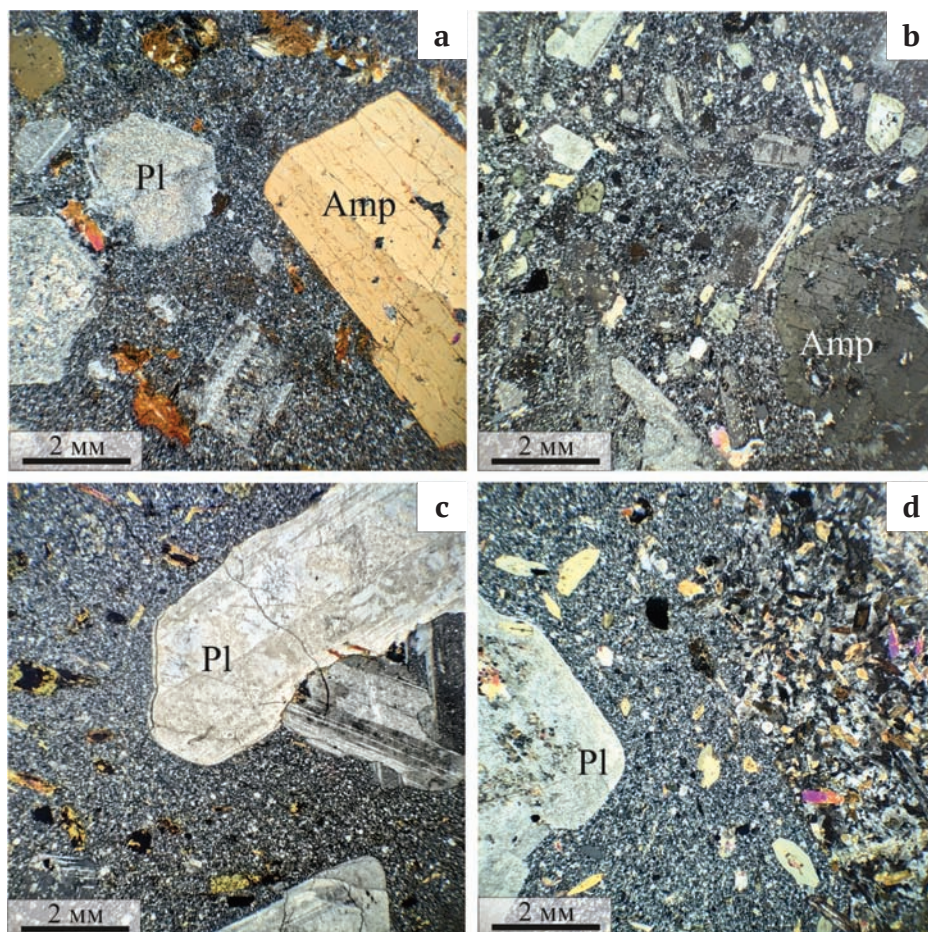
**Рис. 3.** Петрографические особенности образцов порфировых пород шариповской группы:

а — № 701, б — № 702, с — № 703, d — № 704 с ксенолитом в правой части снимка (образец № 704b). Изображения получены на поляризационном микроскопе с анализатором.

Примечание: Pl — плагиоклаз, Amp — амфибол

**Fig. 3.** Petrographic features of samples porphyries of the Sharip group: a — 701, b — 702, c — 703, d — 704 with xenolith (sample 704b). Images were obtained using a polarizing microscope with an analyzer.

Note: Pl — plagioclase, Amp — amphibole





зернистая основная масса сложена альбитом, КППШ и амфиболом размером от 0.01 до 0.15 мм. Рудные минералы представлены цирконом, титанитом, баритом и апатитом. В образце присутствует ксенолит с гипидиоморфнозернистой структурой (обр. 704b), в котором амфибол представлен зёрнами размером от  $0.1 \times 0.2$  до  $1.5 \times 0.5$  мм, обладающими большим идиоморфизмом по отношению к плагиоклазу. Плагиоклаз имеет размеры кристаллов от  $0.1 \times 0.15$  до  $0.35 \times 0.45$  мм. Акцессорные минералы представлены титанитом, апатитом и баритом. Ксенолит петрографически отвечает порфировидному монцодиориту.

### Минералогическая характеристика порфировых пород

В изученных породах амфибол является важнейшим темноцветным минералом. В порфировых породах первого типа по трещинам в амфиболе встречается актинолит, пренит развит в виде гнёзд размером до 70 микрон (рис. 4, а). В порфировой породе второго типа обнаружены как однородные, так и зональные фенокристы. Первые отвечают магнезиогастингситу, вторые сложены паргаситом с тонкой каймой из магнезиогастингсита (рис. 4, б). Внутри фенокристов присутствуют мелкие включения альбита, барита и апатита, хлорита (рис. 4, б, с). В образце № 704b, который является ксенолитом в порфировых породах четвёртого типа обнаружены зональные зёрна амфибола, ядра которых сложены феррипаргаситом, а краевые части — магнезиогастингситом. Иногда наблюдается рекуррентная химическая зональность (рис. 4, d). В целом содержание железа снижается от центра к периферии.

Состав изученного амфибола (90 % анализов) в основном демонстрирует  $(Na + K) > 0.5$  форм. ед., малая часть имеет  $(Na + K) < 0.5$  форм. ед. (рис. 5, а, б). Практически все пробы на рис. 5, а представлены амфиболом из порфировых пород первого типа, попадающего в область чермакита и в меньшей степени в область магнезиогорнблендита, один анализ — обр. № 704. Более распространённый амфибол попадает в области ферропаргасита, магнезиогастингсита, паргасита и эденита, один анализ — в поле саданагаита. Пробы из обр. 701 расположены в зоне паргасита. Порфировые породы второго типа занимают более обширную площадь и представлены паргаситом и магнезиогастингситом. Амфибол из порфировых пород четвёртого типа находится в областях магнезиогастингсита и эденита. Амфибол из ксенолита обр. № 704b представлен ферропаргаситом, магнезиогастингситом, эденитом и саданагаитом.

Величина магнезиальности в амфиболе ( $Mg/(Mg + Fe)$  ф. е.) широко варьируется, но в целом в порфировых породах первого и второго типа развит наиболее магнезиальный амфибол ( $Mg\# = 0.64–0.80$  и  $0.65–0.81$  соответственно), тогда как в порфировых породах четвёртого типа амфибол имеет  $Mg\# = 0.35–0.73$ , а в обр. 704b  $Mg\# = 0.48–0.65$ . Обратная ситуация с содержанием  $TiO_2$  — амфибол богаче титаном в двух последних образцах, чем в двух первых. На бинарных диаграммах для всех изученных образцов наблюдаются единые тренды изменения пород амфибола: увеличение количества Si (ф. е.) и уменьшение  $Al^{iv}$  при уменьшении Ti (рис. 6, а, с), а также увеличение содержания MgO и уменьшение  $Na_2O$  при снижении концентрации  $TiO_2$  (рис. 6, б, d).

**Рис. 4.** Фенокристы амфиболов из порфировых пород Шариповской группы: зональность, включения и взаимоотношения с другими минералами. Изображения в режиме BSE:

а — образец № 701, б, с — образец № 702, d — образец образец № 704b.

Примечание: Ab — альбит, Act — актинолит, Ap — апатит, Brt — барит, Chl — хлорит, Prg — паргасит, Fe-Prg — ферропаргасит, Kfs — калиевый полевой шпат, Mg-Hst — магнезиогастингсит, Prh — пренит, Tsr — чермакит.

**Fig. 4.** Amphibole phenocrysts from Sharip group porphyries: zoning, inclusions and relationships with other minerals. BSE images:

a — sample 701, b, c — sample 702, d — sample 704b.

Note: Ab — albite, Act — actinolite, Ap — apatite, Brt — barite, Chl — chlorite, Prg — pargasite, Fe-Prg — ferropargasite, Kfs — potassium feldspar, Mg-Hst — magnesiohastingsite, Prh — prehnite, Tsr — tschermakite.

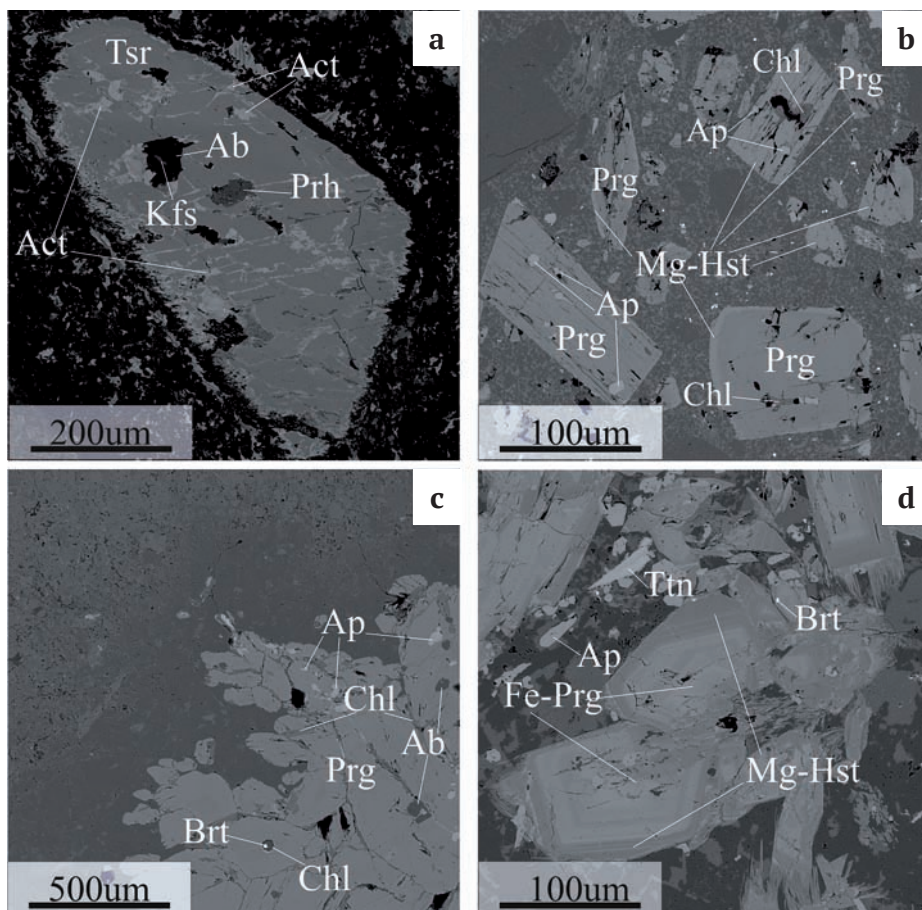




Таблица 1. Состав амфибола из порфировых пород шариповской группы

Table 1. Amphibole composition from Sharip group porphyries

№ п/п		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	MnO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Bcero Total
Обр. № 701 Sample 701	1	43.34	0.77	12.77	16.42	0.64	11.86	10.54	1.46	0.07	97.88
	2	43.7	0.79	12.28	17.22	0.62	11.77	9.3	1.41	0.07	97.17
	3	42.84	0.86	11.49	18.48	0.66	11.16	8.32	1.19	0.00	95.00
	4	44.12	0.77	12.72	17.38	0.60	11.84	9.42	1.44	0.00	98.28
	5	43.68	0.81	12.67	17.38	0.56	11.85	9.26	1.45	0.08	97.76
	6	41.62	0.78	16.26	10.98	0.00	14.43	12.41	1.94	0.29	98.71
	7	41.84	0.71	16.45	9.79	0.00	15.06	12.38	1.93	0.34	98.48
Обр. № 702 Sample 702	8	43.63	1.62	12.39	9.91	0.24	15.58	12.12	2.04	1.25	98.78
	9	42.24	1.27	10.68	16.16	0.54	12.04	11.36	2.04	1.22	97.55
	10	41.63	1.47	10.29	16.77	0.51	11.49	11.22	2.05	1.23	96.66
	11	44.6	1.30	11.37	9.98	0.23	15.75	12.04	1.93	1.08	98.28
	12	41.61	1.12	13.68	12.27	0.25	13.47	11.81	2.33	1.03	97.57
	13	41.87	1.42	10.85	15.95	0.46	11.96	11.38	2.11	1.29	97.29
	14	41.10	1.24	13.16	11.78	0.27	13.36	11.73	2.14	1.38	96.16
Обр. № 704 Sample 704	15	43.50	0.91	9.47	16.47	0.53	11.41	11.39	1.85	1.22	96.75
	16	42.31	1.30	12.19	12.28	0.50	12.73	11.19	2.32	1.29	96.11
	17	43.51	0.90	9.62	17.00	0.63	10.96	11.24	1.91	1.26	97.03
	18	37.36	2.94	14.17	21.81	0.59	6.14	11.00	2.36	1.77	98.14
	19	37.10	2.99	14.26	22.05	0.57	5.99	11.05	2.29	1.89	98.19
	20	38.90	2.78	13.46	19.30	0.51	8.39	11.30	2.4	1.57	98.61
	21	37.54	2.77	14.22	22.72	0.63	5.30	10.92	2.32	1.77	98.19
Обр. № 704b Sample 704b	22	37.98	2.38	13.90	19.32	0.54	7.94	11.16	2.34	1.57	97.13
	23	38.58	2.22	14.13	18.90	0.64	8.05	11.33	2.39	1.71	97.95
	24	40.35	1.62	13.79	14.32	0.42	11.07	11.67	2.41	1.70	97.35
	25	37.68	2.57	14.8	18.46	0.48	8.07	11.16	2.28	1.82	97.32
	26	39.46	2.16	14.63	15.54	0.32	9.94	11.42	2.44	1.76	97.67
	27	38.02	2.59	13.42	20.6	0.31	8.10	11.07	2.38	1.49	97.98
	28	37.34	2.30	14.77	19.55	0.57	7.47	11.30	2.07	1.74	97.11

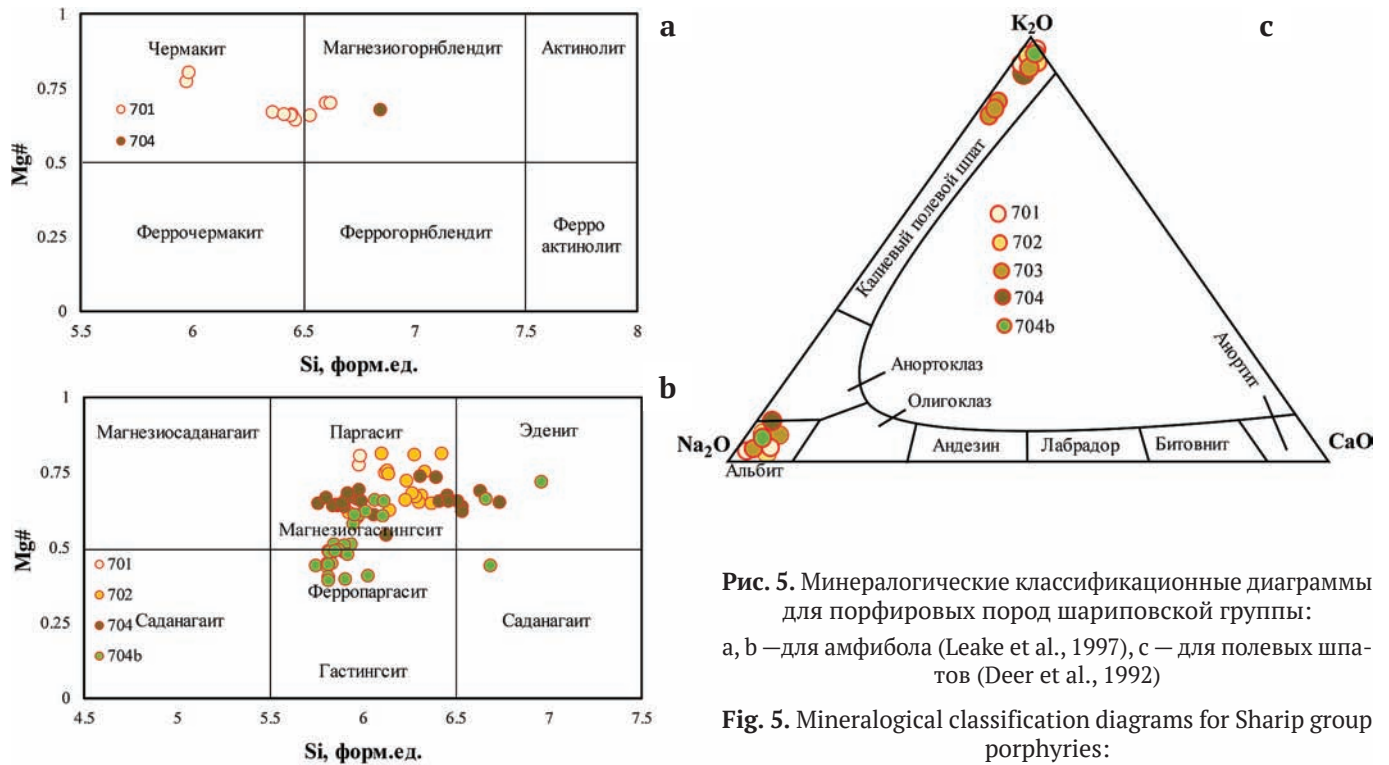
Таблица 2. Формульные коэффициенты амфибола из табл. 1

Table 2. Amphibole formula coefficients from table 1

№ п/п		T.Si	T.Al	T.Ti	C.Al	C.Ti	C.Fe <sup>3</sup>	C.Mn <sup>2</sup>	C.Mg	C.Fe <sup>2</sup>	B.Mn <sup>2</sup>	B.Fe <sup>2</sup>	B.Mg	B.Ca	B.Na	A.Ca	A.Na	A.K	W.OH	W.O <sup>2-</sup>
Обр. № 701 Sample 701	1	6.36	1.69	0.00	0.52	0.15	0.72	0.04	2.48	1.07	0.03	0.23	0.12	1.66	0.00	0.00	0.42	0.02	1.65	0.35
	2	6.45	1.61	0.00	0.53	0.16	0.80	0.03	2.42	1.02	0.03	0.30	0.17	1.48	0.00	0.00	0.40	0.02	1.58	0.42
	3	6.47	1.61	0.00	0.44	0.19	0.92	0.03	2.30	1.05	0.04	0.37	0.21	1.37	0.00	0.00	0.35	0.00	1.53	0.47
	4	6.44	1.61	0.00	0.58	0.15	0.78	0.03	2.41	1.02	0.03	0.32	0.17	1.48	0.00	0.00	0.41	0.00	1.55	0.45
	5	6.42	1.64	0.00	0.55	0.16	0.79	0.03	2.42	1.01	0.03	0.33	0.17	1.47	0.00	0.00	0.41	0.02	1.54	0.46
	6	5.98	2.07	0.00	0.68	0.13	0.40	0.00	3.06	0.71	0.00	0.20	0.03	1.92	0.00	0.00	0.54	0.05	1.71	0.29
	7	5.98	2.06	0.00	0.71	0.12	0.38	0.00	3.19	0.58	0.00	0.21	0.02	1.91	0.00	0.00	0.54	0.06	1.73	0.27
Обр. № 702 Sample 702	8	6.28	1.72	0.00	0.38	0.18	0.39	0.02	3.32	0.69	0.01	0.12	0.02	1.87	0.00	0.00	0.57	0.23	1.71	0.29
	9	6.31	1.71	0.00	0.18	0.17	0.70	0.05	2.63	1.24	0.02	0.08	0.05	1.82	0.03	0.00	0.56	0.24	1.74	0.26
	10	6.31	1.72	0.00	0.12	0.20	0.71	0.05	2.54	1.34	0.02	0.08	0.05	1.82	0.04	0.00	0.56	0.24	1.73	0.27
	11	6.42	1.58	0.00	0.35	0.15	0.41	0.02	3.37	0.69	0.01	0.10	0.01	1.87	0.01	0.00	0.53	0.20	1.78	0.22
	12	6.12	1.91	0.00	0.46	0.15	0.50	0.02	2.93	0.92	0.01	0.09	0.03	1.86	0.01	0.00	0.65	0.20	1.77	0.23
	13	6.28	1.74	0.00	0.18	0.18	0.66	0.04	2.63	1.26	0.01	0.08	0.05	1.83	0.04	0.00	0.57	0.25	1.73	0.27
	14	6.13	1.89	0.00	0.42	0.16	0.49	0.02	2.95	0.92	0.01	0.05	0.02	1.87	0.04	0.00	0.57	0.26	1.81	0.19
Обр. № 704 Sample 704	15	6.53	1.48	0.00	0.19	0.12	0.59	0.04	2.53	1.46	0.01	0.01	0.02	1.84	0.13	0.00	0.41	0.24	1.89	0.11
	16	6.31	1.71	0.00	0.43	0.16	0.50	0.04	2.82	1.02	0.01	0.02	0.01	1.79	0.17	0.00	0.50	0.25	1.84	0.16
	17	6.53	1.48	0.00	0.22	0.12	0.62	0.05	2.43	1.51	0.01	0.01	0.02	1.81	0.15	0.00	0.41	0.24	1.88	0.12
	18	5.86	2.15	0.00	0.47	0.35	0.67	0.06	1.44	2.02	0.01	0.17	0.00	1.83	0.06	0.02	0.66	0.35	1.43	0.57
	19	5.84	2.17	0.00	0.47	0.36	0.67	0.06	1.40	2.05	0.01	0.18	0.00	1.84	0.04	0.03	0.65	0.37	1.41	0.59
	20	5.96	2.04	0.00	0.39	0.33	0.62	0.05	1.90	1.73	0.01	0.13	0.01	1.84	0.03	0.01	0.68	0.31	1.46	0.54
	21	5.90	2.11	0.00	0.53	0.33	0.67	0.06	1.24	2.16	0.01	0.16	0.00	1.82	0.09	0.02	0.61	0.35	1.47	0.53
Обр. № 704b Sample 704b	22	5.91	2.11	0.00	0.44	0.30	0.65	0.05	1.84	1.73	0.01	0.13	0.00	1.84	0.05	0.02	0.66	0.31	1.55	0.45
	23	5.94	2.07	0.00	0.49	0.27	0.63	0.06	1.85	1.71	0.01	0.09	0.00	1.85	0.08	0.02	0.63	0.33	1.59	0.41
	24	6.07	1.94	0.00	0.51	0.19	0.49	0.04	2.48	1.29	0.01	0.02	0.00	1.87	0.11	0.01	0.59	0.32	1.76	0.24
	25	5.85	2.16	0.00	0.54	0.31	0.60	0.04	1.86	1.67	0.01	0.13	0.00	1.84	0.05	0.02	0.63	0.35	1.51	0.49
	26	5.98	2.03	0.00	0.59	0.25	0.47	0.03	2.24	1.44	0.00	0.07	0.00	1.84	0.10	0.01	0.61	0.34	1.63	0.37
	27	5.90	2.12	0.00	0.34	0.32	0.67	0.03	1.84	1.81	0.01	0.19	0.03	1.82	0.00	0.02	0.72	0.29	1.45	0.55
	28	5.83	2.19	0.00	0.53	0.29	0.65	0.05	1.74	1.76	0.01	0.14	0.00	1.87	0.02	0.03	0.61	0.34	1.54	0.46

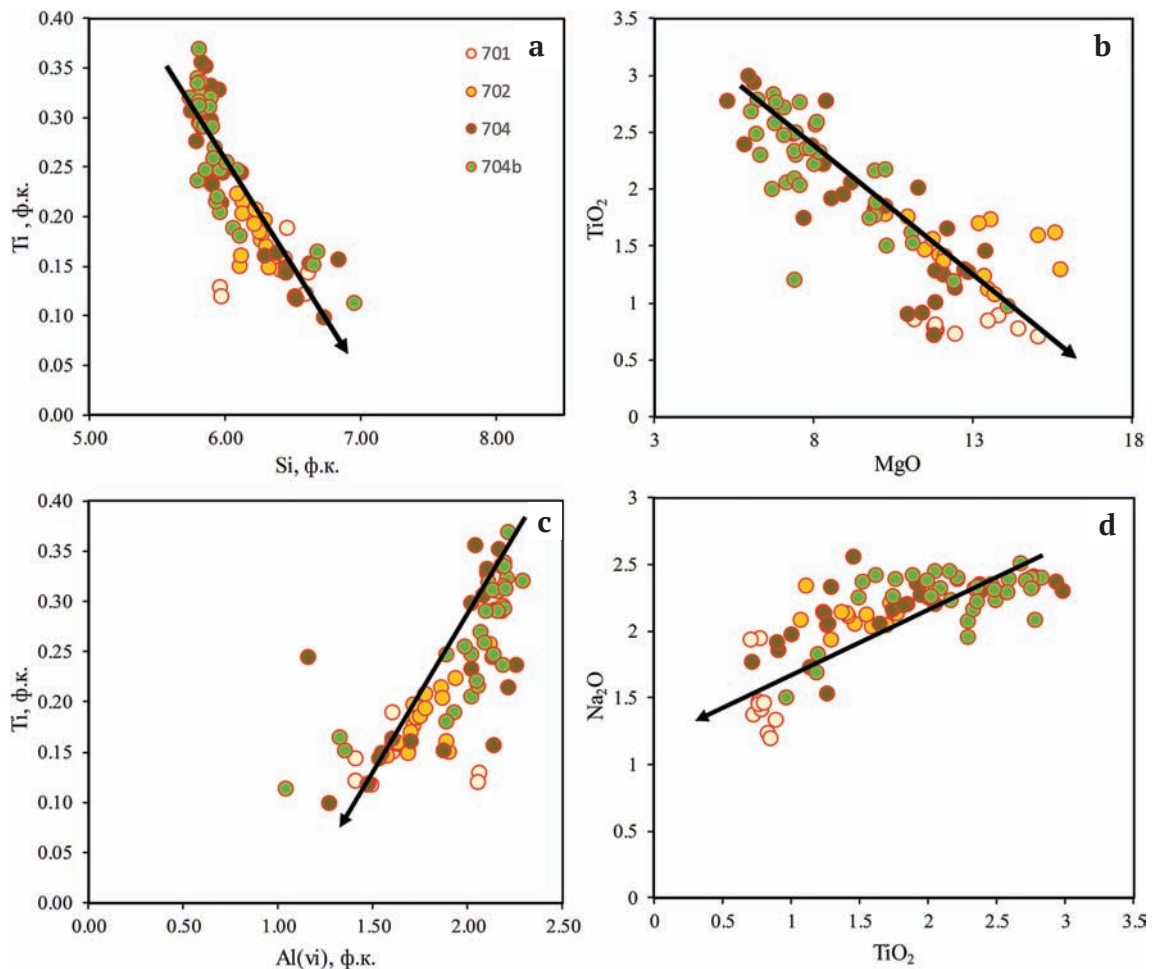
Примечание. Формульные коэффициенты амфибола были рассчитаны на 24 аниона.

Note: Formula coefficients for amphibole were calculated for 24 anions.



**Рис. 5.** Минералогические классификационные диаграммы для порфировых пород шариповской группы: а, б — для амфибола (Leake et al., 1997), с — для полевых шпатов (Deer et al., 1992)

**Fig. 5.** Mineralogical classification diagrams for Sharip group porphyries: а, б — for amphibole (Leake et al., 1997), с — for feldspars (Deer et al., 1992)



**Рис. 6.** Бинарные диаграммы для амфибола из порфировых пород шариповской группы

**Fig. 6.** Binary diagrams for amphiboles from the Sharip group porphyries

Для оценки температуры ( $T$ ) кристаллизации амфибола использовались мономинеральные геотермометры (Otten, 1984 и Liao, 2022) — для краткости O и L. Оба метода основаны на содержании Ti в минерале. Для чермакита и магнезиогорнблендита из порфировой породы первого типа получены значения 636–662 °C (O) и 638–678 °C (L). Паргасит из порфировых пород второго типа образовался при  $T$  654–754 °C (O), 715–801 °C (L), а магнезиогастингсит — при 685–744 °C (O), 743–819 °C (L). Магнезиогастингсит из порфировых пород четвёртого типа сформировался при  $T$  773–842 °C (O), 886–943 °C (L). Ферропаргасит и магнезиогастингсит из ксенолита (обр. 704b) образовались при  $T$  692–789 °C (O), 791–904 °C (L).

Полевые шпаты представлены альбитом и калиевым полевым шпатом (рис. 5, с), обладающими однородным строением, без включений ранних минералов. По всем признакам альбит является вторичным после раннего, более кальциевого плагиоклаза, поскольку развит совместно с серицитом, эпидотом, хлоритом и др. вторичными минералами. Калиевый полевой шпат имеет примесь BaO до 0.69 (мас. %).

Слюда представлена мусковитом, где содержание  $Fe_2O_3^t$  максимально в образце № 703 (до 4.08 мас. %), а в остальных образцах — до 1.62 (мас. %). Хлорит представлен брунсвигом и пикнохлоритом (Heu, 1954). Согласно термодинамическим вычислениям, брунсвигом образовался при температуре 253–284 °C, пикнохлорит — при 311–319 °C (Lanari et al., 2014). В брунсвигите содержание  $Fe_2O_3^t$  до 31.8 (мас. %).

### Петрогеохимия порфировых пород

Исследуемые породы на TAS-диаграмме попадают в поля трахита, трахиандезита и трахиандезибазальта (рис. 7, а). Содержания  $SiO_2$  варьируют от 54.76 до 65.66 мас. %, а суммы  $Na_2O + K_2O$  — от 7.24 до 10.82 мас. %. Отношение  $K_2O/Na_2O$  находится в диапазоне 0.26–0.61. На рис. 7, б фигуративные точки в основном попадают в область высококальциевых пород. По содержанию  $SiO_2$  и  $Fe_2O_3^t$  можно выделить две подгруппы: обр. 701 и 702 — с пониженным количеством кремнезёма (59.17–60.86 мас. %) и высоким количеством триоксида железа (4.21–5.37 мас. %) и обр. 703 и 704 — с обратным соотношением (62.47–65.66

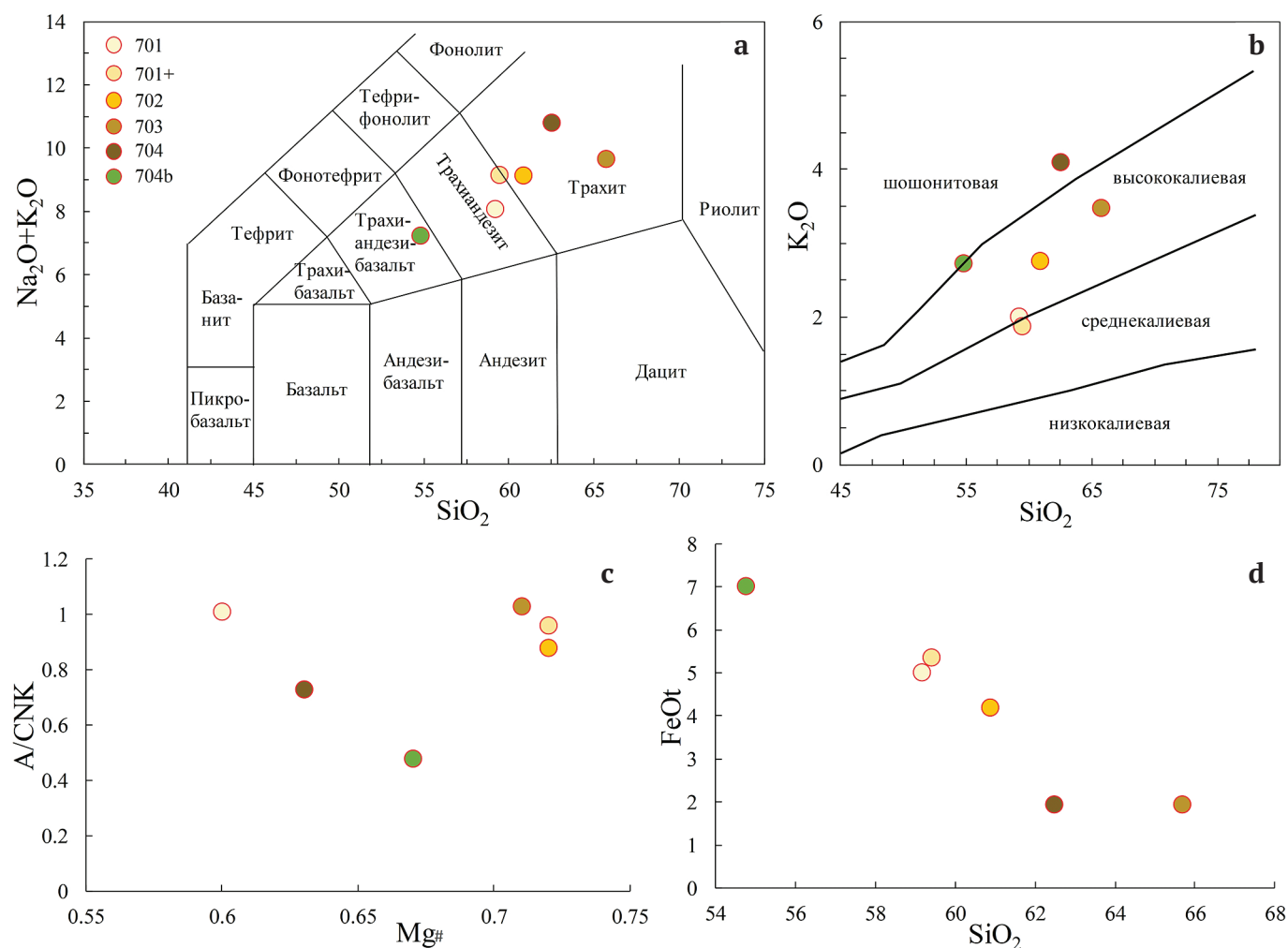


Рис. 7. Петрохимические диаграммы для порфировых пород шариповской группы:

а — бинарная TAS-диаграмма для вулканитов (Le Maitre, 2002), б — диаграмма  $SiO_2$ – $K_2O$  (Peccherillo, Taylor, 1976), с — вариационная диаграмма  $Mg\#$ – $A/CNK$ , d — вариационная диаграмма  $SiO_2$ – $Fe_2O_3^t$

Fig. 7. Petrochemical diagrams the Sharip group porphyries:

а — binary TAS-diagram for volcanic rocks after (Le Maitre, 2002), б —  $SiO_2$ – $K_2O$  plot after (Peccherillo, Taylor, 1976), с — variation plot  $Mg\#$ – $A/CNK$ , d — variation plot  $SiO_2$ – $Fe_2O_3^t$



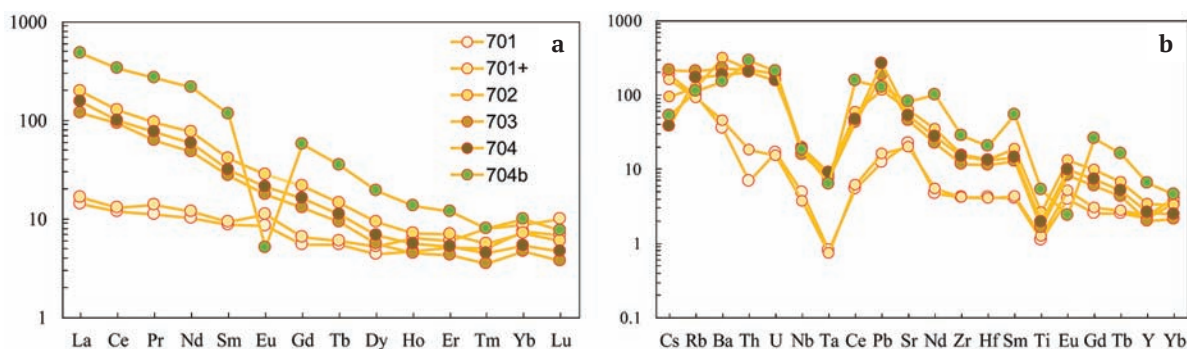
и 1.95 мас. % соответственно). Породы первой подгруппы обладают индексом глинозёмистости  $al'$  от 0.88 до 1.01, магнезиальный номер  $Mg\#$  находится в диапазоне 0.60–0.72; у пород второй подгруппы  $al'$  варьируется от 0.73 до 1.03,  $Mg\#$  находится в диапазоне 0.63–0.71. Сопоставляя между собой обр. 701 и 701+, можно

отметить незначительно повышенное содержание железа и натрия, а также пониженное значение магния и калия во втором образце, представляющем собой более метасоматически проработанную разность той же породы. Ксенолит из обр. № 704b отделяется от всех остальных пониженным содержанием кремнезёма

**Таблица 3.** Химический состав порфировых пород шариповской группы

**Table 3.** Chemical composition of Sharip group porphyries

Компонент Component	Породообразующие элементы (мас. %) / Rock-forming elements (wt. %)					
	701	701+	702	703	704	704b
SiO <sub>2</sub>	59.17	59.41	60.86	65.66	62.47	54.76
TiO <sub>2</sub>	0.24	0.26	0.48	0.35	0.33	0.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.41	19.05	16.82	17.51	16.81	12.91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>t</sup>	5.03	5.37	4.21	1.95	1.95	7.03
MnO	0.19	0.20	0.09	0.05	0.06	0.18
MgO	2.70	2.26	4.26	2.20	2.13	5.04
CaO	3.89	3.17	3.08	1.66	4.18	8.96
Na <sub>2</sub> O	6.09	7.28	6.38	6.19	6.72	4.50
K <sub>2</sub> O	2.02	1.88	2.76	3.48	4.10	2.74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.13	0.30	0.21	0.20	0.99
St	0.03	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.08
ППП / LOI	1.86	1.88	1.33	1.33	1.70	2.33
Сумма / Sum	100.76	100.89	100.59	100.60	100.65	100.20
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	8.11	9.16	9.14	9.67	10.82	7.24
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.33	0.26	0.43	0.56	0.61	0.61
Mg#	0.60	0.72	0.72	0.71	0.63	0.67
A/CNK	1.01	0.96	0.88	1.03	0.73	0.48
Микроэлементы (г/т) / Microelements (g/t)						
Li	21	29	10.9	15.6	6.3	9.4
Be	0.41	0.45	3.2	4.1	4	8.7
Sc	2	2.2	4.1	1.7	2.1	7.6
V	32	38	72	35	40	150
Cr	4	3	12.8	6.1	8.7	25
Co	6.8	7.2	11.9	5.4	6.3	21
Ni	7.1	5.1	12.7	5.5	7.2	10.5
Cu	5.8	20	12.3	5.6	11	16.2
Zn	29	37	67	52	48	68
Ga	4.8	5.7	17.6	15.2	13.8	11.3
Rb	44	42	58	95	78	52
Sr	358	310	988	722	840	1282
Y	7.4	8	11.4	6.7	8.8	22
Zr	35	35	131	100	125	235
Nb	2.2	1.7	8.7	7.3	9	8.4
Mo	0.008	0.007	0.006	0.004	0.010	0.009
Cs	3	2.6	1.5	3.4	0.6	0.84
Ba	184	228	1588	1149	954	757
La	3.3	3.9	46	28	36	113
Ce	7.3	8.1	78	58	62	207
Pr	1.03	1.3	9	5.8	7.1	25
Nd	4.7	5.4	35	22	27	100
Sm	1.3	1.4	6.1	4.1	4.7	17.5
Eu	0.48	0.63	1.6	1.01	1.21	0.29
Gd	1.1	1.3	4.3	2.6	3.2	11.3
Tb	0.2	0.22	0.53	0.34	0.41	1.3
Dy	1.09	1.3	2.3	1.4	1.7	4.8
Ho	0.26	0.36	0.4	0.25	0.31	0.75
Er	0.82	0.96	1.11	0.69	0.83	1.9
Tm	0.124	0.2	0.14	0.087	0.111	0.2
Yb	1.2	1.4	1.14	0.74	0.86	1.6
Lu	0.17	0.25	0.15	0.094	0.118	0.19
Hf	0.95	0.93	3.1	2.6	3	4.7
Ta	0.024	0.022	0.25	0.23	0.27	0.19
Tl	0.1	0.14	0.37	0.68	0.23	0.17
Pb	1.8	2.3	16.6	27	38	18.5
Th	0.43	1.13	13.8	13.5	12.7	17.9
U	0.29	0.26	3.3	3.4	2.7	3.6



**Рис. 8.** Спектры нормированного распределения микроэлементов в порфировых породах шариповской группы: а — спайдерграмма РЗЭ, нормированная по хондриту CI (Lubetskaya, Korenaga, 2007), б — мультиэлементная спайдерграмма, нормированная по примитивной мантии (Lubetskaya, Korenaga, 2007)

**Fig. 8.** Geochemical patterns of Sharip group porphyries: а — REE normalized to chondrite CI (Lubetskaya, Korenaga, 2007), б — multi-element normalized to the primitive mantle (Lubetskaya, Korenaga, 2007)

54.76 мас. % и высоким  $P_2O_5$  (0.99 мас. %), тогда как у других образцов содержание пентаоксида фосфора варьируется в пределах 0.12–0.30 мас. %. Также ксенолит (обр. № 704b) обладает самым низким  $al'$  — 0.48, магнезиальный номер  $Mg\#$  равен 0.67.

Образцы двух подгрупп и ксенолита довольно отчетливо различаются между собой по особенностям распределения редкоземельных элементов (РЗЭ). Так, графики нормированного распределения РЗЭ демонстрируют относительно плоские спектры для обр. 701 и 701+, но для остальных наблюдается явный отрицательный уклон (рис. 8, а). Соотношения для первой подгруппы (обр. 701 и 701+):  $(La/Yb)_n = 1.87–1.89$ ,  $(Gd/Yb)_n = 0.73–0.74$ . Соотношения для второй подгруппы (п):  $(La/Yb)_n = 25.76–28.50$ ,  $(Gd/Yb)_n = 2.81–3.01$ . Ксенолит (обр. № 704b) обладает более крутым уклоном:  $(La/Yb)_n = 48.08$ ,  $(Gd/Yb)_n = 5.65$ . Европиевая аномалия либо не выражена, либо слаболожительная ( $Eu/Eu^* = 0.91–1.39$ ), однако в образце ксенолита 704b выявлена резкая отрицательная аномалия Eu ( $Eu/Eu^* = 0.05$ ).

На мультиэлементной диаграмме (рис. 8, б) ярко выражены положительные аномалии LILE (крупноионных литофилов) — Cs, Rb, Ba, Th, U, Pb. Характерна отрицательная аномалия для HFSE (высокозарядных элементов), особенно для Nb, Ta, Ti. В ксенолите проявлена отчетливая отрицательная аномалия для Zr и Hf, хотя в целом эта порода наиболее богата микроэлементами.

### Обсуждение результатов и выводы

Таким образом, ареал развития монцонитов балбукского комплекса включает субвулканические аналоги порфирового строения. Основная масса их имеет микрогранитовый облик (рис. 3) и сложена амфиболом, калиевым полевым шпатом, эпидотом и альбитом. Фенокристаллы представлены кварцем, КППШ, плагиоклазом и амфиболом. Акцессорными минералами являются апатит, титанит, циркон и барит.

Порфировые породы в различной степени подвержены вторичным преобразованиям. Наиболее изменёнными являются породы первого типа, наименее — второго типа. Вторичные образования представлены в основном хлоритом, серицитом, эпидотом.

Порфировые породы первого типа имеют зеленоватую окраску, но с пятнами коричневого цвета (обр. 701+), вероятно обусловленную неравномерной метасоматической проработкой породы, поскольку каких-либо принципиальных различий в минералогии и геохимии не наблюдается (рис. 2, а; 3, а).

Полученные данные по порфировым породам шариповской группы отражают закономерные для единой породной ассоциации вариации минерального и химического состава. Порфировидный монцодиорит, обнаруженный в виде ксенолита в порфировой породе массива Шарип, по всем признакам является продуктом кристаллизации другого расплава. Об этом свидетельствуют его петрографический облик, а также обогащённость микроэлементами при наиболее низкой кремнезёмистости и высокой магнезиальности, и резкая отрицательная европиевая аномалия — (у порфировых пород она отсутствует). Вероятно, эта порода является производной от остаточного высокофракционированного базитового расплава, обогащённого несовместимыми элементами и обеднённого Eu после фракционирования плагиоклаза. Напротив, порфировые породы не несут признаков связи с фракционированием базитового расплава и, вероятно, являются продуктами кристаллизации магмы среднего (трахитового) состава.

Состав породы обычно определяется составом основной массы и реже вкрапленников. В нашем случае фенокристы определяют и петрографический, и петрохимический облик пород. В обр. 701 методом ЭДС в пластинке нами был определён усреднённый состав основной массы:  $SiO_2$  — 62,  $TiO_2$  — 0.17,  $Al_2O_3$  — 18.6,  $FeO$  — 2.8,  $MgO$  — 0.7,  $MnO$  — 0.14,  $Na_2O$  — 9.4, а  $K_2O$  — 0.46 мас. %. Это значительно отличает её от состава валовой пробы, что свидетельствует о том, что вкрапленники и матрица кристаллизовались из магмы близкого состава. Тем не менее наличие зональных кристаллов амфибола с тонкими каймами более железистого состава свидетельствует о неравновесных условиях между некоторыми фенокристами и расплавом. Так, в обр. 702 присутствуют фенокристы магнезиогастингсита и паргасита с каймой магнезиогастингсита, что предполагает более раннюю и более позднюю генерации амфибола, кристаллизовавшиеся на разных этапах остывания единого расплава. Исходя



из классических представлений об эволюции расплавов часть порфировых пород (обр. 701 и 701+) отвечает более раннему этапу с низким  $(La/Yb)_n$  и пониженными концентрациями несовместимых элементов, тогда как другая часть (обр. 702, 704, и особенно 703) — продукты более позднего этапа кристаллизации, имеющие высокие величины  $(La/Yb)_n$  и повышенные содержания микроэлементов. В пользу этого свидетельствует и состав вкрапленников амфибола с трендом уменьшения  $Mg\#$ . С другой стороны, этому противоречат оценки температур кристаллизации амфибола (см. раздел «Минералогическая характеристика порфировых пород»). Это можно объяснить метасоматическими изменениями, обусловившими вынос титана, на концентрациях которого основаны использованные нами геотермометры (Otten, 1984; Liao, 2021). Известно, что при гидротермальном метасоматозе первичная титанистая бурая роговая обманка переходит в зелёную роговую обманку с выносом титана, а далее — в актинолит, практически не содержащий титан (Рахимов, Вишневыский, 2023). Содержание  $Mg$  при этом не меняется. Таким образом, оценки температур кристаллизации амфибола из вкрапленников в обр. 704 можно считать наиболее достоверными (842–973 °C), тогда как в обр. 701 получены заниженные температуры (662–678 °C) вследствие метасоматоза.

Несмотря на влияние метасоматических процессов, амфибол является важнейшим минералом пород и немногим из удовлетворительно сохранившихся. Более того, ведущим процессом эволюции расплава было именно фракционирование амфибола, а не полевых шпатов (рис. 9, а, б). С этим согласуется, в частности, отсутствие  $Eu$ -аномалии на спайдерграмме (рис. 8, а) и высокое валовое содержание  $Sr$ . Первичный плагиоклаз, вероятно отвечавший олигоклазу или кислому андезину, не сохранился ни в одной пробе и полностью замещён ассоциацией вторичных силикатов — альбитом, серицитом, эпидотом, хлоритом. Появление вкрапленников кварца в обр. 703 свидетельствует о пересыщении расплава кремнезёмом уже на ранней стадии кристаллизации, т. е. этот порфировый образец — представитель наиболее поздней части породной ассоциации.

В настоящее время популярны представления о происхождении монцонитов из расплавов при частичном плавлении метасоматизированной литосферной мантии или ультрабазит-базитов нижней части коры (Conceicao, Green, 2004; Jung et al., 2020). Геохимические особенности шариповских порфировых пород демонстрируют адакитоподобные характеристики (рис. 10, а, б). Адакиты — специфичные вулканы среднего состава, часто ассоциирующие с щелочным над- или постсубдукционным магматизмом, их происхождение дискуссионно, однако признаётся их важная металлогеническая роль для порфировых систем (Richards, Kerrich, 2007; Karshi et al., 2019; Castillo, 2012). Примечательно, что монцодиорит из ксенолита (обр. 704b) не попадает в поле адакитов. Ранний дифференциат порфировой ассоциации (обр. 701, 701+) отличается пониженным  $La/Yb$ -отношением и в целом низкими концентрациями  $Sr$  (<360 г/т), что отличает его от типичных адакитов, хотя некоторые другие ключевые характеристики адакитам не противоречат (высокое  $Sr/Y$ -отношение, низкая концентрация  $Yb$ ). Положение фигуративных точек (рис. 10 а, б) подтверждает ведущую роль фракционирования амфибола в расплаве. Соотношения петрогенных компонентов показывают, что изученные адакитоподобные порфировые породы могут быть производными от расплава, источником которого является нижняя кора (рис. 10 с, d). Полученные ранее  $Rb-Sr$ -датировки ( $354.2 \pm 1.4$  млн лет) для монцонит-порфира МШГ предполагают син- или постколлизийную обстановку (Пучков, 2010). В ходе позднедевонско-раннекаменноугольной коллизии ММ и Лавруссии западный борт ММ надвинулся на окраину палеоконтинента по зоне ГУР (Пучков, 2000). Таким образом, источниками магматизма для порфировой ассоциации шариповской группы могли быть подстилающие ММ ультрабазит-базитовые массивы офиолитовой ассоциации ГУР, а также рифейские осадочно-метаморфогенные толщи континентальной окраины, обнажённые в настоящее время в Башкирском мегантиклинории Южного Урала (западнее ГУР).

Изложенные результаты позволяют сделать следующие главные выводы:

— исследуемые образования шариповской группы являются монцонит-порфирами единой ассоци-

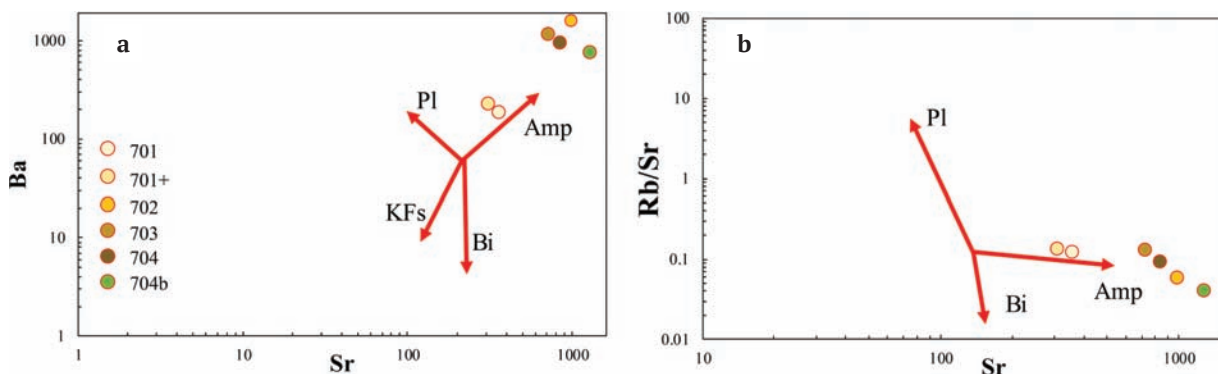
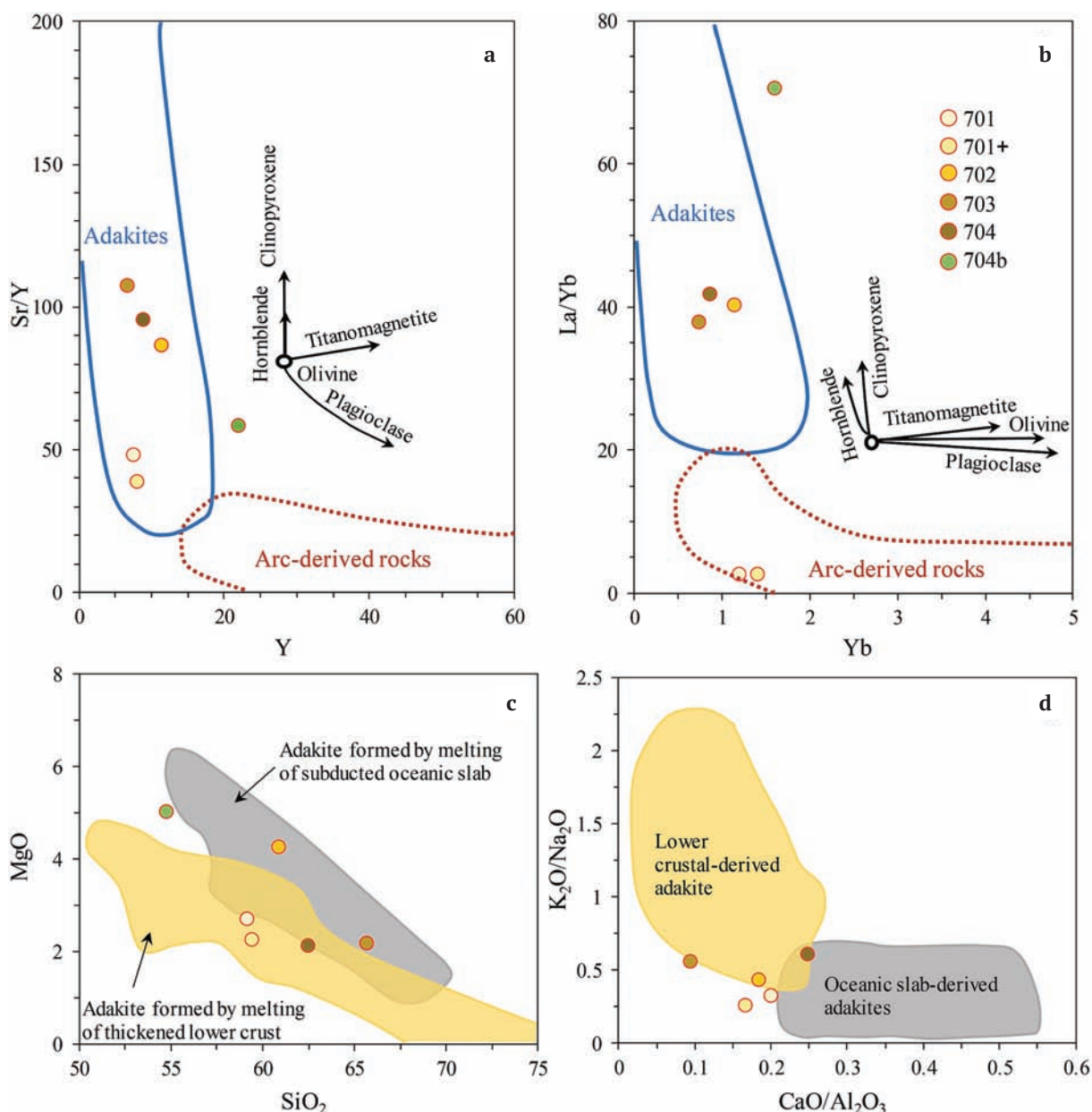


Рис. 9. Дискриминационные геохимические диаграммы для порфировых пород шариповской группы по (Solomovich, Trifonov, 2014):

а — Ba–Sr, б — Rb/Sr–Ba

Fig. 9. Geochemical discriminant diagrams for the Sharip group porphyries (Solomovich, Trifonov, 2014):

а — Ba–Sr, б — Rb/Sr–Ba



**Рис. 10.** Точки составов порфировых пород шариповской группы на дискриминационных диаграммах для адакитов по (Castillo, 2012) — а и b, по (Karshi et al., 2019) — с и d

**Fig. 10.** The composition points of the Sharip group porphyries at the discriminant diagrams for adakites after (Castillo, 2012) — a and b after (Karshi et al., 2019) — c and d

ции и отвечают по химическому составу высококалийным трахиандезитам и трахитам;

— минералого-геохимические характеристики монзонит-порфиров, несмотря на интенсивные метасоматические изменения, отражают процессы фракционной кристаллизации, связанные с фракционированием амфибола в трахитовом расплаве;

— кристаллизация фенокритов амфибола (паргасита, магнезиогастингсита) происходила в диапазоне температур 842–973 °C;

— геохимические характеристики монзонит-порфиров демонстрируют близость к адакитам (высокие отношения Sr/Y и La/Yb), а их источником могла быть нижняя кора, представленная ультрабазит-базитами офиолитов Главного Уральского разлома и осадочно-метаморфическими комплексами рифейского возраста.

Авторы выражают благодарность Д. Н. Салихову за ценные консультации по геологии Балбукского ареала.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ № 2022-77-10049.

### Литература / References

- Анисимов И. С., Сопко Л. Н., Ямаев Ф. А., Калташева И. И., Козлов В. И., Петров Ю. М. Отчёт по геологическому доизучению масштаба 1:50000 Северо-Учалинской площади (планшеты: N-40-48-B-6, в, г; N-40-59-B-6, г; N-40-60-A; N-40-72-A) за 1978–1983 годы, 1983.
- Anisimov I. S., Sopko L. N., Yamaev F. A., Kaltasheva I. I., Kozlov V. I., Petrov Yu. M. Report on geological additional study on a scale of 1:50000 of the North-Uchalinskaya area (plates: N-40-48 V-b, c, d; N-40- 59



- B-b, d; N-40-60 A; N-40-72 A) for 1978—1983, 1983. (in Russian)
- Жданов А. В., Ободов В. А., Макарьев Л. Б., Матюшков А. Д., Молчанова Е. В., Стромов В. А., Полянская Т. Л., Калташев А. П. Геологическое доизучение масштаба 1:200000 и подготовка к изданию госгеолкарты-200 территории листа N-40-XXVIII (Учалинская площадь) / Отчёт по темам № 608 и № 140 в 2 кн. СПб., 2003. Кн. 1. 284 с.
- Zhdanov A. V., Obodov V. A., Makariev L. B., Matyushkov A. D., Molchanova E. V., Stromov V. A., Polyanskaya T. L., Kaltashev A. P. Geological additional study on a scale of 1:200000 and preparation for publication of the state geological map-200 of the territory, sheet N-40-XXVIII (Uchalinskaya area). Report on topics No. 608 and No. 140 in 2 books. St. Petersburg, Book 1, 2003, 284 p. (in Russian)
- Знаменский С. Е. Роль сдвиговых дуплексов в региональном структурном контроле позднепалеозойского золотого оруденения Магнитогорской мегазоны (Южный Урал) // Литосфера. 2009. № 4. С. 83—92.
- Znamensky S. E. The role of strike-slip duplexes in the regional structural control of the late Paleozoic gold mineralization of the Magnitogorsk megazone (Southern Urals). Lithosphere, 2009, No. 4, pp. 83—92. (in Russian)
- Пучков В. Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПресс, 2010. 280 с.
- Puchkov V. N. Geology of the Urals and the Cis-Urals (current issues of stratigraphy, tectonics, geodynamics and metallogeny). Ufa: DesignPress, 2010, 280 p. (in Russian)
- Пучков В. Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: Гилем, 2000. 146 с.
- Puchkov V. N. Paleogeodynamics of the Southern and Middle Urals. Ufa: Gilem, 2000, 146 p. (in Russian)
- Рахимов И. Р., Вишневецкий А. В. Роговая обманка в ультрамафит-мафитах худолазовского комплекса Южного Урала: условия кристаллизации и петрологические следствия // Литосфера. 2023. № 5. С. 766—784. DOI: 10.24930/1681-9004-2023-23-5-766-784
- Rakhimov I. R., Vishnevsky A. V. Hornblende in ultramafic-mafites of the Khulozovsky complex of the Southern Urals: crystallization conditions and petrological consequences. Lithosphere, 2023, No. 5, pp. 766—784. (in Russian)
- Рахимов И. Р., Самигуллин А. А., Холоднов В. В., Шагалов Е. С. Этапы проявления монзонитового и гранитового магматизма Балбукского ареала (Южный урал) по данным Rb-Sr-геохронологии // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий. 2024. № 15. С. 184—187.
- Rakhimov I. R., Samigullin A. A., Kholodnov V. V., Shagalov E. S. Stages of manifestation of monzonite and granite magmatism of the Balbuk area (Southern Urals) according to Rb-Sr geochronology. Geology, mineral resources and problems of geoecology of Bashkortostan, the Urals and adjacent territories, 2024, No. 15, pp. 184—187. (in Russian)
- Рязанцев А. В., Новиков И. А., Разумовский А. А. Каменноугольный окраинно-континентальный мафит-ультрамафитовый комплекс параллельных даек Западно-Магнитогорской зоны (Южный Урал) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2019. № 3. С. 42—50. DOI: 10.32454/0016-7762-2019-3-42-50
- Ryazantsev A. V., Novikov I. A., Razumovsky A. A. Carboniferous continental marginal mafic-ultramafic complex of parallel dikes of the West Magnitogorsk zone (Southern Urals). Bulletin of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration, 2019, No. 3, pp. 42—50. (in Russian)
- Салихов Д. Н., Холоднов В. В., Пучков В. Н., Рахимов И. Р. Магнитогорская зона Южного Урала в позднем палеозое: магматизм, флюидный режим, металлогения, геодинамика. М.: Наука, 2019. 392 с.
- Salikhov D. N., Kholodnov V. V., Puchkov V. N., Rakhimov I. R. Magnitogorsk zone of the Southern Urals in the Late Paleozoic: magmatism, fluid regime, metallogeny, geodynamics. Moscow: Nauka, 2019, 392 p. (in Russian)
- Салихов Д. Н. Магматизм и оруденение позднего палеозоя Магнитогорского мегасинклинория. Уфа: БФАН СССР, 1985. 96 с.
- Salikhov D. N. Magmatism and mineralization of the late Paleozoic Magnitogorsk megasyntinorium. Ufa: BB USSR AS, 1985, 96 p. (in Russian)
- Салихов Д. Н., Бердников П. Г. Магматизм и оруденение позднего палеозоя Магнитогорского мегасинклинория. Уфа, 1985. 94 с.
- Salikhov D. N., Berdnikov P. G. Magmatism and ore mineralization of The Late Paleozoic of Magnitogorsk megasyntinorium. Ufa, 1985, 94 p. (in Russian)
- Салихов Д. Н., Митрофанов В. А. Интрузивный магматизм верхнего девона — нижнего карбона Магнитогорского мегасинклинория (Южный Урал). Уфа: УНЦ РАН, 1994. 142 с.
- Salikhov D. N., Mitrofanov V. A. Intrusive magmatism of the Upper Devonian — Lower Carboniferous of the Magnitogorsk megasyntinorium (Southern Urals). Ufa: USC RAS, 1994, 142 p. (in Russian)
- Самигуллин А. А., Рахимов И. Р. Минералого-геохимические особенности гранитных массивов Аушкуль, Каматал и Шартым (балбукский комплекс, Южный Урал) // Геологический вестник. 2023. № 3. С. 74—86. DOI: 10.31084/2619-0087/2023-3-7
- Samigullin A. A., Rakhimov I. R. Mineralogical and geochemical features of the Aushkul, Kamatal and Shartym granite massifs (Balbuk complex, Southern Urals). Geological Bulletin. 2023, No. 3, pp. 74—86. DOI: 10.31084/2619-0087/2023-3-7. (in Russian)
- Ферштатер Г. Б. Палеозойский интрузивный магматизм Среднего и Южного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2013. 368 с.
- Fershtater G. B. Paleozoic intrusive magmatism of the Middle and Southern Urals. Yekaterinburg: UB RAS, 2013, 368 p. (in Russian)
- Castillo P. R. Adakite Petrogenesis // Lithos. 2012. V. 134. P. 304—316. DOI: 10.1016/j.lithos.2011.09.013.
- Conceicao R. V., Green D. H. Derivation of potassic (shoshonitic) magmas by decompression melting of phlogopite + pargasite Iherzolite // Journal of Geology. 2004. V. 72. P. 209—229.
- Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 2nd Edition, Prentice Hall, Harlow. 1992.
- Hey M. H. A new review of the chlorites // Min. Mag, 1954. V. 30. P. 277—292.
- Jung S., Romer R. L., Pfänder J. A., Berndt J. Petrogenesis of early syn-tectonic monzonite-granodiorite complexes —

- Crustal reprocessing versus crustal growth // Precambrian Research. 2020. V. 351. P. 105967. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105957.
- Karsli O., Dokuz A., Kandemir R., Aydin F., Schmitt A. K., Ersoy E. Y., Alyildiz C. Adakite-Like Parental Melt Generation by Partial Fusion of Juvenile Lower Crust, Sakarya Zone, Ne Turkey: A Far-Field Response to Break-Off of the Southern Neotethyan Oceanic Lithosphere // Lithos. 2019. V. 338–339. P. 58–72. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.03.029
- Lanari P., Wagner T., Vidal O. A thermodynamic model for ditriocahedral chlorite from experimental and natural data in the system  $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ : applications to P–T sections and geothermometry // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2014. V. 167. P. 268–287.
- Le Maitre R. W. Igneous Rocks. A Classification and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks, 2nd ed. 2002. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press // Geological Magazine. 2003. V. 140(3), P. 367–367. doi:10.1017/S0016756803388028
- Leake B. E., Wooley A. R., Arps C. E. S. et al. Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names // Mineral. Mag. 1997. V. 61. P. 295–321.
- Liao Y., Wei C., Rehman H. U. Titanium in calcium amphibole: Behavior and thermometry // Amer. Miner. 2021. V. 106(2). P. 180–191.
- Lyubetskaya T., Korenaga J. Chemical composition of earth's primitive mantle and its variance // Journal of geophysical research. 2007. V. 112. P. 1–21. DOI: 10.1029/2005JB004224
- Otten M. T. The origin of brown hornblende in the Artfjallet gabbro and dolerites // Contrib. Mineral. Petrol. 1984. V. 86. P. 189–199.
- Peccerillo A., Taylor S. R. Geochemistry of Eocene Calc-Alkaline Volcanic Rocks from the Kastamonu Area, Northern Turkey // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1976. V. 58. P. 63–81.
- Richards J. P., Kerrich R. Special Paper: Adakite-Like Rocks: Their Diverse Origins and Questionable Role in Metallogenesis // Economic Geology. 2007. V. 102 (4). P. 537–576. DOI: 10.2113/gsecongeo.102.4.537
- Solomovich L. I., Trifonov B. A. Rapakivi granites within Phanerozoic collisional orogens as a possible consequence of continental subduction and following exhumation of the Precambrian crust: Evidences from the Permian Jangart rapakivi in South Tien Shan collisional belt, Eastern Kyrgyzstan // Journal of Asian Earth Sciences. 2014. V. 96. P. 332–343. DOI: 10.1016/j.jseas.2014.09.028.

Поступила в редакцию / Received 29.11.2024



## Геохимическая зональность вторичных ореолов рассеяния флангов Нежданинского золоторудного месторождения, Якутия

Ю. М. Панасенко<sup>1</sup>, Д. Н. Чужинов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт благородных  
и цветных металлов (ЦНИГРИ), Москва, Россия, [panasenko@tsnigri.ru](mailto:panasenko@tsnigri.ru)

<sup>2</sup> Южно-Верхоянская горнодобывающая компания (ЮВГК), Якутск, Россия, [ChuzhinovDN@polymetal.ru](mailto:ChuzhinovDN@polymetal.ru)

Рассмотрено распределение основных химических элементов рудной ассоциации, выделенных по результатам корреляционного и факторного анализа, и их взаимное расположение на крупном Нежданинском золоторудном месторождении. Построены карты факторных нагрузок для групп этих элементов: As-Cd-Au; Ag-Pb-Sb; Ni-Co-Cu-Be-Zn; Ba-Ce. Проанализированы коэффициенты зональности верхнерудных и нижнерудных элементов, а также поведение Cd и Zn в пределах рудного поля Нежданинского месторождения. Сделаны предположения о возможном источнике аномалий кадмия в пределах золоторудных зон – разделении Zn и Cd под воздействием гипергенных процессов или привносе последнего в зону рудоотложения гидротермальными растворами наряду со свинцом и золотом.

**Ключевые слова:** Нежданинское месторождение, геохимическая зональность, золото, кадмий

## Geochemical zoning of secondary dispersion halos on the flanks of the Nezhdaninskoye gold ore deposit, Yakutia

Y. M. Panasenko<sup>1</sup>, D. N. Chuzhinov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals, Moscow, Russia

<sup>2</sup> South-Verkhoyansk Mining Company ("SVMC"), Yakutsk, Russia

The distribution of the main chemical elements of the ore association identified by the results of correlation and factor analysis and their mutual arrangement was considered at the Nezhdaninskoye large gold ore deposit. Maps of factor loads for the groups of such elements are constructed: As-Cd-Au; Ag-Pb-Sb; Ni-Co-Cu-Be-Zn; Ba-Ce. Zoning coefficients of the upper- and lower-ore elements as well as the relationship between Cd and Zn within the ore field of the Nezhdaninskoye deposit were studied. Assumptions about a possible source of cadmium anomalies within the gold ore zones were made: decomposition of sphalerite under the influence of hypogene processes or introduction into the ore deposition zone by hydrothermal solutions along with lead and gold.

**Keywords:** Nezhdaninskoye deposit, geochemical zoning, gold, cadmium

### Введение

Нежданинское месторождение является четвертым по величине месторождением золота в России; оно расположено в Томпонском районе на северо-востоке Республики Саха (Якутия), примерно в 480 километрах к востоку от Якутска. История его освоения началась в 1951 г. и продолжается по настоящее время, пройдя путь от подземной отработки до открытой добычи (Бортников и др., 1998; Гамянин и др., 2001). В настоящее время месторождение принадлежит компании «Полиметалл», оценка рудных запасов (JORC) Нежданинского месторождения по состоянию на 1 января 2023 г. составляет 40.6 млн т руды, 4 596 тыс. унций (142.9 т) золота, 26 млн унций (808.7 т) серебра (Нежданинское, 2025).

В соответствии с общей стратиграфической схемой Нежданинского рудного поля геологический разрез представлен (снизу вверх) отложениями халыинской, бонсалчанской свит нижней перми, нижнепермскими и верхнепермскими отложениями ырчачской и менкеченской свит (рис. 1). Оруденение Нежданинского месторождения в основном локализуется на пе-

ресечении рудоконтролирующих тектонических зон с отложениями бонсалчанской свиты.

В рудном поле выявлены различные типы минерализации: золоторедкометалльная, золотокварцевая и сереброполиметаллическая (Гамянин и др., 2001; Гамянин, 2001).

Золотокварцевый и сереброполиметаллический типы в основном слагают более 50 рудных тел, развитых на месторождении. По морфологическим признакам рудные тела делятся на три типа:

1) минерализованные зоны трещиноватости, состоящие из кварц-сульфидных прожилков, сульфидной вкрапленности в метасоматически измененных породах и кварц-сульфидных жил;

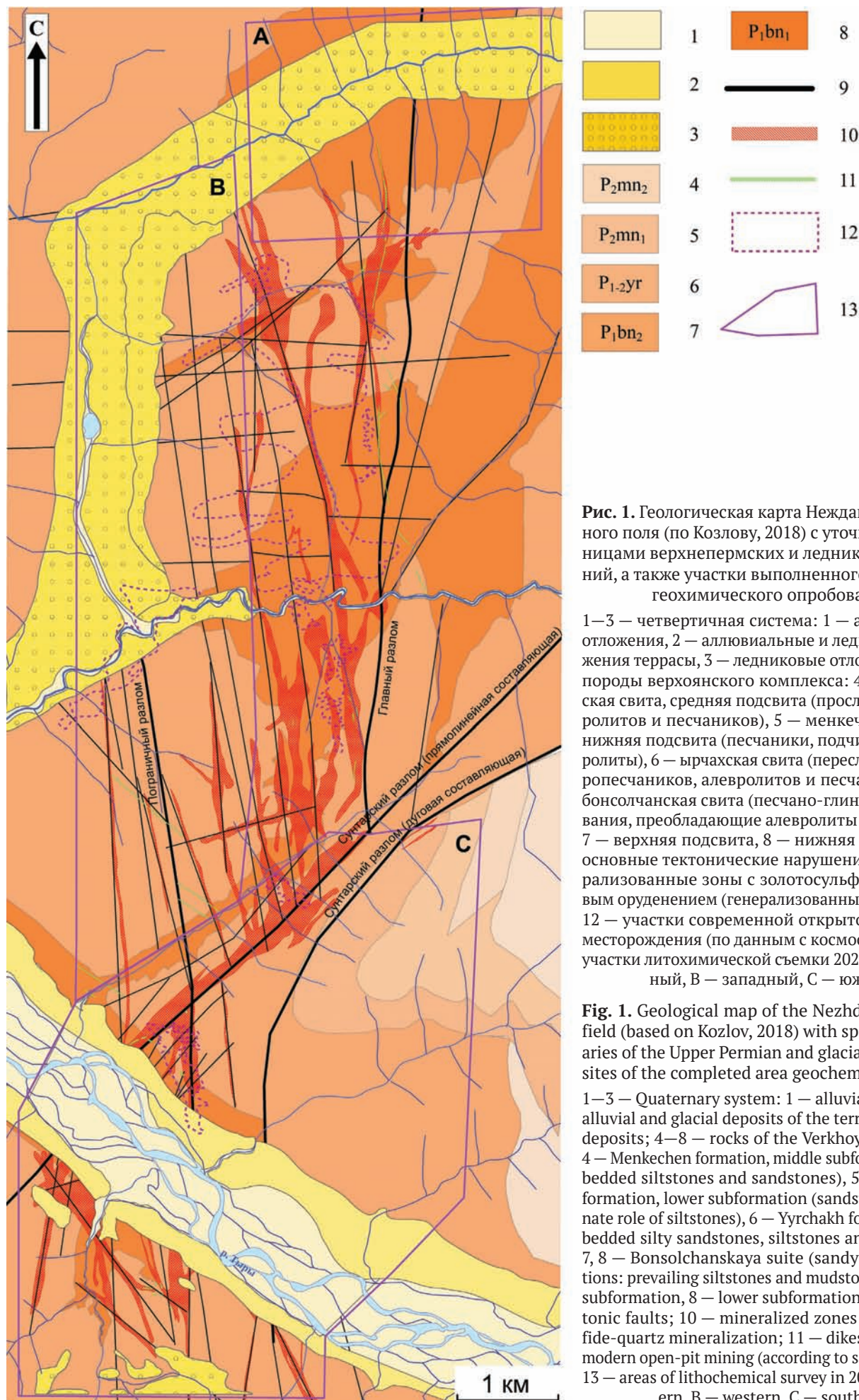
2) согласные жилы и дискордантные плитообразные и линзовидные жилы;

3) вытянутые штокверкообразные прожилковые зоны.

Образование рудных тел происходило в 2 этапа – золоторудный и сереброполиметаллический – и шло в таком порядке: шеелит-пирит-арсенопирит-анкерит-кварцевая, золото-халькопирит-галенит-сфале-

**Для цитирования:** Панасенко Ю. М., Чужинов Д. Н. Геохимическая зональность вторичных ореолов рассеяния флангов Нежданинского золоторудного месторождения, Якутия // Вестник геонаук. 2025. 2(362). С. 17–26. DOI: 10.19110/geov.2025.2.2

**For citation:** Panasenko Y. M., Chuzhinov D. N. Geochemical zoning of secondary dispersion halos on the flanks of the Nezhdaninskoye gold ore deposit, Yakutia. Typochemistry of sulfides of the Ozernoe Au-Pd occurrence (Polar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 2(362). pp. 17–26, DOI: 10.19110/geov.2025.2.2



**Рис. 1.** Геологическая карта Нежданинского рудного поля (по Козлову, 2018) с уточненными границами верхнепермских и ледниковых отложений, а также участки выполненного площадного геохимического опробования:

1–3 — четвертичная система: 1 — аллювиальные отложения, 2 — аллювиальные и ледниковые отложения террасы, 3 — ледниковые отложения; 4–8 — породы верхоянского комплекса: 4 — менкеченская свита, средняя подсвита (прослаивание алевролитов и песчаников), 5 — менкеченская свита, нижняя подсвита (песчаники, подчинённые алевролиты), 6 — ырчакская свита (переслаивания алевропесчаников, алевролитов и песчаников), 7, 8 — бонсолчанская свита (песчано-глинистые образования, преобладающие алевролиты и аргиллиты): 7 — верхняя подсвита, 8 — нижняя подсвита; 9 — основные тектонические нарушения; 10 — минерализованные зоны с золотосульфидно-кварцевым оруденением (генерализованные); 11 — дайки; 12 — участки современной открытой разработки месторождения (по данным с космоснимков), 13 — участки литохимической съёмки 2020 г. (А — северный, В — западный, С — южный)

**Fig. 1.** Geological map of the Nezhdaninskoye ore field (based on Kozlov, 2018) with specified boundaries of the Upper Permian and glacial deposits, and sites of the completed area geochemical sampling:

1–3 — Quaternary system: 1 — alluvial deposits, 2 — alluvial and glacial deposits of the terrace, 3 — glacial deposits; 4–8 — rocks of the Verkhoyansk complex: 4 — Menkechen formation, middle subformation (interbedded siltstones and sandstones), 5 — Menkechen formation, lower subformation (sandstones, subordinate role of siltstones), 6 — Yyrchakh formation (interbedded silty sandstones, siltstones and sandstones), 7, 8 — Bonsolchanskaya suite (sandy-clayey formations: prevailing siltstones and mudstones): 7 — upper subformation, 8 — lower subformation; 9 — main tectonic faults; 10 — mineralized zones with gold-sulfide-quartz mineralization; 11 — dikes; 12 — areas of modern open-pit mining (according to satellite images), 13 — areas of lithochemical survey in 2020 (A — northern, B — western, C — southern)



ритовая, золото-сульфосольно-доломитовая, халько-стибит-антимонитовая (золоторудный этап) и шеелит-пирит-арсенопирит-кварцевая, золотополиметаллически-сульфосольно-карбонатная, гидрослюдисто-дикитовая (сереброполиметаллический этап) ассоциации (Бортников и др., 2007).

В 2019–2020 гг. в пределах Нежданнинского рудного поля были проведены геолого-геохимические площадные поисковые работы по сети  $200 \times 40$  и  $100 \times 20$  м, результаты анализов которых были использованы в этой работе. Целью данного исследования было выявление геохимических особенностей вторичных ореолов рассеяния в пределах Нежданнинского рудного поля и их связи с золоторудной минерализацией для дальнейшего использования в поисковых и разведочных работах в пределах рудного поля и на аналогичных объектах.

### Методика

Для изучения геохимического поля Нежданнинского рудного поля использовались данные литохимического опробования по вторичным ореолам 4 781 проб, отобранных в 2020 г. по сети  $200 \times 40$  м и  $100 \times 20$  м. Работы проводились на флангах месторождения, в пределах участков, оконтуренных на рис. 1. Все пробы анализировались в ГП «Республиканский аналитический центр» атомно-эмиссионным методом с ионизацией в индуктивно связанной аргоновой плазме (ICP-AES) (ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98) на 33 элемента и атомно-абсорбци-

онным методом с электротермической атомизацией на золото (ААС-ЭТА) (НСАМ № 429-Х).

Метод ICP-AES (ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98) на 33 элемента предполагает перевод элементов из твердых объектов в раствор анализируемой пробы смесью сильных кислот (азотная, соляная, плавиковая, хлорная) и окислителей. Измерения производились на эмиссионном спектрометре SPECTRO ARCOS (Германия). Масса анализируемой навески 0.25 г.

Анализ ААС-ЭТА на золото (НСАМ № 429-Х) основан на измерении величины атомного поглощения резонансного излучения нейтральными атомами золота, образующимися в графитовой печи после предварительной пробоподготовки анализируемой пробы. В ходе анализа золото отделяли от мешающих элементов экстракцией растворов органических сульфидов в толуоле. В процессе обжига частично удалялись сера сульфидов и органическое вещество, что способствовало более полному переходу золота в раствор при дальнейшем вскрытии навески кислотами: плавиковой, азотной и смесью соляной и азотной кислот (царская водка). Измерения производили на атомно-абсорбционном спектрометре «МГА-1000». Анализируемая масса навески 10 г. Диапазон определения содержания золота 0.002–1.0 г/т.

Результаты анализов обрабатывались в программах Excel, Statistica и ArcGis. Определение фоновых и минимально аномальных содержаний элементов проводилось по пробам восточной части южного участка работ, где практически отсутствуют геохимические аномалии (таблица 1).

**Таблица 1.** Расчет фоновых содержаний элементов  
**Table 1.** Calculation of background contents of elements

Element Элемент	Unit of measurement Ед. измерения	Number of samples Кол-во проб	C <sub>фон</sub>	C <sub>min</sub>	C <sub>max</sub>	ε	C <sub>min-anomal</sub> 3ε
Au	г/т	608	<0.002	<0.002	0.016	3.16	0.005
Ag	г/т	626	<1	<1	1.44	1.04	0.54
Al	%	626	7	2	11	1.22	5
As	г/т	542	25.8	2.5	74.4	1.75	67.7
Ba	%	626	0.07	0.02	0.16	1.34	0.12
Be	г/т	626	2.2	0.6	4.3	1.40	3.9
Ca	%	626	0.27	0.05	14.88	2.35	1.18
Cd	г/т	504	<0.5	<0.5	0.5	1.09	0.29
Ce	г/т	626	74	22	160	1.31	118
Co	г/т	626	15	3	79	1.59	34
Cr	г/т	626	44	17	87	1.31	69
Cu	г/т	626	16	5	62	1.46	30
Fe	%	626	3.2	0.8	7.4	1.37	5.6
K	%	626	2.1	0.4	3.6	1.34	3.5
La	г/т	626	37	10	84	1.33	61
Li	г/т	626	28	7	330	1.53	58
Mg	%	626	0.43	0.11	2.02	1.42	0.78
Mn	%	626	0.07	0.01	0.68	2.29	0.27
Mo	г/т	626	1.1	1.0	4.9	1.28	1.6
Na	г/т	626	1.58	0.23	3.94	1.42	2.89
Ni	г/т	626	23	4	149	1.82	65
P	%	626	0.06	0.02	0.16	1.47	0.11
Pb	г/т	603	22	6	44	1.42	40
S	%	496	0.04	0.01	0.07	1.38	0.06
Sb	г/т	626	<5	<5	13.3	1.16	3.3
Sc	г/т	626	10	5	19	1.24	15
Sn	г/т	626	2.7	1.0	19.8	1.35	4.5
Sr	%	603	0.015	0.006	0.039	1.37	0.025
Ti	%	626	0.36	0.10	0.63	1.26	0.53
V	г/т	626	86	23	245	1.30	136
W	г/т	625	<5	<5	8.4	1.07	2.8
Y	г/т	626	16	4	33	1.33	27
Zn	г/т	626	81	18	189	1.51	167

Для корректного проведения статистического анализа содержания в пробах были стандартизированы. В первую очередь для определения однородных групп был выполнен кластерный анализ литохимических проб, в ходе которого было выделено 3 кластера. Первый кластер характеризуется пониженными содержаниями большинства элементов, относительно высокими P, S, Ca. При этом наблюдаются минимальные содержания Al, K, Ba, Be, Sc, Ti, V. В основном пробы из этой группы расположены на северных склонах, в зоне развития многолетнемерзлых пород. Повышенное содержание в пробах элементов органической специализации (при пониженном содержании типоморфных породных элементов) было интерпретировано как непредставительное (без достаточного количества каменного материала) и исключено из анализа. По оставшимся данным была проведена иерархическая классификация и построена дендрограмма связей рудогенных элементов в программе Statistica (рис. 2, а), создана матрица корреляций (рис. 2, б) и проведен факторный анализ. Дендрограмма была построена по 17 элементам, в качестве правила объединения использовался метод Варда, а для метрики расстояния — расстояние Пирсона.

ции (при пониженном содержании типоморфных породных элементов) было интерпретировано как непредставительное (без достаточного количества каменного материала) и исключено из анализа. По оставшимся данным была проведена иерархическая классификация и построена дендрограмма связей рудогенных элементов в программе Statistica (рис. 2, а), создана матрица корреляций (рис. 2, б) и проведен факторный анализ. Дендрограмма была построена по 17 элементам, в качестве правила объединения использовался метод Варда, а для метрики расстояния — расстояние Пирсона.

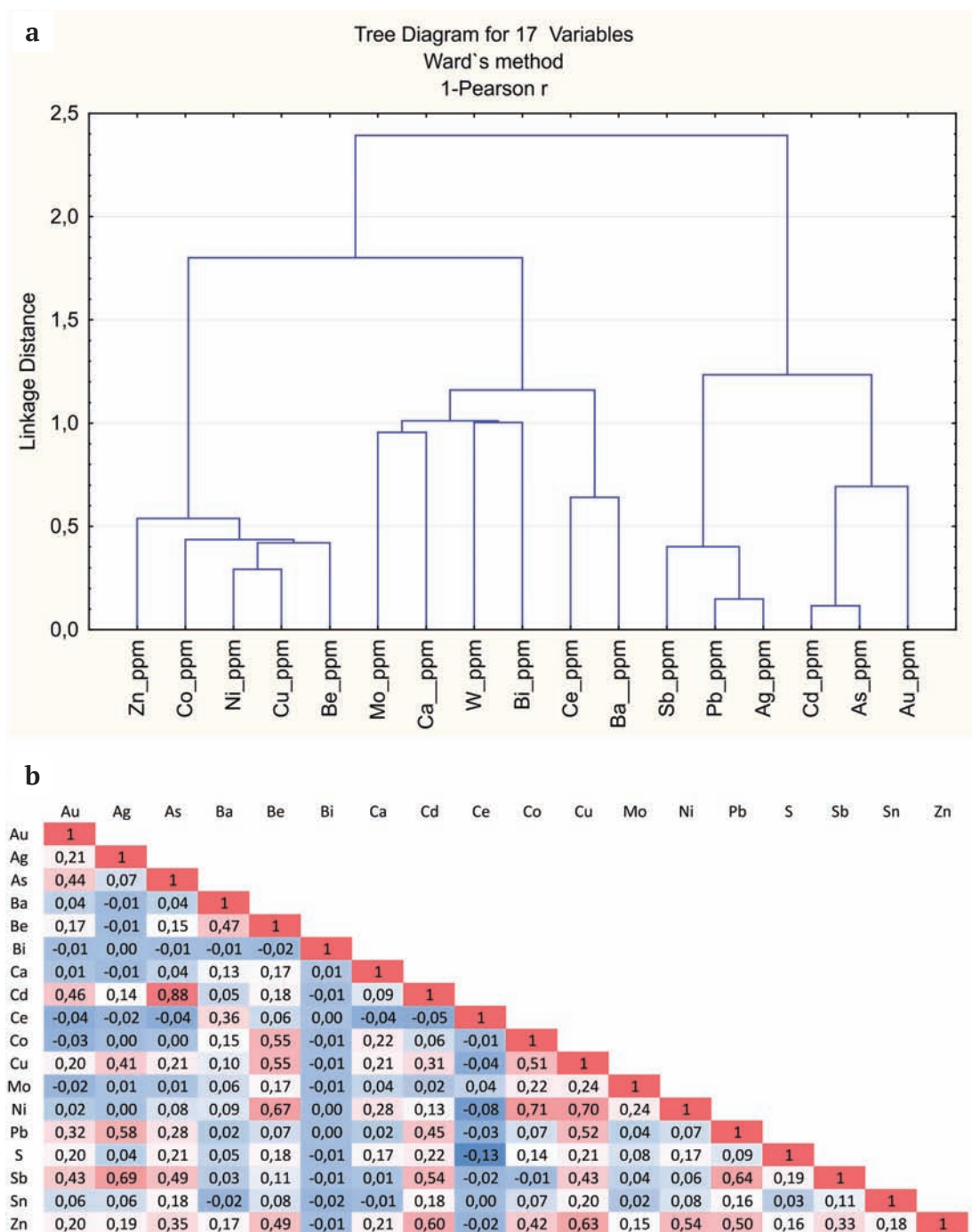


Рис. 2. Рудогенные элементы литохимического опробования:

а — дендрограмма, б — матрица корреляции

Fig. 2. Ore-forming elements of lithochemical sampling:

а — dendrogram, б — correlation matrix



При проведении факторного анализа гипотеза о количестве значимых факторов базировалась на результатах иерархической классификации и графике «каменной осыпи». Метод вращения, использованный при анализе, — varimax raw.

Для выявления вертикальной зональности, отраженной во вторичных ореолах рассеяния, было изучено отношение логарифмов содержаний верхнерудных элементов (Ag, Sb, Pb) к нижнерудным (Ni, Co, Cu) и построена карта распределения  $\text{Log}(\text{Ag} \times \text{Sb} \times \text{Pb} / \text{Co} \times \text{Ni} \times \text{Cu})$ .

### Результаты

По результатам иерархической классификации были выделены 4 основные ассоциации химических элементов: 1) Au-As-Cd; 2) Sb-Pb-Ag; 3) Zn-Co-Ni-Cu-Be; 4) Mo-W-Ca-Ce-Ba-Bi. Наиболее интересными элементами во вторичных ореолах рассеяния оказались As и Cd (помимо золота). Коэффициенты корреляции с золотом этих элементов составляют 0.44 и 0.46 соответственно. Также отмечена сильная корреляция кадмия и мышьяка (0.88). Корреляция Sb (0.43) с золотом может быть объяснена золотополиметаллическо-сульфосольно-карбонатной ассоциацией сереброполиметаллического этапа рудообразования в пределах рудного поля.

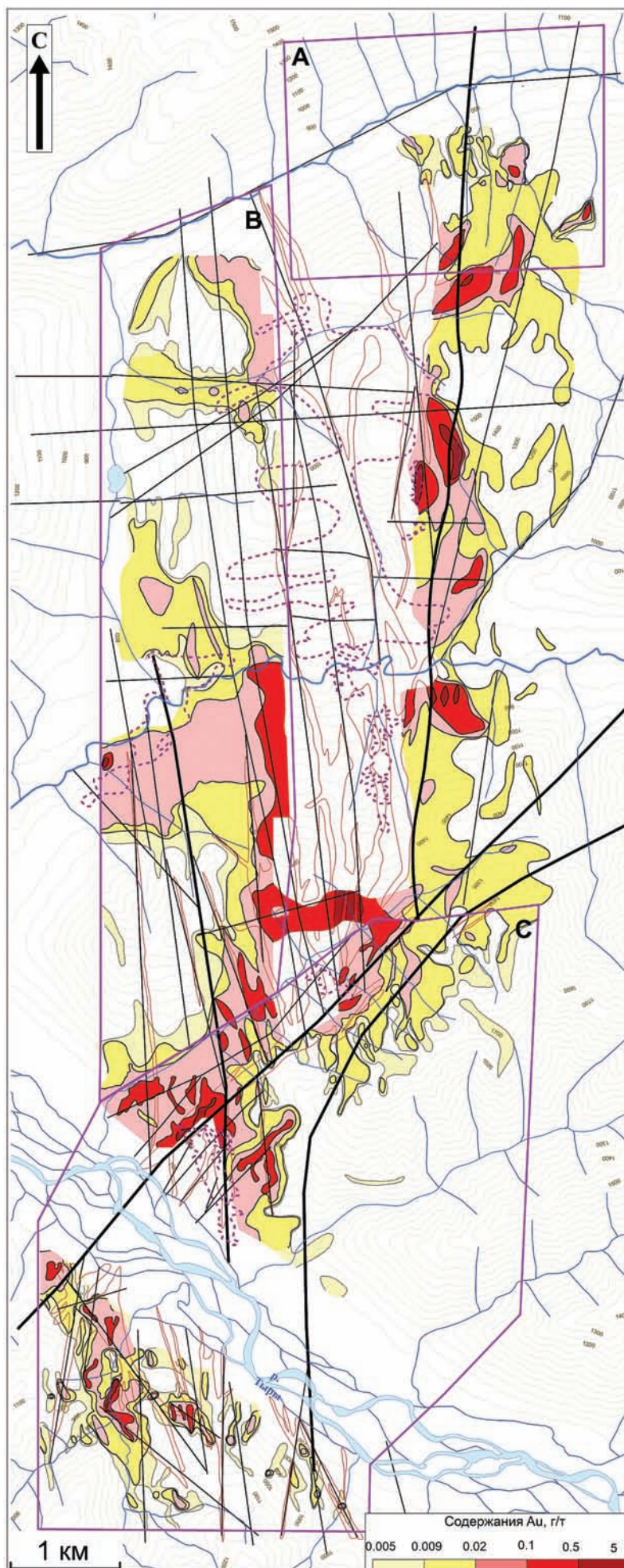
Факторный анализ рудных элементов по методу главных компонент в программе Statistica подтвердил, что наиболее контрастно выделяются 4 геохимические ассоциации:

- $\text{Ni}_{0.91}\text{Co}_{0.81}\text{Be}_{0.75}\text{Cu}_{0.74}\text{Zn}_{0.6}$ ;
- $\text{As}_{0.9}\text{Cd}_{0.89}\text{Au}_{0.61}$ ;
- $\text{Ag}_{0.95}\text{Pb}_{0.91}\text{Sb}_{0.68}$ ;
- $\text{Ba}_{0.82}\text{Ce}_{0.78}$ .

Для визуализации распределения вторичных ореолов рассеяния элементов в пределах Неждановского рудного поля в качестве примера представлена моноэлементная карта для Au (рис. 3). По указанным выше геохимическим ассоциациям были построены карты факторных нагрузок в программном модуле ArcGis Geostatistical Analyst, а также карты коэффициентов зональности  $\text{AgSbPb}/\text{CoNiCu}$  и  $\text{Cd}/\text{Zn}$ . Использованный метод интерполяции данных — обратновзвешенные расстояния.

**Рис. 3.** Карта вторичных ореолов рассеяния Au. Здесь и далее условные обозначения см. на рис. 1

**Fig. 3.** Map of Au secondary dispersion halos. Here and below see symbols in Fig. 1



### Аномалии Au

Аномалии Au выделены по изолиниям содержания 0.005–0.009–0.02–0.1–0.5 г/т при фоновом значении < 0.002 г/т. Через всю площадь Нежданинского рудного поля с севера на юг практически непрерывно протягивается аномалия Au по изолинии 0.005 г/т. Выделенная в ее пределах аномалия Au по изолинии 0.02 г/т незначительно уступает первой по площади и прерывается только за счет неопробованной части. В вышеуказанных аномалиях находятся локальные участки с содержанием 0.1 г/т, как правило, вытянутой с севера на юг формы. Аномалии по изолинии 0.5 г/т представлены в виде редких мелких зон субмеридионального простирания. Содержание Au от 1 до 4.35 г/т встречается в единичных пробах.

В целом для аномалий Au характерно субмеридиональное простирание, отвечающее генеральной ориентировке структур Нежданинского рудного поля. Изменение направлений простирания аномалий вдоль бортов рек Тыры и Мал. Кидерики приурочено к террасам этих рек и, возможно, отражает «зараженность» аллювия продуктами разрушения рудных тел. На севере Нежданинского рудного поля, в долине р. Курум, с ледниковыми отложениями интенсивность аномалий Au снижается. На юге Нежданинского рудного поля, после долины р. Тыры, площадь аномалии Au резко уменьшается до полного выклинивания в долине р. Гельды.

### Ассоциация $As_{0.9}Cd_{0.89}Au_{0.61}$

Ассоциация As–Cd–Au (рис. 4) является основной рудной геохимической ассоциацией, выделенной по результатам факторного анализа. Занимая значительно меньшие площади по сравнению с аномалиями золота, область влияния факторной нагрузки данной ассоциации соответствует наиболее контрастным аномалиям Au. Максимальная проявленность фактора представлена на южном участке и приурочена к пересечению Сунтарского и Пограничного разломов, а также к устью долины р. Гельды, правому притоку р. Тыры. По мере продвижения на север интенсивность проявленности ассоциации снижается до практически полного исчезновения на северном участке.

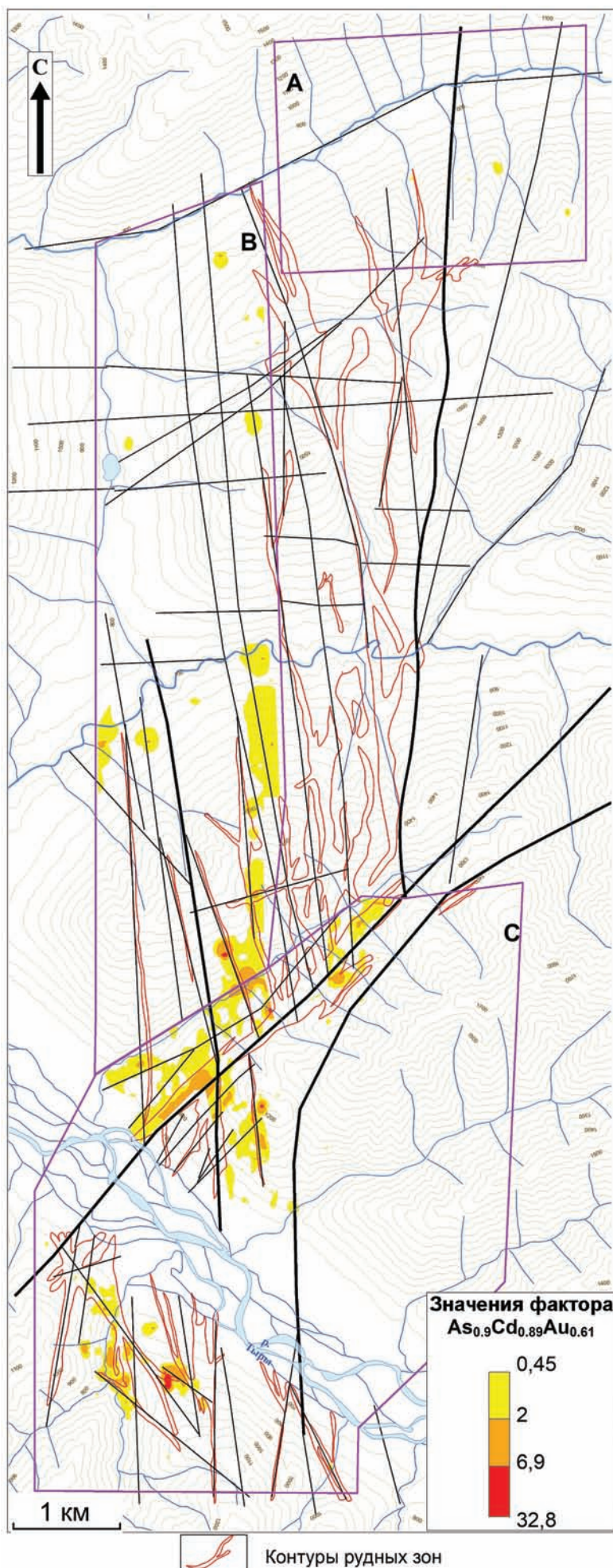


Рис. 4. Карта распространения фактора  $As_{0.9}Cd_{0.89}Au_{0.61}$

Fig. 4. Map of  $As_{0.9}Cd_{0.89}Au_{0.61}$  factor distribution



### Ассоциация $\text{Ag}_{0.95}\text{Pb}_{0.91}\text{Sb}_{0.68}$

Ассоциация  $\text{Ag}-\text{Pb}-\text{Sb}$  отражает серебро-полиметаллический этап рудоотложения (рис. 5). Наибольшая проявленность фактора сосредоточена на южном участке, на пересечении Сунтарского и Пограничного разломов, а также на правом борту р. Тыры. Как и в случае с золотой ассоциацией, к северу проявленность данного фактора практически полностью исчезает.

### Ассоциация $\text{Ni}_{0.91}\text{Co}_{0.81}\text{Be}_{0.75}\text{Cu}_{0.74}\text{Zn}_{0.64}$

Ассоциация  $\text{Ni}-\text{Co}-\text{Cu}-\text{Be}-\text{Zn}$  наиболее ярко проявлена в южной части рудного поля. Контрастные аномалии фактора, как правило, приурочены к врезам водотоков и находятся на периферии рудных (золотоносных и сереброполиметаллических) ассоциаций. Стоит отметить, что восточнее дуговой составляющей Сунтарского разлома факторные нагрузки рассредоточиваются по достаточно большой площади на мелкие аномалии по нижней градации. Как и во всех выше описанных факторах, к северу проявленность фактора уменьшается.

### Ассоциация $\text{Ba}_{0.82}\text{Ce}_{0.78}$

Ассоциация  $\text{Ba}-\text{Ce}$  локализуется на южном участке, восточнее дуговой составляющей Сунтарского разлома. На остальных участках данный фактор не проявлен.

### Соотношение $\text{Cd}/\text{Zn}$

Высокая корреляция золота и кадмия (при слабой связи последнего с цинком) заставила обратить внимание на взаимоотношение этих, как правило, парных элементов. Кадмий обнаружен в 46 % от всех проб, локализация которых связана с аномалиями золота. При этом непосредственно в пределах рудных зон и контрастных аномалий золота наблюдаются максимумы  $\text{Cd}$  при снижении  $\text{Zn}$  до фоновых значений. При удалении от эпицентров аномалий золота роль цинка возрастает, и его преобладание вытесняет кадмий ниже предела обнаружения. Наиболее масштабные аномалии отношения кадмия к цинку расположены на западном участке и примыкают к наиболее продуктивной части месторождения (вырезанная центральная часть).

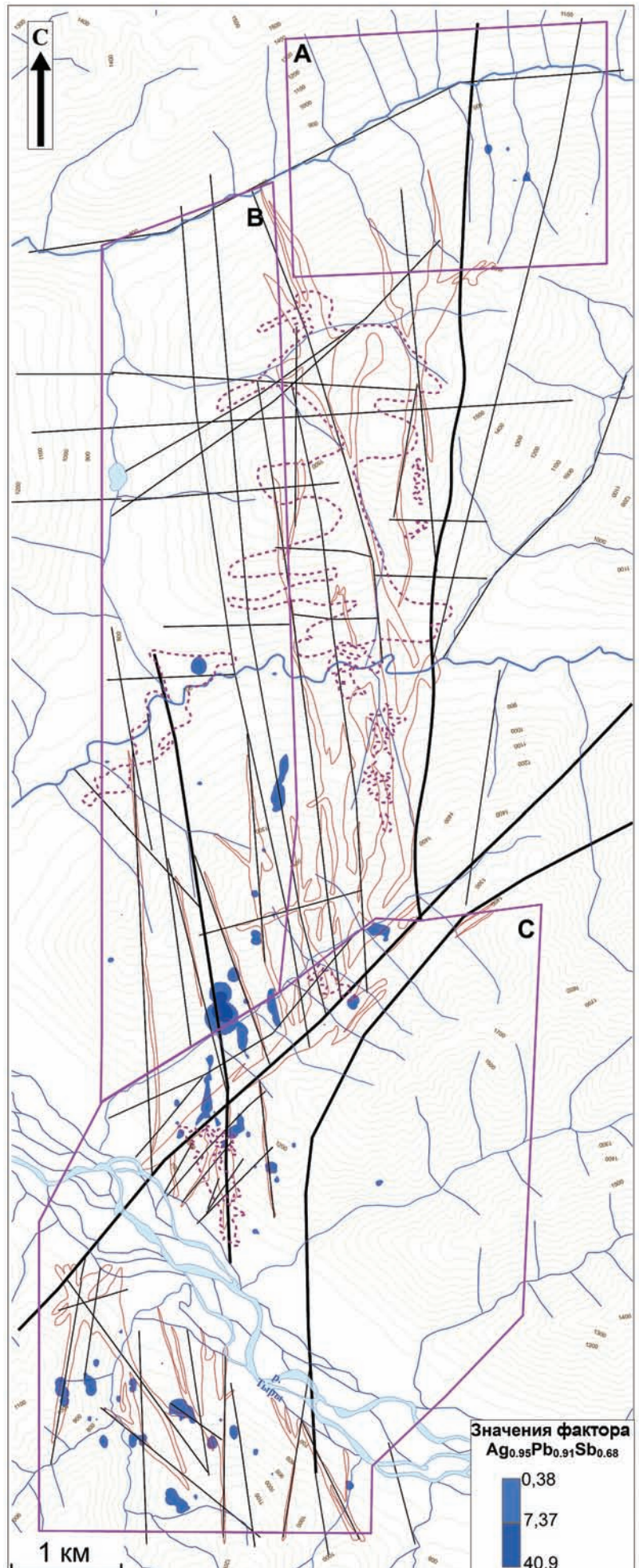


Рис. 5. Карта распространения фактора  $\text{Ag}_{0.95}\text{Pb}_{0.91}\text{Sb}_{0.68}$

Fig. 5. Map of  $\text{Ag}_{0.95}\text{Pb}_{0.91}\text{Sb}_{0.68}$  factor distribution

На южном участке повышенные содержания кадмия выявлены на пересечении меридиальных разломов с Сунтарским. На правом берегу р. Тыры выделена группа мелких аномалий с широкими ореолами по градации 0.008—0.012. При этом в целом данная территория имеет полиметаллическую специализацию. Максимальное значение отношений  $Cd/Zn = 0.114$ .

### Отношение $AgSbPb/CoNiCu$

Мультипликативный показатель  $AgSbPb/CoNiCu$  (рис. 6) отражает распределение в пределах рудного поля верхнерудных (числитель) и подрудных (знаменатель) элементов и использовался для определения эрозионного среза на месторождении (Гамянин и др., 2001). В геохимическом поле на территории севернее р. Тыры преобладает верхнерудная ассоциация, при этом максимальные значения приурочены к зонам пересечения разломов. Южнее р. Тыры преобладает нижнерудная ассоциация элементов, но во врезе р. Гельды резко возрастают содержания полиметаллического профиля. Стоит отметить, что южный и северный участки относительно р. Тыры отличаются гипсометрически, и возможно, южная часть более эродирована, что позволяет оценить размах оруденения. Однако нельзя исключать возможность того, что южный блок приподнят или имеет отличный от северной части рудный профиль.

### Обсуждение

Наложение выделенных факторов (рис. 7) отражает геохимическую зональность рудных зон флангов месторождения. Так, общей закономерностью является пересечение и близкое расположение  $As-Cd-Au$ - и  $Ag-Pb-Sb$ -ассоциаций. На периферии распространения данных групп располагается  $Ni-Co$ -ассоциация. Данная зональность, по всей видимости, отражает многофазную историю рудообразования, а также миграцию элементов в ходе гидротермальной проработки.

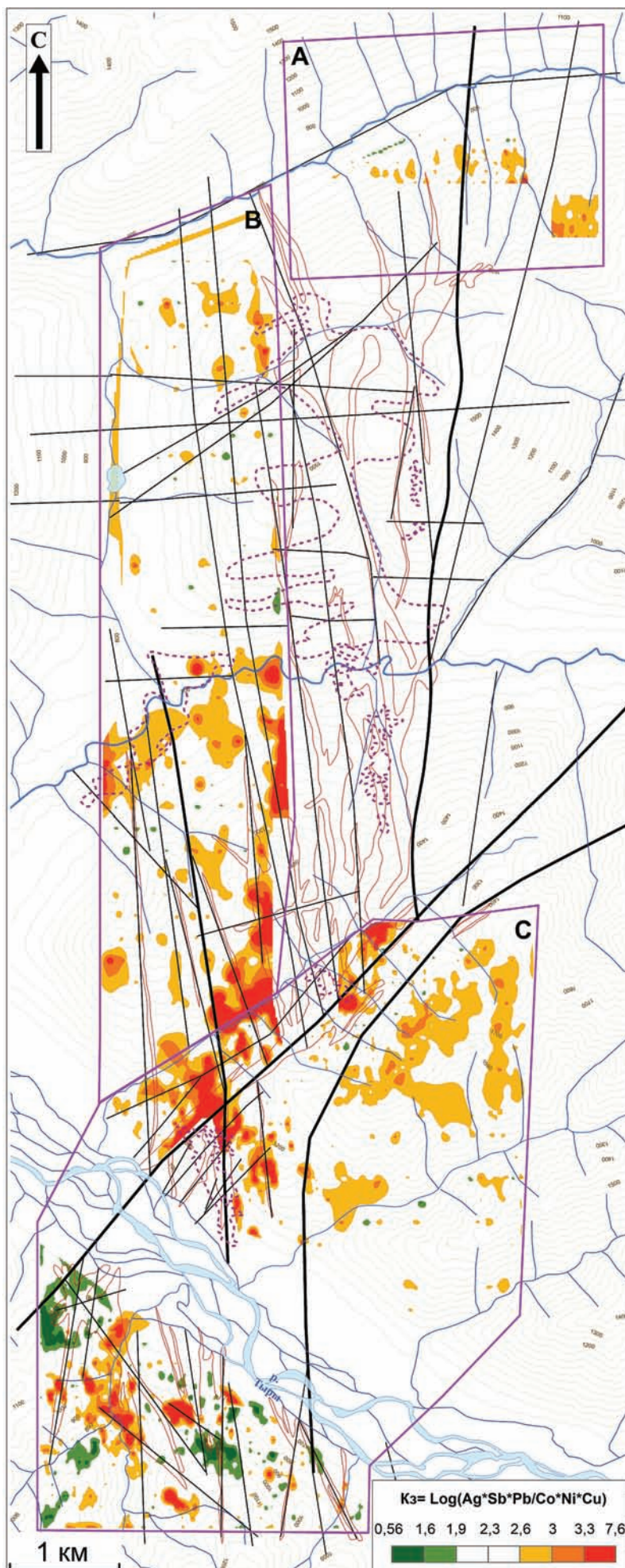


Рис. 6. Карта распределения коэффициента зональности  $AgSbPb/CoNiCu$

Fig. 6. Map of  $AgSbPb/CoNiCu$  zonal coefficient distribution



**Рис. 7.** Карта распределения факторных нагрузок на Нежданинском рудном поле

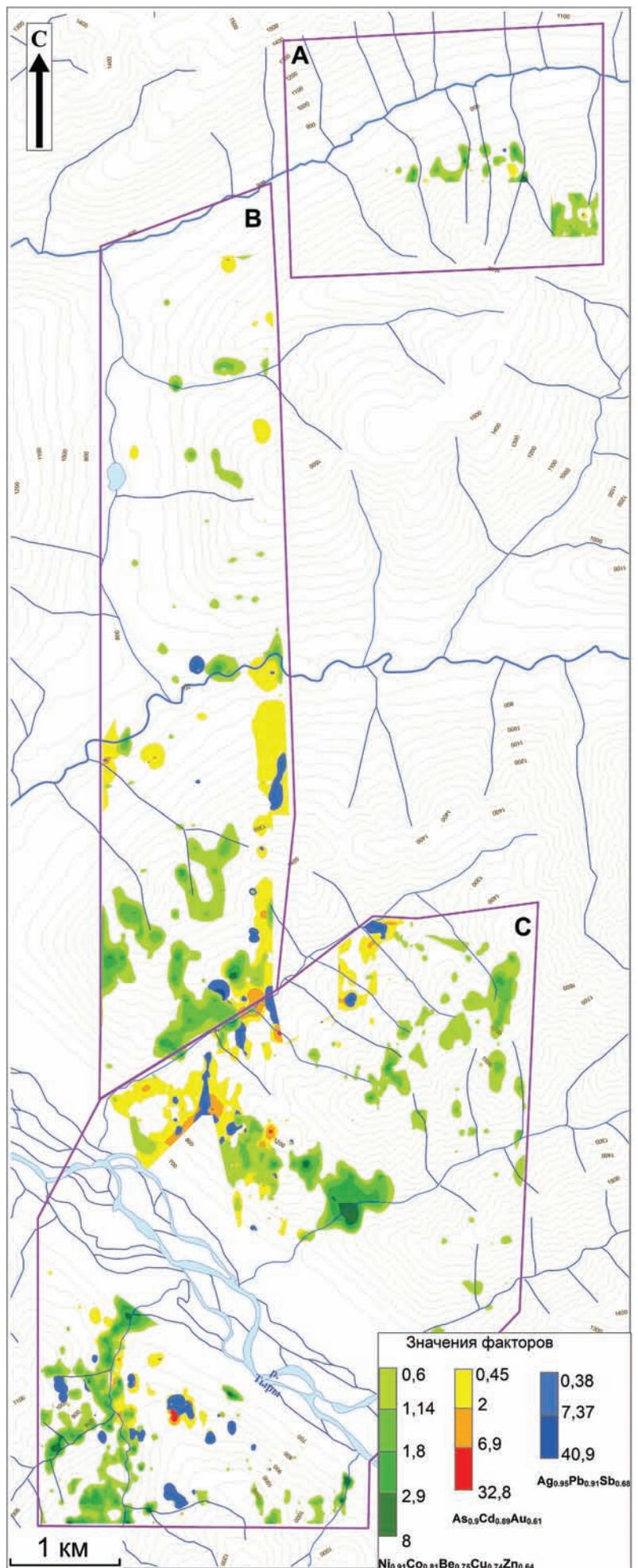
**Fig. 7.** Map of distribution of factor loads on the Nezhdaninskoye ore field

Отдельно необходимо отметить территорию распространения ассоциации Ва-Се, расположенную к востоку от Сунтарского разлома, западная граница его проходит по водораздельной части руч. Кварцевый и Сентябрь. По сравнению с другими участками этот характеризуется практически полным отсутствием рудопроявлений и минерализованных зон и явно отличается по геохимической специализации, что выделяет его в отдельный геологический блок.

Интересно поведение кадмия в рудном поле месторождения, ранее его распространение не рассматривалось при проведении литохимических работ. Его связь с золотом наравне с мышьяком могла бы стать способом достаточно достоверного выделения по элементному анализу рудных и минерализованных зон.

По данным исследователей минералогии Нежданинского месторождения (Гамянин и др., 2001), вторым по распространенности рудным минералом является сфалерит, минерал-носитель кадмия. Известно, что в кислой среде при окислительных условиях сульфид Cd значительно более устойчив по сравнению с ZnS, что может объяснить разделение Zn и Cd (Иванов, 1997). Однако проявленных зон окисления на участках опробования не наблюдалось.

Также известно, что Нежданинское месторождение — полихронное и полигенное. Этот факт подтверждает исследование изотопии свинца и Rb/Sr-анализов руд месторождения (Чернышев и др., 2012, Чернышев и др., 2018). По ним предполагается вовлечение в процесс рудообразования вмещающих пород, например мобилизация свинца из раннепермских терригенных пород. В модели образования месторождения (Гамянин и др., 2001) рассматривается также мобилизация золота в терригенных породах на этапе ранне-аккреционного развития региона и в дальнейшем перераспределения при воздействии магматических флюидов, образованных в результате охотской субдукции. Возможно, и кадмий был наследован золотомещающими сульфидными (арсенопиритом, пиритом) в результате мобилизации его из вмещающих пород под воздействием гидротермальных растворов, что объясняет его связь с золотой минерализацией.



## Выводы

Анализ вторичных ореолов рассеяния, по данным литохимического опробования флангов Нежданинского рудного поля, выявил зоны золотосульфидной (ассоциация As-Cd-Au) и сереброполиметаллической (ассоциация Ag-Pb-Sb) минерализации. Ареалы этих зон пересекаются, что говорит о вероятном наложении нескольких гидротермальных процессов. На периферии наблюдаются участки выноса петрогенных элементов (Ni-Co-Be-Cu-Zn) или же данная ассоциация может отражать латеральную зональность. Своеобразным геохимическим полем выделяется блок восточнее Сунтарского разлома, для которого характерны высокие содержания Ва и Се.

Была определена высокая корреляционная связь кадмия с золотом и мышьяком при слабой зависимости Cd от цинка, минералы которого, как правило, являются носителем данного элемента. При геохимических реконструкциях было сделано предположение о выносе цинка при гипергенной проработке золоторудных зон и аккумуляции кадмия вследствие его меньшей подвижности. Другой вариант интерпретации его повышенного содержания в зоне распространения золота — это привнос кадмия в зону рудоотложения магматогенными гидротермальными растворами (в которых повышено отношение Cd/Zn), наряду с золотом и свинцом.

## Литература / References

- Бортников Н. С., Гамянин Г. Н., Алпатов В. А., Наумов В. Б., Носик Л. П., Миронова О. Ф. Минералого-геохимические особенности и условия образования Нежданинского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 2. С. 137—156.
- Bortnikov N. S., Gamyanin G. N., Alpatov V. A., Naumov V. B., Nosik L. P., Mironova O. F. Mineralogical and geochemical features and conditions of formation of the Nezhdaninskoye gold deposit (Sakha-Yakutia, Russia). *Geology of Ore Deposits*, 1998, V. 40, No. 2, pp. 137—156. (in Russian)
- Бортников Н. С., Гамянин Г. Н., Викентьева О. В., Прокофьев В. Ю., Алпатов В. А., Бахареv А. Г. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданинского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 2. С. 99—145.
- Bortnikov N. S., Vikent'eva O. V., Prokof'ev V. Yu., Gamyanin G. N., Alpatov V. A., Bakharev A. G. Fluid composition and origin in the hydrothermal system of the Nezhdaninskoye gold deposit, Sakha (Yakutia), Russia. *Geology of Ore Deposits*, 2007, V. 49, No. 2, pp. 87—128.
- Гамянин Г. Н. Минералого-геохимические аспекты золоторудного оруденения Верхояно-Колымских мезозоид. М.: ГЕОС, 2001. 221 с.
- Gamyanin G. N. Mineralogical-genetic aspects of gold mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoids. Moscow: GEOS, 2001, pp. 221. (in Russian)
- Гамянин Г. Н., Бортников Н. С., Алпатов В. В. Нежданинское золоторудное месторождение — уникальное месторождение Северо-Востока России. М.: ГЕОС, 2001. 230 с.
- Gamyanin G. N., Bortnikov N. S., Alpatov V. V. The Nezhdaninskoye gold ore deposit — a unique deposit of the Northeastern Russia. Moscow: GEOS, 2001, 230 p. (in Russian)
- Иванов В. В. Экологическая геохимия элементов: Справочник: кн. 5: Редкие d-элементы. М.: Экология, 1997. 576 с.
- Ivanov V. V. Ecological geochemistry of elements: Handbook: book 5: Rare d-elements. Moscow: Ecology, 1997, 576 p. (in Russian)
- Нежданинское. URL: <https://www.polymetal.ru/assets/where-we-operate/nezhdan/#Reserves-and-Resources> (дата обращения: 01.01.2025 / date of access: 01.01.2025)
- Чернышев И. В., Бахареv А. Г., Бортников Н. С., Гольцман Ю. В., Котов А. Б., Гамянин Г. Н., Чугаев А. В., Сальникова Е. Б., Баирова Э. Д. Геохронология магматических пород района золоторудного месторождения Нежданинское (Якутия, Россия): U-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd-изотопные данные // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 6, С. 487—512.
- Chernyshev I. V., Bortnikov N. S., Goltsman Y. V., Gamyanin G. N., Chugaev A. V., Bairova E. D., Bakharev A. G., Kotov A. B., Sal'nikova E. B. Geochronology of igneous rocks at and near to the Nezhdaninka gold deposit, Yakutia, Russia: U-Pb, Rb-Sr, and Sm-Nd isotopic data. *Geology of Ore Deposits*, 2012, V. 54, No. 6, pp. 411—433.
- Чернышев И. В., Чугаев А. В., Бортников Н. С., Гамянин Г. Н., Прокопьев А. В. Изотопный состав свинца и источники металлов в месторождениях золота и серебра Южного Верхоянья (Якутия, Россия): по данным высокоточного MC-ICP-MS метода // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 5. С. 448—471.
- Chernyshev I. V., Chugaev A. V., Bortnikov N. S., Gamyanin G. N., Prokopiev A. V. Pb isotopic composition and metal sources of Au and Ag deposits of the South Verkhoyansk region (Yakutia, Russia) according to high-precision MC-ICP-MS Data. *Geology of Ore Deposits*, 2018, V. 60, No. 5, pp. 398—417 DOI: 10.1134/S0016777018050039

Поступила в редакцию / Received 24.01.2025



## Геохимические особенности почвенного покрова острова Валаам

Е. Г. Панова, А. А. Шешукова, К. А. Бахматова, Г. А. Русаков, С. Н. Чуков

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*e.panova@spbu.ru, a.sheshukova@spbu.ru, k.bahmatova@spbu.ru, st098988@student.spbu.ru, s\_chukov@mail.ru*

Объектами исследования являются породы и почвы Валаамского архипелага. Архипелаг сложен магматическими породами основного состава, в понижениях перекрытыми осадочными породами, что обусловило уникальное разнообразие природных комплексов на его территории. При слабом техногенном загрязнении изучение химического состава почв Валаама становится особенно актуальным, позволяя проследить связь между геохимическим составом верхних почвенных горизонтов и пород. Методом рентгеноспектрального анализа были проанализированы 141 проба верхних горизонтов почв (0–10 см) и столько же проб почвообразующих пород, отобранных по площади острова, а также определен геохимический состав основных типов почв по горизонтам профиля. Сформирована база данных, в которую для каждого образца внесены сведения о составе почвообразующей породы, типе почвы, характере рельефа и типе землепользования. Геохимические данные обработаны с помощью пакета программ Statistica-5 и метода главных компонент. Установлено, что тип почвообразующих пород является одним из главных факторов, определяющих геохимический облик верхнего почвенного горизонта. По ассоциациям элементов почвы разделились на 4 группы: сформированные на габбро-диабазы, монзонитах, озерно-ледниковых глинах и песках. Выявлены ассоциации элементов, наследуемые почвой от коренных пород, зависящие от рельефа и характерные для различных типов почв.

**Ключевые слова:** *Валаамский sill, габбро-диабазы, монзониты, железисто-метаморфические, геохимия почв*

## Geochemical features of soils of Valaam Island

E. G. Panova, A. A. Sheshukova, K. A. Bakhmatova, G. A. Rusakov, S. N. Chukov

St. Petersburg University, Saint Petersburg, Russia

The objects of the study are rocks and soils of the Valaam Archipelago. The archipelago is composed of igneous rocks of basic composition and Quaternary sediments, which caused the unique diversity of natural complexes on its territory. Due to a very weak expression of technogenic pollution, the study of the chemical composition of Valaam soils becomes especially relevant, as it allows tracing the connection between the geochemical composition of the upper soil horizons and rocks. The composition of the upper horizon (0–10 cm, 141 samples) and 141 samples of parent materials was analyzed by X-ray spectral analysis. Additionally, the geochemical composition of the main soil types was analyzed by genetic horizons of the profile. A database of the chemical composition of soils on Valaam Island was made. Information on the composition of the soil-forming rock, soil type, relief character and agricultural use was included for each sample. The data were processed using Statistica-5. We found that the type of parent material was one of the main factors determining the geochemical properties of the upper soil horizon. According to the associations of chemical elements, the island soils were divided into 4 groups: formed on gabbro-diorites, monzonites, lake-glacial clays and sands. Associations of chemical elements inherited by soil from bedrock, depending on relief and characteristic for different types of soils, were revealed.

**Keywords:** *Valaam sill, gabbro-diorites, monzonites, ferruginous-metamorphic soils, soil geochemistry*

### Введение

Валаамский архипелаг расположен в северо-западной части крупнейшего внутриконтинентального водоема Европы — Ладожского озера, в 40 км от его северного берега. Площадь самого большого острова архипелага — Валаама — около 36 км<sup>2</sup>. Валаамские скалы поднимаются над водой на высоту до 50 м, а подводная часть острова опускается на глубину до 200 м.

Природные условия Валаама — мягкость климата, разнообразие форм рельефа и растительности, широкий спектр почвообразующих пород — обусловили разнообразие естественных почв. Удаленность острова от береговой линии и отсутствие на нем промышленных предприятий способствовали развитию и сохранению на этой территории природного разнообразия. Стремление исследователей объяснить уникальность

ландшафтов нашло отражение в некоторых публикациях по геохимическим характеристикам почв Валаама (Морозова, Лазарева, 2002; Панова и др., 2007; Шильцова и др., 2008; Степанова и др., 2016). При этом было установлено, что влияние на почвенный покров локальных источников загрязнения — поселковой свалки, дизельной станции и дорог с автомобильным движением — имеет ограниченный характер (Панова и др., 2002; Степанова и др., 2016).

Поскольку почвообразующие породы острова представлены контрастными по составу образованиями, то эта территория является удобным объектом для выявления количественных зависимостей между химическим составом верхнего горизонта почв и пород, на которых они формируются. Выявление таких зависимостей на незагрязненной территории дает возмож-

**Для цитирования:** Панова Е. Г., Шешукова А. А., Бахматова К. А., Русаков Г. А., Чуков С. Н. Геохимические особенности почвенного покрова острова Валаам // Вестник геонаук. 2025. 2(362). С. 27–33. DOI: 10.19110/geov.2025.2.3

**For citation:** Panova E. G., Sheshukova A. A., Bakhmatova K. A., Rusakov G. A., Chukov S. N. Geochemical features of soils of Valaam Island. Vestnik of Geosciences, 2025, 2(362). pp. 27–33, DOI: 10.19110/geov.2025.2.3

ность получить данные о фоновом содержании химических элементов в почвах и заложить основу для эколого-геохимического мониторинга.

### Объекты и методы исследования

**Почвообразующие породы.** По данным ряда авторов (Свириденко, Светов, 2008; Свириденко, 2019), острова Валаамского архипелага являются центром Валаамско-Салминской островной дуги. Коренные породы слагают многочисленные гряды острова; обширные обнажения коренных пород приурочены к северным, западным и южным берегам Валаама. Среди наиболее распространенных пород, слагающих интрузию (Валаамский силл), выделены две разновидности, связанные постепенными переходами: габбро-диабазы и монцониты. Проведенные исследования и сравнение полученных результатов с данными других авторов позволили установить, что все разновидности пород Валаамского силла образовались в результате внутрикамерной дифференциации, «in situ». Возраст габбро-диабазов Валаамского силла составляет  $1325 \pm 52$  млн лет, а возраст монцонитов —  $1458 \pm 3$  млн лет. Габбро-диабазы — породы основного состава, имеющие крупно- и равномерно-зернистую габбро-офитовую структуру. Окраска в свежем сколе — буро-коричневая. Породы сложены преимущественно основным плагиоклазом ряда «лабрадор — андезин» и пироксеном. Из акцессорных минералов отмечены биотит, роговая обманка, оливин, апатит, ильменит, магнетит и титаномagnetит.

Монцониты образуют неправильной формы тела, постепенно переходящие в нормальные габбро-диабазы. Они имеют красно-коричневый цвет (интенсивность красного цвета усиливается при выветривании) и несут признаки метасоматического происхождения. Главная особенность этих пород — преобладание калиевого шпата над плагиоклазом и грубозернистое строение. Структура породы — габбро-офитовая с интерстиционными гранофировыми или микропегматитовыми выделениями. В породе присутствует кварц (до 5 об. %), альбит, калиевый полевой шпат, наблюдается калишпатизация плагиоклаза, хлоритизация пироксена и появляются выделения сульфидов. В результате процессов выветривания магматических пород наблюдается их ожелезнение и развитие глинистых минералов между минеральными зернами.

Элювий магматических пород представляет собой сильнохрящеватую массу с небольшой примесью частиц < 1 мм. На вершинах гряд элювий образует маломощные покровы на коренных породах и представлен дресвой, щебнем и обломками скальных пород. На террасированных склонах и подножьях гряд формируется элюво-делювий мощностью до 100 см, который по сравнению с элювием содержит большее количество мелкозема, пылеватых и илистых частиц.

Осадочные почвообразующие породы располагаются в пониженных элементах рельефа (нижних частях склонов, ложбинах, впадинах между грядами). Наиболее распространены по площади острова озерно-ледниковые ленточные глины и пески. По минеральному составу пески состоят из кварца (50–80 %), калиевого полевого шпата (10–20 %), мусковита (10 %), плагиоклаза, сфена, роговой обманки, эпидота, в тон-

ких фракциях встречаются гидрослюды. Минеральный состав ленточных глин (пылеватой фракции) представлен кварцем (40–50 %), полевым шпатом (5 %), мусковитом (30–40 %). Илистая фракция ленточных глин состоит на 65 % из каолинита и на 25 % из гидрослюды, хлорита (5 %) и монтмориллонита (5 %).

**Почвы и почвенный покров.** В данной статье мы опишем на собственные исследования почв Валаамского архипелага, а также работы, выполненные ранее другими учеными (Седов и др., 1992; Беркгаут и др., 1993; Матинян, Урусевская, 1999; Морозова, Лазарева, 2002). В соответствии с принятыми ранее классификационными подходами почвы Валаама рассматривались как подбуры и буроземы. Согласно «Классификации и диагностике почв России» (Шишов и др., 2004), почвы, преобладающие на вершинах и в верхней части склонов скальных гряд, — петроземы (слаборазвитые почвы на скальных выходах с мощностью мелкозема на поверхности менее 5 см), а также органоржавоземы. Последние относятся к отделу железисто-метаморфических почв. Диагностическим для них является срединный железисто-метаморфический горизонт (BFM), характеризующийся пленками выветривания на поверхности щебня и минеральных зерен. Оксиды и гидроксиды железа также пропитывают мелкоземистую массу горизонта, способствуя формированию непрочной комковатой структуры.

В нижней части склона органоржавоземы сочетаются с органоржавоземами грубогумусированными. Особенностью последних является наличие подстилкой (O) маломощного (2–5 см) грубогумусового горизонта (Oao). Горизонт Oao представляет собой гумифицированную массу темно-серого цвета с включениями дресвы магматических пород, с частично сохранившимися фрагментами растительных остатков, густо пронизанную грибными гифами. Те и другие почвы формируются на элюво-делювии магматических пород в условиях хорошего дренажа. Различия между почвами проявляются на очень коротком расстоянии (до 1–2 м) и обусловлены неровностями подстилающей скальной поверхности, а также варьированием содержания фракции физической глины в почвенном профиле.

Межгрядовые понижения заняты преимущественно четвертичными породами, почвы здесь подвержены избыточному увлажнению, поэтому еще в XIX в. были осушены при создании культурных сенокосов и пастбищ (осушительная система в последние годы реконструирована). Более дренированные участки понижений заняты дерново-подзолами и постагрогенными агроземами альфегумусовыми на озерно-ледниковых песках. На ровных участках окультуренных осушенных лугов, сложенных ленточными глинами с низкой водопроницаемостью, развиты агрогумусово-глеевые почвы (Елсукова, 1997; Панова и др., 2002; Урусевская, Матинян, 2014). Эти почвы характеризуются гумусовым горизонтом с признаками сельскохозяйственной обработки (резко выраженная ровная нижняя граница) и залегающим под ним глеевым горизонтом (G), переходящим в оглеенную почвообразующую породу. На неосушенных участках понижений, по краям болот, распространены торфяно-глеевые, верхний горизонт которых представлен торфом мощностью 20–50 см.



Материалом для исследования послужили пробы (141 шт.) верхнего (органогенного/органоминерального) горизонта, отобранные на удалении от монастыря и локальных источников загрязнения, и 141 проба почвообразующих пород. Для исследований был взят горизонт АУ в агрогумусово-глеевых почвах, в органоржавоземах — горизонт ВН, в органоржавоземах грубогумусированных — подгоризонт ао, в торфяно-глееземах — горизонт Т. Дополнительно были отобраны пробы основных типов почв (агрогумусово-глеевая, торфяно-глеезем, органоржавозем и органоржавозем грубогумусированный) по генетическим горизонтам профиля.

Содержания химических элементов в почвах определены методом рентгеноспектрального анализа (породообразующие оксиды и 22 химических элемента) и пересчитаны на прокаленную навеску. Химические анализы выполнялись по стандартным методикам с использованием эталонов для пород и почв. Содержания главных порообразующих элементов проанализированы рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL-9800 (Thermo Fisher Scientific (Ecublens) SARL). Двухвалентное железо определено химическим методом согласно ГОСТ 27395-87, анализ вытяжек проведен на спектрофотометре, с ортофенантролином в качестве индикатора. Содержания микроэлементов

анализировали на спектрометре Agilent-7700. Была сформирована база данных химического состава почв о. Валаам, в которую для каждой пробы внесены сведения о составе почвообразующей породы, типе почвы, характере рельефа и типе землепользования. Геохимические данные обработаны с помощью пакета программ Statistica-5 и метода главных компонент факторного анализа. Средние арифметические значения для каждого элемента вычислялись с учетом закона распределения (нормального или логнормального) и антилогарифма среднего.

### Результаты и их обсуждение

Состав основных разновидностей пород Валаамского силла приведен в табл. 1.

Согласно указанным выше данным, габбро-диабазы обогащены  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , а также  $\text{Zn}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Sr}$ . В монзонитах относительно габбро-диабазов повышено содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Rb}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Pb}$ . В целом магматические породы Валаамского силла обогащены по сравнению с кларками пород  $\text{P}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Mn}$  и  $\text{Ti}$ . Среди элементов-примесей в рассматриваемых породах обнаружены повышенные содержания  $\text{V}$ ,  $\text{La}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{Mo}$ ,  $\text{Zn}$ , что превышает кларковые значения в 2–6 раз. В составе песков и глин повышены со-

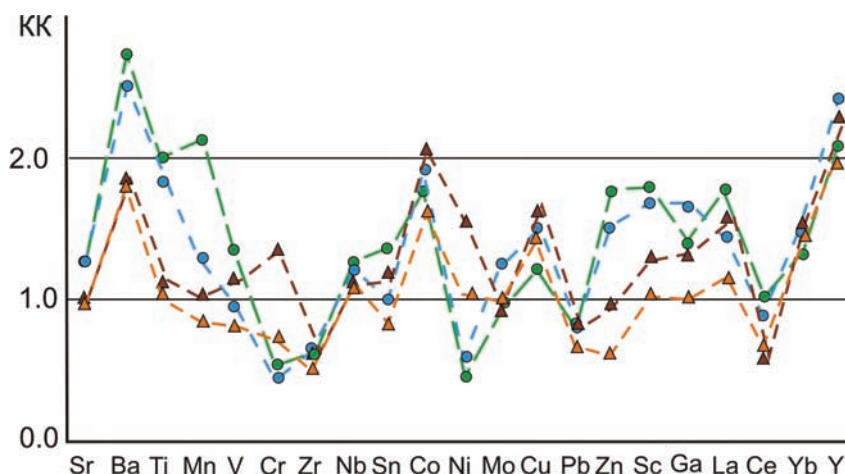
**Таблица 1.** Среднее содержание петрогенных оксидов (мас. %) и микроэлементов (мг/кг) в почвообразующих породах Валаамского архипелага

**Table 1.** Average content of petrogenic oxides (wt. %) and trace elements (mg/kg) in soil-forming rocks of the Valaam Archipelago

Оксиды/ элементы Oxides/ elements	Порог обнаружения Detection limit	Габбро-диабаз Gabbro-diabase (n = 44)	Монзонит Monzonite (n = 53)	Глина Clay (n = 23)	Песок Sand (n = 21)	Кларк в земной коре (Скляров и др., 2001) Clarke in the Earth's crust (Sklyarov et al., 2001).
$\text{SiO}_2$	0.1	50.2	56.4	60.2	81.4	59.90
$\text{TiO}_2$	0.03	3.2	1.9	0.66	0.83	0.88
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.1	13.2	13.4	19.3	8.9	15.25
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.1	10.2	7.7	5.5	1.9	7.48*
$\text{FeO}$	0.2	7.6	5.9	1.1	1.0	—
$\text{MnO}$	0.03	1.2	1.2	0.04	0.04	0.12
$\text{MgO}$	0.1	3.3	2.5	0.77	0.50	3.75
$\text{CaO}$	0.03	6.5	4.0	1.9	1.8	5.33
$\text{Na}_2\text{O}$	0.2	3.4	3.9	0.71	2.1	3.21
$\text{K}_2\text{O}$	0.03	2.2	3.2	2.0	2.0	2.57
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.05	1.4	0.7	0.22	0.13	0.23
$\text{Sr}$	50	541	463	220	267	370
$\text{Ba}$	5	1616	1756	720	733	470
$\text{Rb}$	5	36	52	76	33	110
$\text{V}$	10	106	37	88	35	12
$\text{Cr}$	10	19	18	88	28	93
$\text{Zr}$	5	215	286	178	160	160
$\text{Nb}$	5	20	26	10	9	21
$\text{Co}$	10	25	15	16	4	23
$\text{Ni}$	5	11	7.4	41	13	70
$\text{Mo}$	10	4.4	4.9	2.3	1.3	1.2
$\text{Cu}$	10	20	14	34	17	53
$\text{Pb}$	2	10	17	21	15	13
$\text{Zn}$	2	294	220	66	23	68
$\text{Sc}$	10	26	24	9	4	17
$\text{La}$	5	58	66	46	26	30
$\text{Y}$	5	41	46	20	11	32
$\text{Yb}$	2	3.3	4.1	2.9	2.2	3.1

Примечание: кларк железа в источнике приведен для суммарного содержания двух форм железа (II, III).

Note: the iron clark in the source is given for total iron content.



**Рис. 1.** Коэффициенты концентрации химических элементов в поверхностном горизонте почв о. Валаам (нормировано на Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007). Почвы, сформированные: —●— на габбро-диабазе, —●— монцонитах, —▲— глинах, —▲— песках

**Fig. 1.** Concentration coefficients of chemical elements in the surface horizon of soils of Valaam island (normalized to Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007). Soils formed on: —●— gabbro-diorites, —●— monzonites, —▲— clays, —▲— sands

держания V и Ba, что определяется влиянием коренных пород острова. Специфический для Северо-Запада России геохимический состав почвообразующих пород Валаамского архипелага наследуется почвами, на них сформированными.

В табл. 2 представлены средние значения для микроэлементного состава поверхностных горизонтов почв о. Валаам, которые показывают, что почвы на маг-

матических породах обогащены Ba, Ti, Mn, Zn, а почвы на осадочных породах содержат больше Ni, Cr, Cu.

Для сравнительного анализа содержаний элементов в верхних почвенных горизонтах были рассчитаны коэффициенты концентраций (KK) относительно их среднего содержания в почвах мира (рис. 1).

В целом поверхностные горизонты почв о. Валаам обогащены Ba, Y, Yb, La, Zn, Co, Cu; содержания Cr, Zr,

**Таблица 2.** Среднее содержание химических элементов в поверхностных горизонтах почв о. Валаам на различных почвообразующих породах, мг/кг

**Table 2.** Average contents of chemical elements in surface horizons of soils on Valaam Island on different soil-forming rocks. Valaam Island on different soil-forming rocks, mg/kg

Элементы Elements	Содержание (мг/кг) в почвах, сформированных: Content (mg/kg) in soils formed on:				Среднее по почвам мира* Average for soils of the World*	Медиана, пахотный горизонт почв Северо-Запада** Median, arable soil horizon of the North-West**
	на габбро-диабазе gabbro-diorites (n = 44)	монцонитах monzonites (n = 53)	глинах clays (n = 23)	песках sands (n = 21)		
Sr	187	189	142	140	147	119
Ba	978	896	656	645	362	не опр.
Ti	7027	6438	3932	3570	3500	не опр.
Mn	879	540	421	361	418	472
V	81	57	68	48	60	34
Cr	22	18	56	31	42	30
Zr	188	192	200	154	300	не опр.
Nb	15	15	13	14	12	не опр.
Sn	3.4	2.5	2.8	2.1	2.5	1.0
Co	12.2	13.3	14.0	11.0	6.9	5.8
Ni	8	10	27	19	18	10
Mo	1.4	1.9	1.4	1.5	1.5	0.6
Cu	17	21	23	20	14	9
Pb	20	18	19	17	25	16
Zn	109	94	57	39	62	48
Sc	16.9	15.8	11.6	9.5	9.5	не опр.
Ga	17	20	16	12	12	не опр.
La	46	37	41	30	26	не опр.
Ce	49	44	30	33	49	не опр.
Yb	2.8	3.1	3.2	2.8	2.1	не опр.
Y	25	29	27	24	12	не опр.

\*Kabata-Pendias, Mukherjee, 2007

\*\* Матинян и др., 2007 (Matinyan et al., 2007)



Ce, Ni, Pb — ниже средних по миру. Для выявления факторов распределения химических элементов в почвах о. Валаам база данных была обработана с помощью методов корреляционного и факторного анализов.

По результатам факторного анализа выявились три фактора. Первый фактор —  $F_{I=28\%} = Ti_{81} Fe_{72} Mn_{69} V_{66} Sc_{60} Co_{55}$  — интерпретируется как фактор почвообразующей породы, так как его распределение по площади острова совпадает с зонами распространения основных типов пород острова (габбро-диабазы, монцониты, песками и глинами) и картами площадного распределения титана, железа и марганца (рис. 2).

Второй фактор —  $F_{II=22\%} = Sr_{88} Zr_{65}$  — интерпретируется как фактор рельефа. Различия наблюдаются для групп «вершина — склон» и «равнина — низина». При этом вершинные формы рельефа связаны с интрузивными образованиями, а низины и понижения рельефа — с четвертичными образованиями.

Третий фактор определяется типом почвы.

$$F_{III=13\%} = \frac{Ni_{92} Cr_{91} Cu_{58}}{Ti_{87} Ba_{77} Mn_{70} Zn_{65}}$$

Тип почвы зависит от рельефа и растительности. На диаграмме значения факторов выделены два поля, характерные для почв: торфяно-глеезем + агрогумусово-глеевая почва и органоржавозем + органоржавозем грубогумусированный (рис. 3). Почвы первой группы, сформированные на четвертичных отложениях, обогащены Ni, Cr, Cu, а почвы второй группы, сформированные на продуктах выветривания магматических пород, — Ti, Ba, Mn, Zn.

Сравнение профильного распределения петрогенных оксидов в органоржавоземе на элювии монцонита, агрогумусово-глеевой постагрогенной почве на лен-

точных глинах и в агроземе альфегумусовом глееватом на озерно-ледниковых песках показало, что макроэлементный состав почв наследуется от почвообразующих пород. Особенно ярко различия проявляются по содержанию железа. Почвы на глинах содержат 5–6 %  $Fe_2O_3$ , а почвы на песках — 1.5–3.5 % (соответственно средняя и умеренно низкая ожелезненность, по Ю. Н. Водяницкому (1992)). В почвах на элювии магматических пород содержание оксида железа достигает 11–13 %, что соответствует высокой ожелезненности.

## Выводы

1. Геохимический облик верхнего горизонта почв Валаамского архипелага обладает яркой спецификой. Относительно приводимых в литературе данных для почв мира и Северо-Запада России поверхностные горизонты почв архипелага обогащены Ba, Y, Yb, La, Zn, Co, Cu; содержания Cr, Zr, Ce, Ni, Pb — ниже средними-ровых значений.

2. Геохимические особенности почв находятся в прямой зависимости от состава почвообразующих пород. По ассоциациям химических элементов почвы разделились на 4 группы: сформированные на габбро-диабазе, монцонитах, озерно-ледниковых глинах и песках. Почвы, сформированные на продуктах выветривания магматических пород, наследуют в своем геохимическом составе повышенные содержания Ti, Ba, Mn, Zn, а почвы, сформированные на четвертичных отложениях, обогащены Ni, Cr, Cu.

3. В условиях Валаамского архипелага тип почвообразующей породы является ведущим фактором дифференциации почвенного покрова и контролирует геохимические различия между типами почв, превосхо-

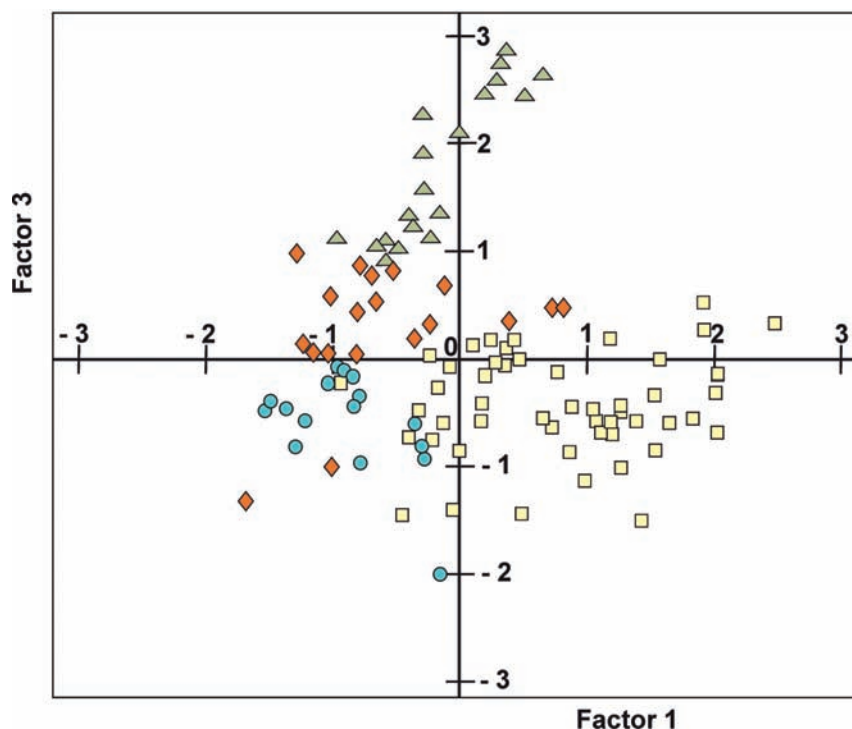
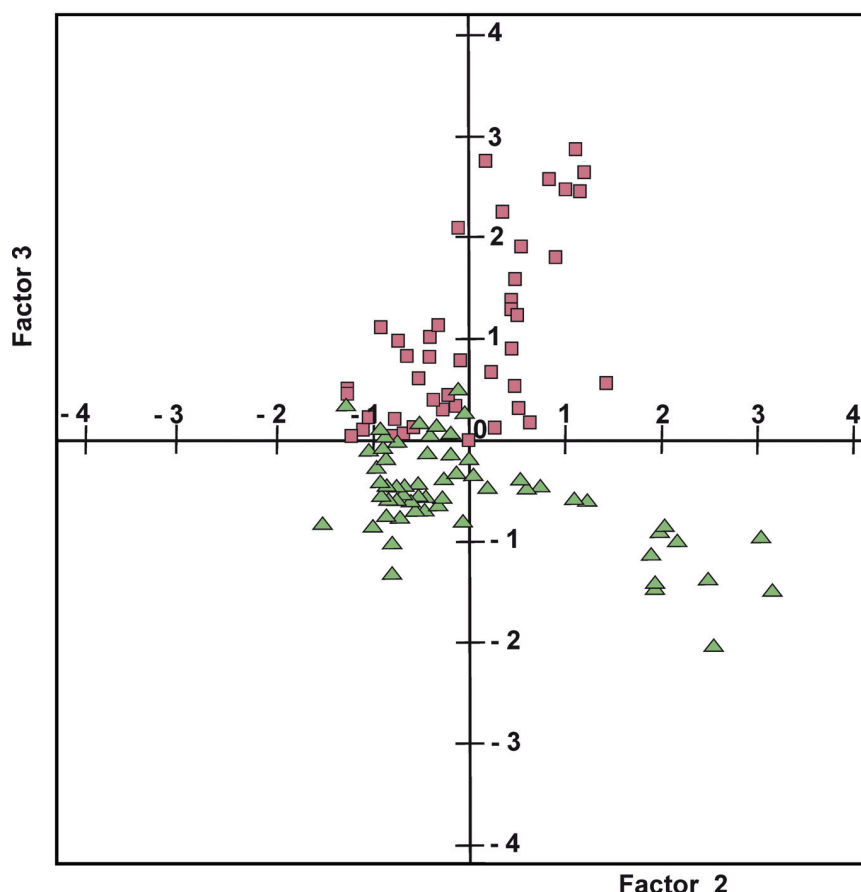


Рис. 2. Диаграмма значений 1-го и 3-го факторов ( $n = 141$ ,  $r_{kp} = 25.4$ ;  $p = 0.01$ ).

Обозначения почвообразующих пород: квадрат — габбро-диабаз, круг — монцонит, ромб — песок, треугольник — глина

Fig. 2. Diagram of values of factors 1 and 3 ( $n = 141$ ,  $r_{kp} = 25.4$ ;  $p = 0.01$ ).

Designations of soil-forming rocks: square — gabbro-diorite, circle — monzonite, rhombus — sand, triangle — clay



**Рис. 3.** Диаграмма значений 2-го и 3-го факторов ( $n = 141$ ,  $r_{кр} = 25.4$ ;  $p = 0.01$ ).

Обозначения почв: треугольник — ржавоземы грубогумусовые и органоржавоземы, сформированные на элювии и элюво-делювии магматических пород; квадрат — торфяно-глееземы и агрогумусово-глеевые почвы, сформированные на осадочных почвообразующих породах

**Fig. 3.** Diagram of the values of factors 2 and 3 ( $n = 141$ ,  $r_{кр} = 25.4$ ;  $p = 0.01$ ).

Soil designations: triangle — raw humus rusty soils and organic rusty soils formed on eluvium and eluvium-deluvium of igneous rocks; square — peat-gley soils and agro-humus-gley soils formed on sedimentary parent rocks

для в этом отношении роль рельефа. Растительность и характер землепользования находятся в прямой зависимости от типа почвообразующих пород.

Все перечисленные особенности необходимо учитывать при эколого-геохимической оценке почв о. Валаам.

### Литература / References

- Беркгаут В. В., Седов С. Н., Гракина Е. Р., Востокова Т. А. Почвообразование и выветривание на основных породах острова Валаам // Вестник МГУ. Сер. 17, почвоведение. 1993. № 1. С. 3—15.
- Berggaut V. V., Sedov S. N., Grakina E. R., Vostokova T. A. Soil formation and weathering on the basic rocks of Valaam Island. Vestnik of MSU. Ser. 17, Soil Science. 1993, No. 1, pp. 3—15. (in Russian)
- Водяницкий Ю. Н. Образование оксидов железа в почве. М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева, 1992. 275 с.
- Vodyanitsky Y. N. Formation of iron oxides in soil. Moscow: V. Dokuchaev Soil Institute, 1992, 275 p. (in Russian)
- ГОСТ 27395-87. Почвы. Метод определения подвижных соединений двух- и трехвалентного железа по Веригиной-Аринускиной.

GOST 27395-87. Soils. Method for determination of mobile compounds of divalent and trivalent iron according to Verigina-Arinushkina. (in Russian)

- Елсукова Е. Ю. Микроэлементы в почвах сельскохозяйственных угодий о-ва Валаам // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. 1997. № 3. С. 132—137.
- Elsukova E. Yu. Microelements in soils of agricultural lands of Valaam Island. Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography, 1997, No. 3, pp. 132—137. (in Russian)
- Матинян Н. Н., Урусевская И. С. Почвы острова Валаам. СПб.: СПбГУ, 1999. 31 с.
- Matinyan N. N., Urusevskaya I. S. Soils of Valam Island. St. Petersburg: SPbSU Publishing House, 1999, 31 p. (in Russian)
- Матинян Н. Н., Рейманн К., Бахматова К. А., Русаков А. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и мышьяка в пахотных почвах Северо-Запада России // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Сер. 3. Биология. 2007. Вып. 3. С. 123—134.
- Matinian N. N., Reimann C., Bakhmatova K. A., Rusakov A. V. The background concentrations of heavy metals and As in arable soils of the Baltic regions. Bulletin of St. Petersburg University. Ser. 3, Biology, 2007, No. 3, pp. 123—134. (in Russian)



- Морозова Р. М., Лазарева И. П. Почвы и почвенный покров Валаамского архипелага. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2002. 170 с.
- Morozova R. M., Lazareva I. P. Soils and soil cover of the Valaam Archipelago. Petrozavodsk: Karelian SC RAS, 2002, 170 p. (in Russian)
- Панова Е. Г., Гавриленко В. В., Матинян Н. Н. Валаамский архипелаг. Геохимия горных пород, почв и донных осадков. СПб.: РГПУ им. А. И. Герцена, 2007. 83 с.
- Panova E. G., Gavrilenko V. V., Matinyan N. N. Valaam Archipelago. Geochemistry of rocks, soils and bottom sediments. Publishing house of Herzen Russian State Pedagogical University, 2007, 83 p. (in Russian)
- Панова Е. Г., Гавриленко В. В., Матинян Н. Н., Шешукова А. А. Геохимическая оценка загрязнений почвенного покрова Валаамского архипелага // Геоэкология. 2002. № 6. С. 500—505.
- Panova E. G., Gavrilenko V. V., Matinyan N. N., Sheshukova A. A. Geochemical assessment of soil contamination of the Valaam archipelago. Geoecology, 2002, No. 6, pp. 500—505. (in Russian)
- Свириденко Л. П., Светов А. П. Валаамский силл габбро-долеритов и геодинамика котловины Ладожского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 123 с.
- Sviridenko L. P., Svetov A. P. Valaam gabbro-dolerite sill and geodynamics of the Ladoga Lake basin. Petrozavodsk: Karelian SC RAS, 2008, 123 p. (in Russian)
- Свириденко Л. П. Ладожская вулcano-тектоническая структура (геология, вулканоплутонизм, тектоника). Петрозаводск: Институт геологии КарНЦ РАН, 2019. 98 с.
- Sviridenko L. P. Ladoga volcano-tectonic structure (geology, volcano-plutonism, tectonics). Petrozavodsk: Institute of Geology KarSC RAS, 2019, 98 p. (in Russian)
- Седов С. Н., Васенева Э. Г., Шоба С. А. Современные и древние процессы выветривания в почвах на основных породах острова Валаам // Почвоведение. 1992. № 7. С. 83—96.
- Sedov S. N., Vaseneva E. G., Shoba S. A. Modern and ancient weathering processes in soils on the basic rocks of Valaam Island. Soil Science, 1992, No. 7, pp. 83—96. (in Russian)
- Скляр Е. В. и др. Интерпретация геохимических данных / Под ред. Е. В. Склярова. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Sklyarov E. V. et al. Interpretation of geochemical data. Ed. E. V. Sklyarov. Moscow: Intermet Engineering, 2001, 288 p. (in Russian)
- Степанова А. Б., Бабин А. В., Дмитричева Л. Е., Комолова С. А., Ерманова М. Г., Коровина А. С. Анализ антропогенного воздействия на наземные экосистемы о. Валаам // Экосистемы Валаамского архипелага (Ладожское озеро) на рубеже XX и XXI веков. Черты уникальности и современное состояние: Атлас. СПб., 2016. 44 с.
- Stepanova A. B., Babin A. V., Dmitricheva L. E., Komolova S. A., Ermanova M. G., Korovina A. S. Analysis of anthropogenic impact on terrestrial ecosystems of Valaam Island. Valaam. Ecosystems of the Valaam Archipelago (Lake Ladoga) at the turn of the 20th and 21st centuries. Traits of uniqueness and current state Atlas. St. Petersburg, 2016, 44 p. (in Russian)
- Урусевская И. С., Матинян Н. Н. Антропогенно-преобразованные почвы островных средневековых монастырей таежно-лесной зоны России. М.: ГЕОС, 2014. 154 с.
- Urusevskaya I. S., Matinyan N. N. Anthropogenically transformed soils of island medieval monasteries of the taiga-forest zone of Russia. Moscow: GEOS, 2014, 154 p. (in Russian)
- Шильцова Г. В., Морозова Р. М., Литинский П. Ю. Тяжелые металлы и сера в почвах Валаамского архипелага. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2008. 109 с.
- Shiltsova G. V., Morozova R. M., Litinsky P. Yu. Heavy metals and sulfur in soils of the Valaam Archipelago. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of RAS, 2008, 109 p. (in Russian)
- Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I. Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena, 2004, 342 p. (in Russian)
- Kabata-Pendias A., Mukherjee A. B. Trace elements from soil to human. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 550 p.

Поступила в редакцию / Received 28.01.2025



## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 550.34.6(348.098)

DOI: 10.19110/geov.2025.2.4

### Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году

Н. Н. Носкова<sup>1</sup>, Ф. Г. Верховланцев<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, [nataliyageo@mail.ru](mailto:nataliyageo@mail.ru)<sup>2</sup> Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, [sombra@mail.ru](mailto:sombra@mail.ru)

Актуальность работы определяется тем, что активная разработка месторождений полезных ископаемых на севере Республики Коми провоцирует возникновение различных сейсмических событий. Большинство из них остаются незамеченными и неизученными. Целью исследований были рекогносцировочные сейсмические наблюдения северных районов республики. Для выяснения фактической сейсмической обстановки на территории Воркутинского углепромышленного района и протекающих здесь горно-динамических процессов летом 2023 г. были организованы экспедиционные сейсмологические работы на Полярном Урале. Подобные кратковременные наблюдения на Приполярном Урале проводились также в 2021 г. и предвляли установку стационарной сейсмической станции в Инте.

Полевые работы выполнялись в 3 этапа: на известняковом карьере «Юнь-Яга», в южной периклинали массива Енганепэ и южной части хр. Нияхой. Сейсмические записи характеризуются низким и средним уровнями шумов в сравнении с новой моделью шумов Петерсона. Всего было зарегистрировано более 100 локальных сейсмических событий с энергетическим классом по Т. Г. Раутиан  $K_r = 3.8–8.9$  и магнитудой  $M_L$  от  $-0.2$  до  $2.8$ . Пространственное распределение сейсмических событий показало, что они в основном сосредоточены вокруг Воркуты и, соответственно, шахтных полей. Изучение горнодобывающей активности, а также анализ волновой картины позволили нам выявить отличия волновых форм шахтных динамических явлений и промышленных взрывов и установить природу сейсмических событий. Большинство событий являются динамическими явлениями на угольных шахтах. Построен график повторяемости, характеризующий особенности сейсмических процессов. Исходя из закона повторяемости, можно утверждать, что временными наблюдениями на Полярном Урале регистрировалась именно техногенная сейсмичность в пределах Воркутинского углепромышленного района.

**Ключевые слова:** временная сейсмическая станция, микросейсмы, техногенная сейсмичность, горный удар, угольная шахта

### Temporary seismic observations in the north of the Komi Republic (Polar Urals) in 2023

N. N. Noskova<sup>1</sup>, F. G. Verkholtantsev<sup>2</sup><sup>1</sup> Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar<sup>2</sup> Mining Institute of UB RAS, Perm

The relevance of the study is underscored by the fact that the active development of mineral deposits in the north of the Komi Republic provokes various seismic events. Most of them remain unnoticed and unexplored. The study aimed at reconnaissance seismic observations of the northern regions of the republic. To clarify the actual seismic situation in the territory of the Vorkuta coal mining region and the mountain-dynamic processes occurring here, expeditionary seismological work was organized in the Polar Urals in the summer of 2023. Similar short-term observations in the Subpolar Urals were also carried out in 2021 and preceded the installation of a stationary seismic station in the city of Inta.

Field work was carried out in 3 stages: at the Yun-Yaga limestone quarry, in the southern pericline of the Enganepe massif and in the southern part of the Niyakhoy ridge. Seismic records were characterized by low and medium noise levels compared to the new Peterson noise model. In total, more than 100 local seismic events with the energy class according to T. G. Rautian  $K_r = 3.8–8.9$  and magnitude  $M_L$  from  $-0.2$  to  $2.8$  were registered. The spatial distribution of seismic events showed that they were mainly concentrated around the city of Vorkuta and, accordingly, mine fields. The study of mining activity, as well as the analysis of the wave pattern allowed identifying differences in the wave forms of mine dynamic phenomena and industrial explosions and establishing the nature of seismic events. Most of the events are dynamic phenomena in coal mines. We constructed a recurrence graph characterizing features of seismic processes. Based on the law of recurrence, we concluded that temporary observations in the Polar Urals recorded precisely man-made seismicity within the Vorkuta coal mining region.

**Keywords:** temporary seismic station, microseisms, man-made seismicity, rock burst, coal mine

**Для цитирования:** Носкова Н. Н., Верховланцев Ф. Г. Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году // Вестник геонаук. 2025. 2(362). С. 34–43. DOI: 10.19110/geov.2025.2.4

**For citation:** Noskova N. N., Verkholtantsev F. G. Temporary seismic observations in the north of the Komi Republic (Polar Urals) in 2023. Vestnik of Geosciences, 2025, 2(362). pp. 34–43, doi: 10.19110/geov.2025.2.4



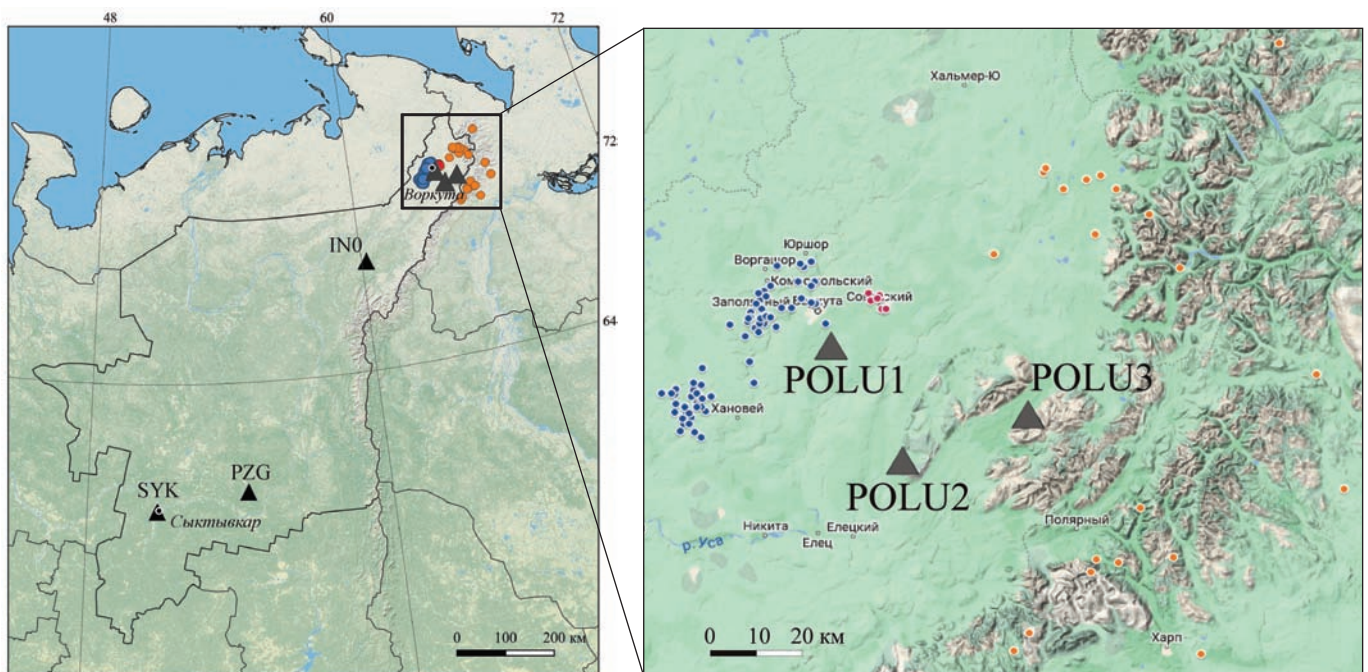
## Введение

Сейсмологические наблюдения в Республике Коми проводятся с марта 1996 г., когда в Сыктывкаре была открыта сейсмическая станция «Сыктывкар» (SYK) Института геологии (ИГ) ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Первоначально оборудование было аналоговое, позднее заменено на цифровое. В разные годы временные пункты наблюдений располагались в разных районах республики: Княжпогостском — с. Серёгово, Ижемском — с. Ижма, Усть-Куломском — пос. Зимстан. Наиболее продолжительное время функционировали сейсмостанции «Грива» (GRV) в д. Карвуджем Койгородского района (2011—2018 гг.) и «Пожег» (PZG) в с. Пожег Усть-Куломского района (2014—2023 гг.). Новый этап в развитии сейсмологических наблюдений на территории республики начался в 2021 г. с установки сейсмостанции «Инта» (IN0) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в Инте, на северо-востоке республики (рис. 1). Благодаря этому удалось понизить порог представительности по магнитуде  $M_L$  регистрируемых сейсмических событий на севере республики с 4.0 до 2.5 и появилась возможность регистрировать техногенную сейсмичность на территории Республики Коми (Носкова и др., 2023). До этого стационарные станции техногенные события на севере республики не фиксировали. Расположение сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в 2023 г. показано на рис. 1.

Территория республики слабосейсмична. Техногенные сейсмические события преобладают над природными, т. к. основу экономики республики составляют минерально-сырьевые ресурсы. Актуальность наших исследований определяется тем, что активная разработка месторождений полезных ископаемых про-

воцирует возникновение различных сейсмических событий. Доминирующее место занимает топливно-энергетический комплекс, представленный нефтедобывающей, нефтеперерабатывающей, газовой, угольной отраслями, что обусловлено расположением в пределах республики Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции (Носкова, 2019; 2024) и Печорского угольного бассейна (Носкова, 2017; Носкова, Асминг, 2018; Носкова и др., 2018; 2024), в пределах которых и происходит основная доля техногенных сейсмических событий.

Как уже отмечалось выше, с открытием сейсмической станции «Инта» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН появилась возможность вести мониторинг техногенной сейсмичности на территории Республики Коми. На региональных расстояниях станцией регистрируются сейсмические события с  $M_L \geq 2.0$ , происходящие на угольных шахтах вблизи Воркуты, и промышленные взрывы на угольном разрезе «Юньягинский» (Носкова и др., 2023). Для выяснения реальной сейсмической обстановки на территории Воркутинского углепромышленного района и протекающих здесь горно-динамических процессов были организованы экспедиционные сейсмологические работы летом 2023 г. на Полярном Урале. Целью этих исследований были реконструктивные сейсмические исследования северных районов республики. Временные сейсмологические наблюдения необходимы для оценки объема сейсмических событий, происходящих в Воркутинском углепромышленном районе, пространственного и временного распределений природно-техногенной сейсмичности, изучения микросейсмического фона, характерных особенностей волновых форм промышленных



**Рис. 1.** Конфигурация сейсмической сети ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в 2023 г. и пространственное распределение локальных сейсмических событий, зарегистрированных временными сейсмическими станциями на Полярном Урале. Синие эпицентры — шахтные динамические явления, красные — карьерные взрывы, оранжевые — события неизвестной природы

**Fig. 1.** Configuration of the seismic network of the IG FRC Komi SC UB RAS in 2023 and the spatial distribution of local seismic events recorded by temporary seismic stations in the Polar Urals. Blue epicenters are mine dynamic phenomena, red ones are quarry explosions, orange ones are events of unknown origin

взрывов на карьерах и горно-динамических явлений на угольных шахтах Воркутинского углепромышленного района. Подобные кратковременные наблюдения проводились в 2021 г. и на Приполярном Урале и были предваряющими для установки стационарной сейсмической станции в Инте (Носкова, Попов, 2021; Носкова и др., 2023).

Помимо Урала в различных регионах России — на Кольском полуострове, в Кузбассе, Алтае-Саянском регионе, Якутии — интенсивная разработка месторождений полезных ископаемых вызывает активизацию локальной сейсмичности (Адушкин, Турунтаев, 2015; Виноградов и др., 2016; Гриб и др., 2021; Еманов и др., 2014; 2015; 2020). Сейсмически активными могут быть как горный массив в районе выработок (подземных или открытых), так и отвалы горных масс (Еманов и др., 2020). Комплексное воздействие (подземные работы, карьеры, отвалы, массовые взрывы и т. д.) горных работ ведет к расширению области сейсмической активности, перестройке её зонального распределения в «старых» горнодобывающих регионах и в целом к повышению сейсмичности, вплоть до появления землетрясений большой магнитуды (Яковлев и др., 2023). Землетрясения 2012 и 2015 гг. на Полярном и Приполярном Урале (Носкова, 2016) это подтверждают. Техногенное воздействие вызывает множество новых форм сейсмических явлений, прежде всего ровых мелкофокусных землетрясений низкой магнитуды, которые возможно регистрировать лишь на близких расстояниях. Поэтому важно обследовать данную территорию на возможное возникновение подобных событий.

Существенной проблемой для решения задач сейсмологического мониторинга является также распознавание природы сейсмических событий. Слабая сейсмичность, нестабильная работа сейсмических станций ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, их удаленность друг от друга и высокий уровень сейсмического шума в местах установки сейсмостанций не позволили накопить статистику для решения данного вопроса. Лишь комплексное изучение волновых форм сейсмических событий, происходящих на действующих карьерах и рудниках на близких расстояниях, дает возможность с большей точностью выполнять идентификацию регистрируе-

мых событий, разрабатывать и совершенствовать методики различения характерных особенностей волновых форм промышленных взрывов и горных ударов, составлять качественные каталоги землетрясений, что в конечном счёте существенным образом влияет на правильность оценок сейсмической опасности территории исследования.

## Методы исследования

Сейсмические наблюдения проводились трёхкомпонентным широкополосным сейсмометром Trillium Compact Posthole TC120-PH2 и цифровым регистратором Centaur CTR4-3S (Nanometrics Inc., Canada). Определение параметров гипоцентров выполнялось методом минимизации невязок в программах комплексов WSG (Красилов и др., 2006; Свидетельство..., 2020) и LOS (Асминг и др., 2021), с использованием скоростной модели для Восточно-Европейской платформы (Schueller et al., 1997), дополненной глубокими слоями модели AK-135 (Kennett et al., 1995).

Для расчёта локальной магнитуды  $M_L$  и магнитуды по поверхностным волнам  $M_s$  с использованием пакета программ WSG применялись способы, основанные на осредненной по Северной Евразии калибровочной функции (Габсатарова, 2006) и рекомендаций (Габсатарова, 2011) соответственно.

Замеры микросейсмического фона, расчет спектра мощности и его суточный ход выполнялись в программе Р. А. Дягилева *MicroNoise V 1.3.1* (Дягилев, 2013) по спектрам мощности сейсмических шумов с применением спектральной оценки Бартлетта. Методика исследования подробно описана в статье (Маловичко и др., 2020).

## Полевые наблюдения

Полевые работы проводились в 3 этапа:

I. На карьере по добыче щебня и бутового камня «Юнь-Ягинский», на 7 км юго-восточнее г. Воркуты. Код станции POLU1, координаты местоположения: 67.4268 N, 64.1251 E, альтитуда  $h = 277$  м.

II. На южной периклинали массива Енганепэ, в истоках руч. Левый Изъявож (приток р. Изъявож) (рис. 2).



Рис. 2. Расположение временного пункта сейсмических наблюдений POLU2

Fig. 2. Location of the temporary seismic observation point POLU2



Рис. 3. Временный пункт сейсмических наблюдений POLU3

Fig. 3. Temporary seismic observation point POLU3

Код станции POLU2, координаты: 67.1962 N, 64.4867 E,  $h = 247$  м. Оборудование располагалось на метабазальтах бедамельской серии ( $R_3$ ).

III. В южной части хр. Нияхой, руч. Нияшор (правый приток р. Нияю), около 700 м от устья (рис. 3). Код станции POLU3, местоположение: 67.2898 N, 65.1114 E,  $h = 238$  м. Сеймостанция была установлена на туфо-песчаниках бедамельской свиты ( $R_3$ ).

### Микросейсмические данные

В программе MicroNoise v 1.3.1 были рассчитаны средние уровни микросейсмических шумов по уровню медианного среднесуточного спектра мощности скорости смещений на вертикальной компоненте.

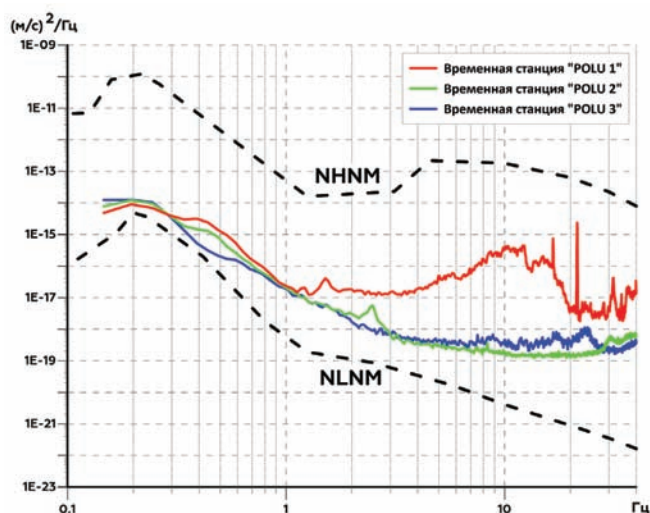


Рис. 4. Осредненные за сутки спектры мощности скорости смещений микросейсмического шума для временных пунктов наблюдений на Полярном Урале

Fig. 4. Averaged daily power spectra of microseismic noise displacement velocity for temporary observation points in the Polar Urals

Сейсмические записи временных пунктов наблюдений характеризуются низким и средним уровнями микросейсмических шумов (рис. 4) в сравнении с новой моделью шумов Петерсона (Peterson, 1993).

Станция, расположенная на территории месторождения известняка карьера «Юнь-Яга» (POLU1), характеризуется повышенным уровнем микросейсмических шумов в сравнении с двумя другими полевыми пунктами наблюдений. Повышение уровня шума в диапазоне частот от 6 Гц определяется круглосуточной техногенной деятельностью на карьере. В интервале до 5 Гц спектральная плотность микросейсмических шумов на всех трёх этапах наблюдений низкая и тяготеет к нижней границе модели Петерсона. При этом низкочастотная составляющая микросейсмического шума на пунктах наблюдения «Енганепэ» (POLU2) и «Нияхой» (POLU3) выше, что обусловлено ветровой нагрузкой в горной части исследований.

Таким образом, сейсмологические наблюдения в горной части хр. Енганепэ и Нияхой показали минимальный уровень техногенных помех, основная внешняя помеха — метеорологическая (ветер, дождь). В то же время наблюдения на известняковом карьере «Юнь-Яга» рядом с городом, наоборот, демонстрируют преобладание высокочастотной техногенной составляющей и отсутствие помех, вызванных атмосферными процессами. Но даже такой уровень фонового микросейсмического шума является приемлемым для локальных и региональных сейсмологических наблюдений.

### Инструментальная обработка

В подавляющем большинстве (95 %) инструментальная обработка сейсмических данных проводилась по одиночной трехкомпонентной станции «Полярный Урал» (POLU) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Для нескольких сейсмических событий привлекались волновые формы станций: «Инта» (IN0) ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО

РАН, «Амдерма» (AMDE1) Архангельской сейсмической сети (код сети АН, <https://doi.org/10.7914/SN/АН>) и «Бованенково» (BVNN) ФИЦ ЕГС РАН. Для сейсмического события 1 августа 2023 г. (Носкова и др., 2024) в обработку также были включены данные сейсмической станции «Добрянка» (PR2R) ГИ УрО РАН (г. Пермь). Одностанционная локация эпицентров сейсмических событий проводилась в программе LOS (Асминг и др., 2021) по разнице времен вступления фаз Р- и S-волн и обратному азимуту на источник.

Всего в результирующий каталог вошли 107 локальных сейсмических событий с энергетическим классом по Т. Г. Раутиан  $K_p = 3.8$ –8.9 и магнитудой  $M_L$  от  $-0.2$  до 2.8, при этом уровень представительной магнитуды составляет  $M_L \geq 0.8$  (рис. 9). Пространственное распределение сейсмических событий показано на рис. 1. Они в основном сосредоточены вокруг г. Воркуты и, соответственно, шахтных полей. Изучение горнодобывающей активности, а также анализ волновой картины позволили нам отнести большинство событий к динамическим явлениям на угольных шахтах. Таким образом, 78 событий — это горные, горно-тектонические удары и другие динамические явления на шахтах Воркутского угленосного района, 21 явление неизвестной природы и 8 взрывов на угольном разрезе «Юнъягинский» (рис. 5).

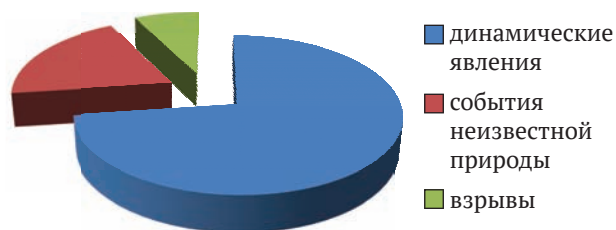


Рис. 5. Распределение локальных сейсмических событий Полярного Урала по типу

Fig. 5. Distribution of local seismic events in the Polar Urals by type

Самым заметным сейсмическим событием был горно-тектонический удар 1 августа 2023 г. (рис. 6), имевший макросейсмический эффект (Носкова и др., 2024). Временная сейсмическая станция POLU2 ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, работавшая на тот момент на массиве Енганепэ, первая зафиксировала данное событие. Жители нескольких районов г. Воркуты почувствовали толчки, похожие на землетрясение, и были обеспокоены, обращались в региональные управления. По поступившему запросу ГУ МЧС России по Республике Коми нами были переданы оперативно рассчитанные параметры эпицентра и предварительная интерпретация природы события. Инструментальный эпицентр события, по нашим расчётам, был расположен в пределах шахтного поля шахты «Воркутинская». Макросейсмическая интенсивность, рассчитанная в соответствии со шкалой ШСИ-2017 по 57 анкетам и 163 определениям категорий-сенсоров, составила  $I_0 = 4.73 \pm 0.02$ . Рассчитанное значение макросейсмической глубины очага составило  $H = 0.5 \pm 0.4$  км, что соответствует инструментальному определению и диапазону глу-

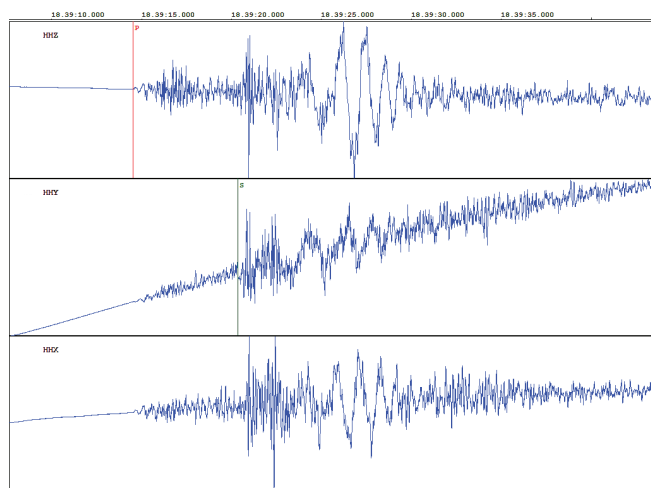


Рис. 6. Волновые формы временной сейсмической станции POLU2 горно-тектонического удара на шахте «Воркутинская» 1 августа 2023 г.,  $t_0 = 18:39$  (UTC),  $M_L = 2.8$

Fig. 6. Wave forms from temporary seismic station POLU2 of rock burst at the Vorkutinskaya mine on August 1, 2023,  $t_0 = 18:39$  (UTC),  $M_L = 2.8$

бин горных выработок Воркутского угольного месторождения (Носкова и др., 2024).

Анализ сейсмических записей различных событий показал особенности волновых форм. Для взрывов характерна интенсивная Р-волна, отсутствие S-волн и ярко выраженные поверхностные волны Лява и Релея (рис. 7), в то время как для горных и горно-тектонических ударов волновая картина схожа с землетрясением: наличие Р-волны, интенсивной S-волны, и далее в большинстве случаев выделяется поверхностная волна Релея. Примеры записей горно-тектонического и горного ударов на угольных шахтах показаны на рис. 6 и 8.

Было выявлено, что станцией «Инта» регистрируется лишь малая часть событий. Из 107 сейсмических событий зарегистрировано лишь 5. Это обусловлено тем, что подавляющая часть техногенных событий име-

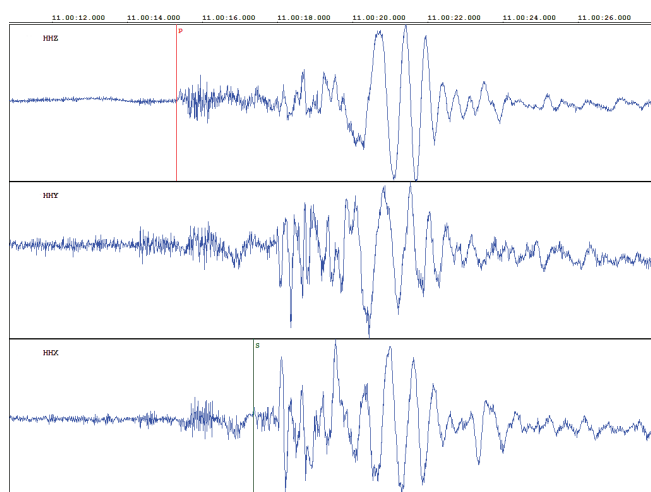
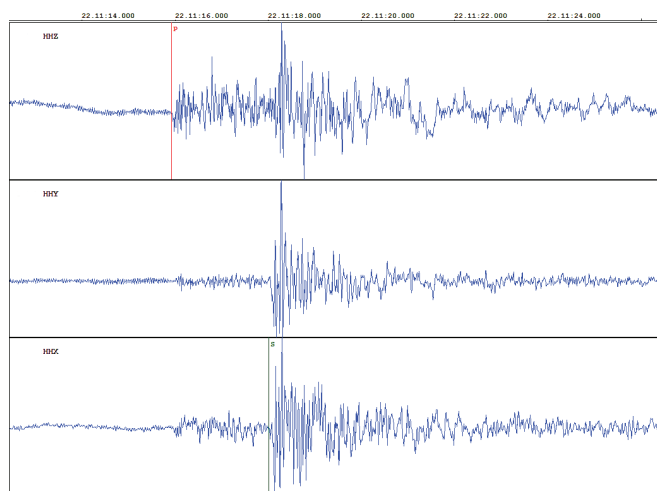


Рис. 7. Сейсмическая запись взрыва на угольном разрезе «Юнъягинский» 22 июля 2023 г.,  $t_0 = 11:00$  (UTC)

Fig. 7. Seismic recording of the explosion at the Yunyaginsky coal mine on July 22, 2023,  $t_0 = 11:00$  (UTC)



**Рис. 8.** Сейсмограмма динамического явления в пределах шахтного поля «Заполярная» 20 июля 2023 г.,  $t_0 = 22:11$  (UTC)

**Fig. 8.** Seismogram of a dynamic phenomenon within the mine field of the Zapolyarnaya mine on July 20, 2023,  $t_0 = 22:11$  (UTC)

ет малую магнитуду ( $ML < 1$ ), и на региональных расстояниях они не фиксируются. Стационарной станцией «Инта» возможна регистрация сейсмических событий с  $ML \geq 2.0$ . Для проведения полноценного сейсмологического мониторинга Воркутинского углепромышленного района с использованием региональной сети также необходима стационарная сейсмическая станция вблизи шахтных полей.

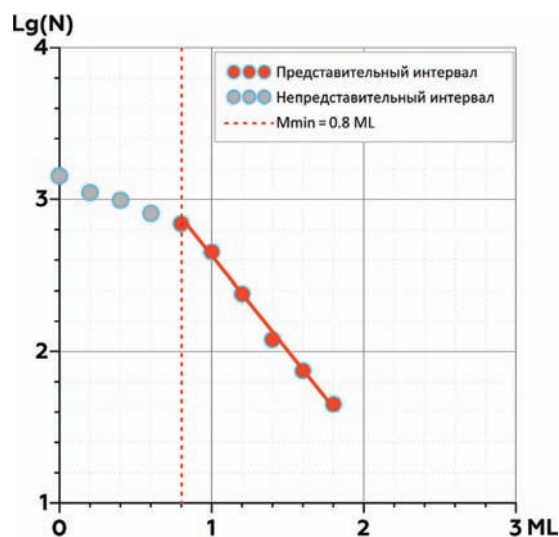
### График повторяемости

Одним из основных параметров, характеризующих особенности сейсмического процесса, является закон (или график) повторяемости землетрясений, отражающий фрактальные свойства сейсмической активности. График повторяемости землетрясений характеризует распределение количества сейсмических событий по энергии. Он имеет линейное соотношение и обычно записывается в виде закона Гутенберга — Рихтера (Gutenberg, Richter, 1954) в интегральной форме:

$$LgN = a - bM, \quad (1)$$

где  $N$  — количество событий с магнитудой  $M$  и более,  $a$  и  $b$  — эмпирически определяемые коэффициенты.

Сейсмическая активность  $a$  и наклон графика  $b$  являются одними из основных количественных параметров сейсмического режима. Таким образом, график повторяемости землетрясений в интегральном виде даёт информацию о параметрах процессов разрушения и свойствах геологической среды. Важную роль играет минимальная магнитуда  $M_{min}$  — перегиб графика повторяемости (рис. 9) — соответствующая уровню надёжной регистрации сейсмических событий. Рассматривая более слабые землетрясения с  $M < M_{min}$ , т. е. за пределом линейного участка графика повторяемости, можно получить неверные результаты. Расчет значений  $a$  и  $b$  производится только на линейном отрезке графика повторяемости, называемом представительным интервалом.



**Рис. 9.** График повторяемости сейсмических событий для временных наблюдений на Полярном Урале в 2023 г.

**Fig. 9.** Graph of seismic event recurrence for time observations in the Polar Urals in 2023

Уровень графика  $a$ -value отражает собственно сейсмическую активность — суммарную интенсивность сейсмических проявлений, как правило нормированную на временной промежуток, равный одному году. Наклон графика повторяемости  $b$ -value в физическом смысле показывает отношение между числом слабых и сильных сейсмических событий и соотношением между количеством больших и малых разрывов в геологической среде.

Для Уральского региона (Уломов, 2012), по данным инструментальных наблюдений, Уральской региональной сейсмологической сетью за более чем 20-летний период в широком интервале представительных магнитуд ( $2.0 \div 5.5$ ) получен закон повторяемости землетрясений (Верхоланцев, Голубева, 2022):

$$LgN = 2.15 - 0.69ML. \quad (2)$$

На рис. 9 представлен график повторяемости землетрясений, построенный для сейсмических событий, зарегистрированных в период временных наблюдений на Полярном Урале, которые были классифицированы как горные и горно-тектонические удары. События неизвестной природы и промышленные взрывы исключены из выборки. Горные и горно-тектонические удары — это события той же природы, что и техногенные землетрясения, и отличаются только выделенной сейсмической энергией, напрямую связанной с размером очага (Макаров, 2006; Адушкин, Турунтаев, 2015).

В каталоге событий, по которому был получен закон повторяемости, присутствует уже упомянутое в работе событие 1 августа 2023 г. (18:39 UTC) с  $ML = 2.8$  и макросейсмическими проявлениями в г. Воркуте с  $I_0 = 4.73 \pm 0.02$ . Данное событие можно классифицировать как техногенное землетрясение, но в силу малого периода наблюдений оно является непредставительным по магнитуде справа для расчета закона повторяемости.

В публикациях (Беляева и др., 2009; Адушкин, Турунтаев, 2015) приведены графики повторяемости

для техногенной сейсмичности на шахтах Воркутского угольного месторождения в энергетической форме по данным локальных шахтных сейсмологических сетей, где указан минимальный представительный энергетический класс  $Kp = 4$ , что соответствует  $ML = 0$ , а на самом графике справа события ограничены  $K = 8$ , что соответствует  $ML = 2.5$ . Таким образом, в данном примере закон повторяемости рассчитан для техногенных событий со значительно меньшей представительной магнитудой, а максимальная магнитуда ниже, чем представлено в нашем каталоге. По сути, все события являются горными и горно-тектоническими ударами, собственно техногенных землетрясений среди них нет.

В аналитическом виде для данного графика повторяемости можно записать следующее уравнение:

$$LgN = 3.88 - 1.25ML. \quad (3)$$

Среднеквадратическая ошибка определения коэффициентов  $a$  и  $b$  рассчитывалась по формулам (Кулдорф, 1966):

$$\sigma_a = \frac{a}{\sqrt{N_a}}; \quad (4)$$

$$\sigma_b = \frac{a}{\sqrt{N_a}}. \quad (5)$$

Таким образом, для уравнения 2 (временные наблюдения на Полярном Урале) значения коэффициентов составляют:  $a = 3.88 \pm 0.71$ ,  $b = 1.25 \pm 0.23$ , а для уравнения 1 (Уральский регион):  $a = 2.15 \pm 0.18$ ,  $b = 0.69 \pm 0.08$ . Видно, что величины коэффициента  $b$ -value для приведенных законов повторяемости землетрясений статистически значимо различаются между собой. Коэффициент  $b$ -value из уравнения 1 соответствует естественной природной сейсмичности для платформенных территорий, в то же время значение  $b$ -value из уравнения 2 характерно для техногенной сейсмичности, вызванной горными работами (Адушкин, Турунтаев, 2015). Значение  $b$ -value, приведенное в указанной работе, составляет 1.17, что близко к значению 1.25, полученному нами.

В качестве примера сходного (техногенного) сейсмического процесса в близкой геологической обстановке можно привести закон повторяемости для техногенных землетрясений, зарегистрированных за 20-летний период станциями Уральской сейсмологической сети в пределах Североуральского бокситового месторождения:

$$LgN = 3.92 - 1.15ML \quad (6)$$

при ошибке определения коэффициентов:  $a = 3.92 \pm 0.25$ ,  $b = 1.15 \pm 0.07$ .

Исходя из законов повторяемости землетрясений, представленных уравнениями 2 и 6, можно уверенно утверждать, что во время локальных наблюдений на Полярном Урале регистрировалась именно техногенная сейсмичность в пределах Воркутинского углепромышленного района.

## Выводы

С открытием сейсмической станции «Инта» ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН появилась возможность вести мо-

нитинг техногенной сейсмичности на территории Республики Коми. Станцией за 2023 г. было зарегистрировано 25 техногенных сейсмических событий вблизи г. Воркуты (Носкова и др., 2023). Для выяснения реальной сейсмической обстановки на территории Воркутинского горнодобывающего района и протекающих здесь горно-динамических процессов были организованы экспедиционные сейсмологические работы летом 2023 г. на Полярном Урале.

Полевые работы проводились на известняковом карьере «Юнь-Яга» в южной периклинали массива Енганепэ и южной части хр. Нияхой. Для каждого временного пункта наблюдений были рассчитаны средние уровни микросейсмических шумов. Сейсмические записи характеризуются низким и средним уровнями микросейсмических шумов в сравнении с новой моделью шумов Петерсона. Сейсмологические наблюдения в горной части хр. Енганепэ и Нияхой показали минимальный уровень техногенных помех, основная внешняя помеха — метеорологическая. Наблюдения на карьере, наоборот, демонстрируют преобладание высокочастотной техногенной составляющей.

За время полевых наблюдений зарегистрировано 107 локальных сейсмических событий с энергетическим классом по Т. Г. Раутиан  $Kp = 3.8$ – $8.9$  и магнитудой  $ML$  от  $-0.2$  до  $2.8$ , уровень представительной магнитуды  $0.8$ . Большинство событий произошло в пределах шахтных полей. Изучение горнодобывающей активности, а также анализ волновой картины позволили нам выявить отличия волновых форм шахтных динамических явлений и взрывов и установить природу сейсмических событий. Таким образом, 78 событий являются горными, горно-тектоническими ударами и другими динамическими явлениями на шахтах Воркутского угленосного района, 21 — событиями неизвестной природы и 8 — взрывами на угольном разрезе «Юнгинский». Самым заметным сейсмическим событием был горно-тектонический удар 1 августа 2023 г., имеющий макросейсмические проявления в г. Воркуте ( $I_0 = 4.73 \pm 0.02$ ).

По данным временных сейсмических наблюдений, на региональных расстояниях, закон повторяемости для техногенной сейсмичности Воркутинского углепромышленного района получен впервые. Он однозначно показывает, что зарегистрированные временными наблюдениями сейсмические события характеризуют техногенную сейсмичность в пределах рассматриваемого района. В то же время установлено, что стационарная региональная сейсмическая станция «Инта» регистрирует лишь малую часть данных событий. Это обусловлено тем, что магнитуда большинства техногенных событий меньше единицы и на региональных расстояниях они не регистрируются. Таким образом, по данным только этой одной станции невозможно детально изучать и дифференцировать сейсмические процессы в пределах Полярного Урала. Проведенный сейсмологический мониторинг Воркутинского углепромышленного района показал необходимость установки стационарной сейсмической станции в г. Воркуте, что и было сделано спустя год, в июне 2024 г.

Выражаем искреннюю благодарность коллегам лаборатории региональной геологии и директору Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН И. Н. Бурцеву



за поддержку и проведение полевых работ сезона 2023 г. (геологический отряд № 4), а также рецензентам статьи за конструктивные замечания.

Исследования проводились в рамках государственных заданий ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН ГР № 122040600012-2 и ГИ УрО РАН ГР № 124020500029-1.

## Литература / References

- Адушкин В. В., Турунтаев С. В. Техногенная сейсмичность — индуцированная и триггерная. М.: ИДГ РАН, 2015. 364 с.  
Adushkin V. V., Turuntaev S. B. Technogenic Seismicity: Induced and Triggered, Moscow: IDG RAS, 2015. (in Russian)
- Асминг В. Э., Федоров А. В., Прокудина А. В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 1. С. 27—40. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.02  
Asming V. E., Fedorov A. V., Prokudina A. V. LOS software for interactive seismic and infrasonic data processing. Russian Journal of Seismology, 2021, V. 3(1), pp. 27—40. (in Russian)
- Беляева Л. И., Гончаров А. И., Иванов Н. В., Куликов В. И. Возможные катастрофические геодинамические явления в Воркутинском угольном бассейне // Проблемы взаимодействующих геосфер. М.: ГЕОС, 2009. С. 155—162.  
Belyaeva L. I., Goncharov A. I., Ivanov N. V., Kulikov V. I., The probable catastrophic events in the Vorkuta coal basin. Problems of Interactions between the Geospheres. Moscow: GEOS, 2009, pp. 155—163. (in Russian)
- Верхоланцев Ф. Г., Голубева И. В. Сейсмичность Уральского региона за период с 2002 по 2022 г. по данным инструментальных наблюдений уральской сейсмологической сетью // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Тезисы XVI Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А. А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. С. 28.  
Verkholtantsev, F. G., and Golubeva, I. V., Seismicity of the Ural region for the period from 2002 to 2022. According to instrumental observations of the Ural seismological network. Modern Methods of Processing and Interpreting Seismological Data: Proceedings of the Seventh International Seismological Workshop. Obninsk: GS RAS, 2022, p. 28. (in Russian)
- Виноградов Ю. А., Асминг В. Э., Кременецкая Е. О., Жиров Д. В. Современная сейсмичность на территории Мурманской области и её проявление в горнопромышленных зонах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 1. С. 62—70.  
Vinogradov Y. A., Asming V. E., Kremenetskaya E. O., Zhiron D. V. Modern seismicity in mining areas in the Murmansk Region. J Min Sci 52, 2016, pp. 46—52. doi.org/10.1134/S1062739116010113
- Габсатарова И. П. Внедрение в рутинную практику подразделений Геофизической службы РАН процедуры вычисления локальной магнитуды // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 49—53.  
Gabsatarova I. P. Introduction to procedures for calculating the local magnitude into the routine practice of departments of the Geophysical Survey of the RAS. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials from International seismological school. Obninsk, GS RAS, 2006, pp. 49—53. (in Russian)
- Габсатарова И. П. Определение магнитуды MLV по поверхностным волнам региональных событий Кольского полуострова // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2011. С. 107—113.  
Gabsatarova I. P. Determination of MLV magnitude from surface waves of regional events of the Kola Peninsula. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Proc. of the 6th International Seismological Workshop. Obninsk: GS RAS, 2011, pp. 107—113. (in Russian)
- Гриб Н. Н., Гриб Г. В., Качаев А. В., Малинин Ю. А., Мельников А. Е. Изменение уровня сейсмической активности в Южной Якутии под воздействием промышленных взрывов // Тенденции развития науки и образования. № 71-1. 2021. С. 117—123. doi: 10.18411/lj-03-2021-26  
Grib N. N., Grib G. V., Kachaev A. V., Malinin Y., & Mel'nikov A. E. Change in the level of seismic activity in South Yakutia under the influence of industrial explosions, Trends in the Development of Science and Education. No. 71-1, 2021, pp. 117—123. (in Russian)
- Дягилев Р. А. MicroNoise, версия 1.3: Руководство пользователя / ФИЦ ЕГС РАН. Обнинск, 2013. 39 с.  
Dyagilev R. A. MicroNoise, version 1.3: User's manual. GS RAS. Obninsk, 2013, 39 p.
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г. Техногенная сейсмичность разрезов Кузбасса (Бачатское землетрясение 18 июня 2013 г.) // ФТПРПИ. 2014. № 2. С. 224—228. doi: 10.18411/lj-03-2021-26  
Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Leskova E. V., Shevkunova E. V., Pdkorytova V. G. Mining-induced seismicity at open pit mines in Kuzbass (Bachatsky earthquake on June 18, 2013). J. Min. Sci. 50, 2014, pp. 224—228. (in Russian)
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Лескова Е. В., Корабельщиков Д. Г., Дураченко А. В. Система мониторинга наведенной сейсмичности Кузбасса и триггерные эффекты в развитии сейсмического процесса // Триггерные эффекты в геосистемах: материалы III Всерос. семинара-совещания. М.: Изд-во ГЕОС, 2015. С. 190—199.  
Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Leskova E. V., Korabelschikov D. G., Durachenko A. V. Kuzbass induced seismicity monitoring system and trigger effects in the development of the seismic process. Proc. of the All-Russian seminar-meeting "Trigger effects in geosystems", Moscow: GEOS, 2015, pp. 190—199. (in Russian)
- Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В., Шевкунова Е. В., Подкорытова В. Г., Куприш О. В. Наведённая сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2, № 3. С. 88—96. DOI: https://doi.org/10.35540/26867907.2020.3.08  
Emanov A. F., Emanov A. A., Fateev A. V., Shevkunova E. V., Podkorytova V. G., Kuprish O. V. Induced seismicity in

- coal and iron ore regions of Kuzbass. Russian Journal of Seismology, 2(3), 2020, pp. 88—96. (in Russian)
- Красилов С. А., Коломиец М. В., Акимов А. П. Организация процесса обработки цифровых сейсмических данных с использованием программного комплекса WSG // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы междунар. сейсмолог. школы, посвящ. 100-летию открытия сейсмических станций «Пулково» и «Екатеринбург». Обнинск: ГС РАН, 2006. С. 77—83.
- Krasilov S. A., Kolomiets M. V., Akimov A. P. Organization of digital seismic data processing using the WSG software package. Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the Seismological Workshop. Obninsk: GS RAS, 2006, pp. 77—83. (in Russian)
- Кулльдорф Г. Вопросы теории оценивания. М.: Наука, 1966. 176 с.
- Kulldorff G. Questions of the Theory of Evaluation. Moscow: Nauka, 1966, 176 p. (in Russian)
- Макаров А. Б. Практическая геомеханика: Пособие для горных инженеров. М.: Горная книга, 2006. 391 с.
- Makarov A. B. Practical Geomechanics: Manual for Mining Engineers. Moscow: Gornaya kniga, 2006, 391 p. (in Russian)
- Маловичко А. А., Габсатарова И. П., Дягилев Р. А., Мехрюшев Д. Ю., Зверева А. С. Оценка регистрационных возможностей сейсмической сети в западной части Северного Кавказа через геометрию сети и локальный уровень микросейсмических шумов // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56. № 3. С. 35—60. <https://doi.org/10.21455/si2020.3-3>
- Malovichko A. A., Gabsatarova I. P., Dyagilev R. A., Mekhryushev D. Yu., Zvereva A. S., Evaluation of detection and location capability of the seismic network in the western part of the North Caucasus using network layout and local microseismic noise level. Seismic instruments, 2020, V. 56, No. 3, pp. 35—60. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Новые данные о сейсмичности северной части Урала // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3 (255). С. 3—12. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-3-3-12
- Noskova N. N. New data on northern Urals seismicity. Vestnik IG Komi SC UB RAS, March, 2016, No. 3 (255), pp. 3—12. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Сейсмические события в Печорском угольном бассейне в 2016 году // Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления: Материалы Всеросс. науч. конф. с междунар. участием. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017. С. 133—135.
- Noskova N. N. Seismic Events in the Pechora Coal Basin in 2016, Geodynamics, Lithology and Ore Genesis in the East European Platform and Folded Periphery. Proc. All-Russ. Conf. with Int. Participation. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2017, pp. 133—135. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Землетрясение 5 сентября 2019 года в Сосногорском районе Республики Коми // Известия Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 4 (40). С. 45—49. DOI 10.19110/1994-5655-2019-4-45-49
- Noskova N. N. Earthquake on September 5, 2019 in the Sosnogorsk region of the Komi Republic. Proc. SC UB RAS, 2019, No. 4 (40), pp. 45—49. (in Russian)
- Носкова Н. Н. Сейсмическое событие 9 апреля 2024 г. в Сосногорском районе Республики Коми // III Юдахинские чтения: Сб. науч. материалов Всеросс. конф. с междунар. участием, 25—28 июня 2024, г. Архангельск / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. отд.-ние Рос. акад. наук, Федер. исслед. центр комплекс. изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова УрО РАН и др.; отв. ред.: К. В. Лобанов, И. Н. Болотов. Архангельск: КИРА, 2024. С. 432—436.
- Noskova N. N. Seismic event on April 9, 2024 in the Sosnogorsk region of the Komi Republic. "III Yudakhin Readings": All-Russian conference with international participation, June 25—28, 2024, Arkhangelsk. Eds.: K. V. Lobanov, I. N. Bolotov. Arkhangelsk: KIRA, 2024, pp. 432—436. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Асминг В. Э. Уточнение параметров ряда сейсмических событий, произошедших в Воркутинском районе Республики Коми в 1971—2016 гг. // Геофизический журнал. 2018. Т. 19. № 4. С. 46—63. <https://doi.org/10.21455/gr2018.4-4>
- Noskova N. N., Asming V. E. Update of parameters of some seismic events in the Vorkuta area within 1971—2016. Geophysical Journal, 2018, V. 19, No. 4, pp. 46—63. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Асминг В. Э., Федоров А. В. Сейсмическое событие на шахте «Комсомольская» 25 января 2018 г. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 4. С. 21—27. DOI: 10.15372/FTPRP120180403
- Noskova N. N., Asming V. E., Fedorov A. V. Seismic Event in the Komsomolskaya Mine on the 25th of January, 2018. J Min Sci, 54, 2018, pp. 550—555. <https://doi.org/10.1134/S1062739118043990>
- Носкова Н. Н., Попов И. В. Кратковременные сейсмические наблюдения на Приполярном Урале в 2021 году // Вестник геонаук. 2021. 12(324). С. 46—51. DOI: 10.19110/geov.2021.12.5
- Noskova N. N., Popov I. V. Short-term seismic observations in the Subpolar Urals in 2021. Vestnik of Geosciences, 2021, 12(324), pp. 46—51. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Попов И. В., Машин Д. О. Новый пункт сейсмических наблюдений на территории Республики Коми // Геофизические исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 52—68. <https://doi.org/10.21455/gr2023.3-3>
- Noskova N. N., Popov I. V., Mashin D. O. New seismic observation point on the territory of the Komi Republic. Geophysical Research, 2023, V. 24, No. 3, pp. 52—68. (in Russian)
- Носкова Н. Н., Верхоланцев Ф. Г., Асминг В. Э., Ваганова Н. В., Попов И. В. Сейсмические события в Воркутском углепромышленном районе в 2023 году // Вестник геонаук. 2024. 1 (349). С. 34—42. DOI: 10.19110/geov.2024.1.4
- Noskova N. N., Verkholantsev F. G., Asming V. E., Vaganova N. V., Popov I. V. Seismic events in the Vorkuta coal industrial district in 2023. Vestnik of Geosciences, 2024, 1 (349), pp. 34—42. (in Russian)
- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664678 «Программный комплекс WSG «Система обработки сейсмических данных»/ФГБУН ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» (RU); А. П. Акимов, С. А. Красилов. Заявка № 2020663791; заявлено 10.11.2020; дата гос. регистрации 16.11.2020.



- Certificate of state registration of computer program No. 2020664678 "WSG software package "Seismic data processing system". FRC "UGS RAS" (RU); A. P. Akimov, S. A. Krasilov. Application No. 2020663791; filed 11/10/2020; state registration date 11/16/2020.
- Уломов В. И. Актуализация нормативного сейсмического районирования в составе единой информационной системы «Сейсмобезопасность России» // Вопросы инженерной сейсмологии. 2012. Т. 39. № 1. С. 5—38.
- Ulomov V. Updating normative seismic zoning in the integrated information system «Seismic safety of Russia», 2012, V. 39, No. 1, pp. 5—38. (in Russian)
- Яковлев Д. В., Лазаревич Т. И., Бондарев А. В. Исследование геодинамических рисков масштабного освоения Кузбасса // Горная промышленность. 2023. (S1). С. 48—54. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2023-S1-48-54>
- Yakovlev D. V., Lazarevich T. I., Bondarev A. V. Study of geodynamic risks of large-scale mining in Kuzbass. Russian Mining Industry. 2023; (1 Suppl.): 48—54. (in Russian)
- Gutenberg B., Richter C. F. Seismicity of the Earth and associated phenomena. Princeton Univ. Press, Princeton, 1954. 310 p.
- Kennett B. L. N., Engdahl E. R., Buland R. Constraints on seismic velocities in the Earth from travel times // Geophysical Journal International. 1995. No. 122. P. 108—124.
- Peterson J., Observations and modeling of seismic background noise. Open-File Report 93-322, Albuguergue, New Mexico, U.S. Geological Survey, 1993, 95 p.
- Schueller W., Morozov I. B., Smithson S. B. Crustal and uppermost mantle velocity structure of northern Eurasia along the profile Quartz, Bulletin of the Seismological Society of America, 1997. No. 87. P. 414—426.

Поступила в редакцию / Received 17.01.2025



## Вильгельм Оствальд. Творец физической химии

А. М. Асхабов

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*askhabov@geo.komisc.ru*

Очерк посвящен выдающемуся российско-немецкому физхимику Вильгельму Оствальду, лауреату Нобелевской премии по химии 1909 г. Кратко рассмотрена его научно-организационная деятельность, которая началась в Дерптском университете, продолжилась в Рижском политехникуме и наиболее плодотворно происходила в Лейпцигском физико-химическом институте. С именем Оствальда связан переворот в химии, который произошел на рубеже XIX и XX столетий. Особое внимание уделено его всемирно известной научной школе и её урокам. Обсуждается удивлявшее современников отрицание Оствальдом атомов как материальных объектов. Рассмотрено также распространенное в кристаллогенезисе явление «оствальдова созревания» – укрупнения кристаллов в полидисперсной системе.

**Ключевые слова:** Вильгельм Оствальд, становление физической химии, научная школа Оствальда, антиатомизм, энергетизм, оствальдово созревание кристаллов, Дерптский университет, Рижский политехникум, Лейпцигский университет

## Wilhelm Ostwald. The Creator of Physical Chemistry

A. M. Askhabov

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

The essay is dedicated to the outstanding Russian-German physical chemist Wilhelm Ostwald, Nobel Prize Laureate in Chemistry in 1909. His scientific and organizational activities, which began at the University of Dorpat, continued at the Riga Polytechnic, and were most fruitful at the Leipzig Physicochemical Institute, are briefly reviewed. Ostwald's name is associated with the revolution in chemistry that occurred at the turn of the 19th and 20th centuries. Particular attention is paid to his world-famous scientific school and its lessons. Ostwald's denial of atoms as material objects, which surprised his contemporaries, is discussed. The phenomenon of «Ostwald ripening» – the enlargement of crystals in a polydisperse system – which is widespread in crystallogenesis, is also discussed.

**Keywords:** Wilhelm Ostwald, the formation of physical chemistry, Ostwald's scientific school, antiatomism, energetics, Ostwald ripening of crystals, University of Dorpat, Riga Polytechnic, Leipzig University

### Введение

Мы продолжаем серию очерков, посвященных выдающимся открытиям, знаменательным датам и людям, изменившим науку и направления её развития. Они касаются в основном близких автору областей науки: кристаллографии, минералогии, физической химии, материаловедения и нанотехнологии. В предыдущем очерке (Асхабов, 2024) речь шла о выдающемся российско-немецком ученом химике Вольфганге Оствальде и его знаменитой книге «Мир обойденных величин» (Оствальд, 1923), изменившей в начале прошлого века представления о микро- и наном мире и имевшей далеко идущие последствия для развития науки о дисперсном состоянии вещества, в том числе минерального.

После этого очерка с неизбежностью возникла необходимость рассказать о его великом отце — Вильгельме Оствальде — крупнейшем физхимике, лауреате Нобелевской премии 1909 г., авторе многочисленных книг и статей по химии, создателе большой научной школы мирового уровня. Его имя хорошо известно не только химикам, но и широкой научной общественности (не только историкам науки) главным образом благо-

даря его неоднозначным трудам по философии, а также открытому противостоянию атомно-молекулярной теории.

Составить очерк о В. Оствальде-отце было несложно. Он оставил огромное литературное наследие, много писал о своей биографии и творчестве. Его жизнь и деятельность освещена в большом числе книг, статей и воспоминаний. В русской литературе имеется довольно крупная работа, посвященная Оствальду (Родный, Соловьёв, 1969). На эту книгу и на биографические работы самого Оствальда, его переписку с коллегами автор опирался при подготовке данного очерка. В него включены также малоизвестные данные из предыдущего очерка о его сыне Вольфганге, одном из ярких представителей физико-химической школы В. Оствальда, который, несомненно, относится к числу преобразователей химии в начале XX века.

Под влиянием Оствальдов происходила трансформация химической науки, формировались физическая и коллоидная химия. Первая стала преимущественно наукой, пограничной между физикой и химией. Применение теоретических и экспериментальных методов физики для решения химических проблем — глав-

**Для цитирования:** Асхабов А. М.. Вильгельм Оствальд. Творец физической химии // Вестник геонаук. 2025. 2(362). С. 44–49. DOI: 10.19110/geov.2024.12.5

**For citation:** Askhabov A. M. Wilhelm Ostwald. The Creator of Physical Chemistry. Vestnik of Geosciences, 2025, 2(362). pp. 44–49, doi: 10.19110/geov.2024.12.5



ное в физической химии. Это было понятно ещё во времена Ломоносова, который утверждал: «Моя химия — физическая». Однако становление физической химии как науки связывают с использованием в ней термодинамики. При этом упоминают 1876 г., когда Гиббс опубликовал свой фундаментальный труд «О равновесии гетерогенных систем», который произвел огромное впечатление на В. Оствальда. Формально же годом возникновения физической химии считается 1887 г. — год выхода специального журнала «Zeitschrift für physikalische Chemie» с ключевыми статьями Оствальда, Вант-Гоффа и Аррениуса.

### Вильгельм Оствальд. Путь великого физхимика

Вильгельм Фридрих Оствальд родился в пригороде Риги 2 сентября 1853 г. Учился в гимназии с интересом. За время учебы успел освоить два языка (французский и английский). К окончанию гимназии Оствальд определился и с выбором профессии. Определяющую роль сыграла книга «Школа химии» Штекгардта. Как писал сам Оствальд, «вся моя позднейшая деятельность в области химии была заранее определена благодаря счастливой судьбе, пославшей мне в руки именно это мастерское в педагогическом отношении произведение в качестве первого руководства по химии» (Ostwald, 1953). После гимназии Оствальд поступил в Дерптский университет (на физико-математический факультет), где по традиции учились дети прибалтийских немцев. Дерпт был настоящим университетским городом. У В. Вересаева о Дерпте и его университете сказано: «Мозгом, двигающим и жизненным центром города является старинный Дерптский университет... Весь город живёт университетом и для университета» (Вересаев, 1946, с. 312).

В 1875 г. Оствальд окончил университет и остался работать у профессора А. Эттингена в лаборатории физики. Интересно, что Эттинген (1836—1920) был одним из тех физиков, которые приветствовали развитие физической химии. В 1875 г. Оствальду была присуждена степень кандидата химии, а в 1877 г. он получил уже диплом магистра. Вскоре после магистерской диссертации Оствальд защитил докторскую. В 1880 г. он перешел на работу в химический кабинет. Один из тогдашних его учителей, профессор химии К. Шмидт (1822—1894)<sup>1</sup> предсказывал, что В. Оствальд «будет звездой первой величины в пограничной области между физикой и химией, области, которую он разрабатывает с удивительной основательностью и полнотой» (Walden, 1904). Эти слова из письма, которые Шмидт написал руководству Рижского политехникума<sup>2</sup> с рекомендацией Оствальда на должность заведующего кафедрой теоретической химии. В 1882 г. в возрасте 28 лет он за-

нял место профессора политехникума в Риге. Большое влияние на формирование научного мировоззрения В. Оствальда оказал также И. Лемберг (1842—1902)<sup>3</sup>. По словам В. Оствальда, он заложил в нем «основы химического мышления и сделал способным к тем работам, в которых он смог осуществить свою долю воздействия на развитие химии...» (Ostwald, 1926, т. I, с. 99).

Оствальд быстро стал популярным лектором в политехникуме. Росло число студентов-химиков, которое в иной год достигало нескольких сотен. В Риге Оствальд продолжал работу над задуманным ещё в Дерпте учебником, первый том которого он посвятил своим учителям, профессорам Дерптского университета К. Шмидту и А. Эттингену.

За несколько лет работы в Риге В. Оствальд превратился в одного из лидеров нового направления в химии. Этому способствовали кроме собственно достигнутых им научных результатов издание фундаментального учебника по химии и успешная работа по созданию специализированного научного журнала по физической химии. В 1887 г. он получил приглашение занять кафедру химии в Лейпцигском университете. Это было почетное предложение. Лейпцигский университет был хорошо известен в Европе. В Риге у Оствальда были прекрасные условия для работы, но Лейпциг открывал новые перспективы. Германия в тот период времени находилась на подъеме, развивалась промышленность, активно поддерживалась наука и образование. Однако в самом университете отношение к «русскому» профессору из Риги не было благосклонным. Как отмечено в книге Б. Родного и Соловьева (1969), «если благожелательный “климат” Дерпта позволил молодому ученому подняться на ноги, свобода в Риге дала возможность Оствальду вырасти в крупного ученого, то в недоброжелательном “климате” Лейпцига закалился характер ученого как темпераментного борца за новое дело, как инициатора и выдающегося организатора научных исследований, замечательного педагога и воспитателя научной школы» (с. 37).



Вильгельм Оствальд (1853—1932)

Wilhelm Ostwald (1853—1932)

<sup>1</sup> Глава химической школы Дерптского университета К. Шмидт в 1873 г. был избран членом-корреспондентом Петербургской академии наук. Интересно, что его докторская диссертация была посвящена совершенствованию методов идентификации различных соединений в организме по форме их кристаллов и кинетике их роста.

<sup>2</sup> Рижский политехникум — первое политехническое заведение России, преобразованное затем в политехнический институт.

<sup>3</sup> И. Лемберг был ассистентом в лаборатории Шмидта.

Организаторский талант Оствальда быстро превратил Лейпцигскую лабораторию в центр мировой химической науки. Там с успехом работали химики со всех концов мира, многие из которых стали руководителями кафедр и лабораторий в своих странах. В лаборатории Оствальда трудились будущие лауреаты Нобелевской премии Я. Вант-Гофф и С. Аррениус<sup>4</sup>. Сам Оствальд эту высокую награду, как известно, получил позже своих соратников, в 1909 г., в возрасте 56 лет. Нобелевская премия по химии была присуждена за его исследования по катализу со следующей формулировкой: «В знак признания проделанной им работы по катализу, а также за исследования основных принципов управления химическим равновесием и скоростями реакций».

Оствальд высоко оценивал свои пионерские работы по катализу и отмечал: «Я особенно рад тому, что награда присуждена мне за катализ». К его 50-летию многим был уже очевиден его нобелевский уровень. Интересно, что за 6 лет, с 1904 по 1909 г., Оствальд был многократно номинирован на премию. При этом его выдвижение в нобилиаты исходило не только от двух его соратников, уже удостоенных премии, но и от многих других ученых, в том числе и от российских химиков П. Вальдена и И. А. Каблукова. Первым же номинатором самого Оствальда в 1910 году стал А. Эйнштейн, который был удостоен Нобелевской премии по физике лишь в 1921 г.

Весьма успешная работа физико-химической лаборатории привела Оствальда к идее о необходимости новых форм организации научных исследований. Вызрела перспективная мысль о специализированных институтах с хорошим оборудованием и квалифицированным коллективом, а также о профильных научно-технических обществах. Идея воплотилась в физико-техническом институте Оствальда в Лейпциге, торжественно открытом 3 января 1898 г. и ставшим по словам Аррениуса «действительно превосходным институтом».

Все эти годы в поле научных интересов В. Оствальда находились вопросы химического сродства, химической динамики и электрохимии. Широким фронтом продвигались экспериментальные и теоретические исследования по ряду актуальных проблем химической науки. Удивительно плодотворным было сотрудничество с С. Аррениусом — автором теории по диссоциации нейтральных веществ в растворе на положительно и отрицательно заряженные ионы. В 1888 г. Оствальд открыл закон разбавления для слабых электролитов. Среди его главных научных достижений этого периода — экспериментальное изучение и теоретическое объяснение катализа. Непосредственное практическое значение имела разработка им процесса каталитического окисления аммиака. К концу XIX века за плечами Оствальда было огромное количество книг, учебников, журнальных статей, выступлений в различных аудиториях.

К началу XX века В. Оствальд был уже всемирно признанным ученым, несомненным лидером новой химии. У научной общественности уже было осознание масштаба личности и деятельности Оствальда, его

места в истории химии. Торжественно было отмечено 25-летие защиты Оствальдом докторской диссертации. Этой дате был посвящен 45-й том журнала физической химии. В 1903 г. исполнилось 50 лет со дня рождения ученого. В 1904 г. была опубликована книга П. Вальдена<sup>5</sup> о жизни и деятельности В. Оствальда. Возрастанию авторитета Оствальда способствовала его поездка для чтения цикла лекций в США. Эти лекции стали основой для его знаменитой книги «Путеводные нити химии», изданной в 1908 г.

Огромная научная работа, деятельность по созданию института, формированию своей научной школы, руководству научными обществами, изданию журнала не остались без последствий и привели его к переутомлению. Резко стало меняться его отношение к столь привлекательной ранее профессорской работе, чтению лекций. Он стал называть себя «инвалидом в науке» и постепенно пришел к решению «уйти со сцены». В результате в 1904 г. он подал прошение об освобождении его от чтения курса лекций для студентов. Прошение было отклонено, поскольку чтение лекций считалось главной обязанностью профессора. Оствальд в 1906 г. повторно подал прошение об отставке, и, как он писал, «в августе 1906 г. я закончил свою учебную деятельность в Лейпцигском университете». И начался совершенно новый этап жизни В. Оствальда в статусе независимого ученого или «свободного» профессора, который протекал в Гроссботене на его вилле «Энергия».

Однако спокойная безмятежная жизнь на даче в кругу семьи продолжалась недолго. Он очень быстро осознал новое положение обеспеченного независимого ученого, почувствовал «все прелести свободы», появилось желание сделать ещё что-то в науке. Уже в 1906 г. он организовал на своей вилле химическую лабораторию и мастерскую, где мог проводить экспериментальные исследования. Серьезно занялся историей и философией науки. В целом предположение о том, что Оствальд «выдохся», не оправдалось, «научная смерть» не состоялась. После ухода в отставку было опубликовано более 10 книг и множество научных статей, в том числе и по новым направлениям, выходящим далеко за пределы физической химии (от создания всемирного искусственного языка до нового учения о цвете и жесткой антиклерикальной идеологии).

### Антиатомизм и энергетизм Вильгельма Оствальда

Несколько подробнее остановимся на антиатомных воззрениях Оствальда, удивлявших многих. Первые работы ученого не противоречили атомно-молекулярному учению. Более того, он был активным сторонником этого учения. Признавал не только объективное существование атомов, но и указывал, что на этой основе развилась чрезвычайно плодотворная теория, утверждал, что все химические опыты нисколько не противоречат ей, обещал постоянно пользоваться этой гипотезой. Однако уже в начале 1890-х годов Оствальд стал постепенно отходить от атомизма в сторону энер-

<sup>4</sup> Кроме них Нобелевские премии в 1914 и 1923 гг. получили Т. Ричардс и Ф. Прегль.

<sup>5</sup> П. И. Вальден (1863—1957) — один из первых учеников В. Оствальда в Рижском политехникуме, в 1910 г. избран в Петербургскую академию наук, с 1927 г. — иностранный почетный член АН СССР.



гетизма. Началось это с признания паритетности материи и энергии и со временем привело к полному отрицанию существования атомов. Атомистике отводилось печальное место в «архивной пыли библиотек». В качестве единственной реальности Оствальд признавал только энергию, а материю и дух рассматривал как всего лишь формы проявления энергии.

С учетом изменившихся взглядов Оствальд пытался также пересмотреть свои учебники по химии. При этом искоренение атомизма оказалось непростой задачей, особенно трудно было описать электролитическую диссоциацию без привлечения представлений об атомах. Для этого Оствальд был вынужден рассматривать ионы не как электрически заряженные атомы, а как некие порции энергии. Метаморфоза, произошедшая в научных взглядах Оствальда, была удивительной. Казалось бы, атомно-молекулярная гипотеза давно не вызывала противодействия не только в химии, физике, но и в других естественных науках. Многие видят объяснение этого феномена в несомненных успехах термодинамики и химической динамики, которые были достигнуты без привлечения атомных представлений. Это, по мнению Оствальда, сделало атомную теорию совершенно ненужной. Термодинамика стала рассматриваться рядом ученых как альтернатива атомной теории, а для самого Оствальда в альтернативу атомизма превратился энергетизм.

Однако его энергетические идеи не нашли понимания среди ученых, в том числе и среди ближайших соратников. Заменить атомы чем-то другим на самом деле оказалось практически невозможно. Химия и физика на рубеже веков как никогда нуждались в атомно-молекулярной теории.

Критика энергетизма была широкой и обстоятельной. Наиболее серьезный удар по энергетическому учению Оствальда был нанесен Л. Больцманом, которому удалось примирить второе начало термодинамики с атомно-молекулярной теорией. После работ Больцмана было понятно, что атомизм останется главным направлением развития науки, что «болезнь» Оствальда необходимо преодолеть. Заключение Больцмана звучало почти как приговор — «дальнейшее развитие энергетизма в его настоящей форме было бы роковым для точного понимания природы» (Больцман, 1929, с. 91). Страх химиков перед атомами был преодолен.

Вскоре последовало и вынужденное признание самого Оствальда 1908 г.: «Я убедился, что в недавнее время нами получены экспериментальные подтверждения прерывного, или зернистого, характера веществ, которые тщетно отыскивала атомистическая гипотеза в течение столетий и тысячелетий... тем самым атомистическая гипотеза поднята на уровень научно-обоснованной теории» (Оствальд, 1911, с. 8). А Вант-Гофф писал в своём дневнике: «Оствальд посетил меня. Он обращен и признает молекулу». При этом полного отказа Оствальда от энергетизма не произошло. В последующем даже были попытки возрождения соответствующих идей в связи с рождением квантовой физики, в позициях которой было заметно некоторое сходство с представлениями Оствальда. Возрождения энергетизма, однако, не произошло. Принципиально важное значение атомной концепции для плодотворного развития науки уже не могло быть поколеблено.

## Кристаллогенезис и оствальдово созревание кристаллов

Как один из создателей физической химии, В. Оствальд не мог оставаться равнодушным к явлениям зарождения и роста кристаллов. Он, кстати, считал кристаллографию одним из важных разделов физической химии. Целый ряд его наблюдений представлял очевидный кристаллогенетический интерес. В первую очередь они касались свойств кристаллообразующих сред, растворимости различных веществ. В частности, В. Оствальд в 1897 г. обсуждал проблему бесконечно долгой устойчивости пересыщенных растворов (состояние метастабильности). Для вывода системы из такого состояния необходимо внешнее воздействие, к примеру, внести в раствор затравку кристалла или другую примесную частицу, которая будет играть роль центра кристаллизации.

Непосредственное кристаллогенетическое значение имело установленное В. Оствальдом так называемое правило ступеней. Оно описывает явление первоочередного образования из пересыщенных растворов или переохлажденных расплавов неустойчивых модификаций, которые лишь затем заменяются всё более устойчивыми модификациями (состояниями). Правило последовательных ступеней соблюдается во многих процессах, связанных с фазовыми превращениями.

Оствальдом была высказана также интересная идея о промежуточных образованиях при взаимодействии молекул, которая, к сожалению, осталась без особого внимания. Этот вопрос стал актуальным только в конце XX века после широко известных экспериментов А. Зивейла (Zewail, 2000) и наших работ по кватеронной концепции (Асхабов, 2020), по образованию промежуточных кластерных форм вещества с необычными свойствами при взаимодействии атомов и молекул в пересыщенных средах.

Важное минералогическое значение имело признание дисперсной (зернистой) природы вещества и появившееся вскоре учение о дисперсных системах. Это обстоятельство продвигало интерес минералогов от описания минералов, изучения их свойств, в сторону расшифровки механизмов их генезиса в зависимости от условий образования (температуры, давления и т. д.). В скором времени в недрах минералогии (кристаллографии) вызрели такие направления, как генетическая минералогия и кристаллогенезис.

Признание существования молекул неизбежно вызвало интерес и к другим более крупным структурным формам вещества, стимулировало зарождение структурной минералогии, бурное развитие которой происходило уже после открытия дифракции рентгеновских лучей в кристаллах. Развитие новых идей в этом направлении привело его сына Вольфганга к созданию новой науки — коллоидной химии.

С именем В. Оствальда связано также одно из интереснейших явлений в кристаллогенезисе, которое имеет место в условиях коллективного роста кристаллов. Суть его заключается в том, что в полидисперсном «коллективе» одни кристаллы «поедаются» другими. Более крупные кристаллы увеличиваются в своих размерах за счет более мелких. Средний размер кристаллов увеличивается, они укрупняются. Такой своеобразный естественный отбор в ансамбле кристаллов

разных размеров известен как оствальдово созревание кристаллов. Детальный анализ и кристаллогенетическое значение оствальдова созревания кристаллов был дан нами в главе «Перекристаллизация и процессы отбора в условиях коллективного роста кристаллов» в монографии (Асхабов, 1984).

Универсальный механизм, объясняющий оствальдово созревание кристаллов, до сих пор не выявлен. Механизм, предложенный самим Оствальдом, основан на уравнении, которое устанавливает связь между величиной кристаллов (частиц) и их растворимостью:

$$C(r) = C(\infty)e^{\frac{2\gamma V}{RT r}},$$

где  $r$  — радиус частицы,  $C(r)$  — равновесная концентрация около частицы радиуса  $r$ ,  $C(\infty)$  — равновесная концентрация около частицы бесконечного радиуса,  $\gamma$  — удельная поверхностная энергия,  $V$  — объем частицы,  $T$  — абсолютная температура,  $R$  — универсальная газовая постоянная. Из формулы следует, что в результате перемещения растворенного вещества от маленьких кристаллов в раствор, а из раствора к кристаллам большего размера будет происходить увеличение последних. На самом деле реальность гораздо сложнее, и современные представления об укрупнении кристаллов не основываются только на уравнении Оствальда.

### О научной школе Вильгельма Оствальда

Очень много внимания Оствальд уделял анализу собственно науки, научной деятельности, жизни великих ученых. На этой основе сформировались его представления об истории науки, её роли в развитии человечества. При этом, по словам Вант-Гоффа, Оствальд не удовлетворялся выработкой собственного взгляда на это, ему важно было передать свои взгляды другим, что он весьма успешно делал через свои книги, лекции, отношение к ученикам. В этом плане очень поучительны и продолжают оставаться актуальными его взгляды. В частности, Оствальд считал, что:

- для успеха в науке нужно обладать чутьём на новые идеи;
- необходимо направлять силы на такие проблемы, для осуществления которых почва уже достаточно подготовлена;
- наиболее эффективна исследовательская работа в специализированных научных институтах;
- для новой науки необходим свой специальный печатный орган — научный журнал;
- формирование научной школы — необходимое условие для победного шествия новой науки.

Эти простые мысли легли в основу организации В. Оствальдом своей научной школы, которая защищала и развивала работы учителя, доказывала их плодотворность. Он писал: «Если я горжусь чем-либо из своей научной деятельности, то это блестящим рядом людей, которых я выделил уже молодыми и которым помогал в их свободном научном развитии» (Оствальд, 1912, с. 236).

Школа Оствальда насчитывает несколько сотен специалистов в области физической химии, среди которых ученые первого ранга. Это представители разных стран и разных национальностей. Благодаря за-

слугам Оствальда Лейпцигский университет превратился в мировой центр физико-химического образования. Многие отмечали и лекторский талант Оствальда. Его лекции из года в год по одному и тому же предмету никогда не походили одна на другую и несли следы бесконечной духовной эволюции творца. Он обладал необыкновенным талантом — из массы материала выбрать самое существенное, а сложное и запутанное представить в простом и общедоступном изложении (Walden, 1904, с. 65). «Вместо того, чтобы снисходить к ученику, он старается поднять его до своего уровня» (там же, с. 67).

Физико-химическая школа В. Оствальда в Лейпцигском университете была уникальным явлением, там кипела и бурлила научная жизнь, делали новые открытия. Каждый семестр к Оствальду приезжали десятки практикантов из самых разных стран — не только из Европы, но даже из Японии. Целая плеяда русских химиков также прошла эту школу. Есть любопытная характеристика у академика Кистяковского: «Обыкновенно пишут, что Оствальд создал большую школу учеников, но можно отчасти сказать и наоборот, что школа учеников создала Вильгельма Оствальда» (Кистяковский, 1939).

Вот ещё несколько особенностей, которые должны быть у научной школы, по Оствальду:

- учитель должен уметь воодушевлять своих учеников и вызывать у них интерес к делу;
- предоставлять ученикам свободу в выборе научных тем, в поисках собственного пути;
- учитель должен делать всё нужное для развития у начинающего ученого самостоятельного мышления, помочь в выборе темы исследования; успех приходит к тем, кто рано находит свою проблему;
- важно не мешать ученику, когда он идёт в направлении, отличным от того, что подразумевал учитель, когда формулировал задачи исследования;
- у руководителя должна быть «способность своевременно уступать дорогу талантливому и преуспевающему ученику»;
- ученики должны видеть любовь учителя к своему делу, любовь к своей науке;
- в науку должны идти люди, для которых работа в науке будет становиться смыслом в жизни, главная мотивация в науке — чистый интерес;
- фактором успеха научной школы является организаторский талант учителя, школы создают выдающиеся ученые с сильной волей;
- падение личной продуктивности руководителя должно компенсироваться успешной работой сотрудников.

Продолжая разговор о научной школе Вильгельма Оствальда, имеет смысл остановиться на жизни и деятельности его второго сына — Вольфганга. Он работал в институте отца, специализировался в области физической химии. Признан одним из основателей коллоидной химии. Стал широко известен по его уже упоминавшейся книге «Мир обойденных величин». Название книги, кстати, появилось из его оценки ситуации, сложившейся в физической химии в начале XX века, когда микроскопические объекты, размеры которых находятся между миром атомов и молекул с одной стороны и объектами макроскопических размеров с другой, оказались как бы за бортом науки, вне



должного внимания физиков и химиков. Эти слова оказались очень подходящими для характеристики мира, куда даже в те годы входили разнообразные объекты — не только коллоидные системы, золи, мицеллы, микроэмульсии, но также природные коллоиды, гели, мозаичные и иерархически построенные дисперсные минеральные образования и др.

Карл Вильгельм Вольфганг Оствальд родился 27 мая 1883 г. в Риге. В 1904 г. окончил Лейпцигский университет. С 1906 г. до конца жизни проработал в Лейпцигском университете, где серьёзно занимался вопросами коллоидной химии, стал одним из лидеров этой новой области науки. В 1913—1914 гг. был приглашен в США для чтения лекций в американских университетах. Они имели блестящий успех и стали основой для его знаменитой книги. С 1919 г. он работал в основном его отцом физико-химическом институте Лейпцигского университета, где организовал коллоидно-химические исследования, основал коллоидное общество. Опубликовал ряд блестящих работ и руководств по коллоидной химии. За эти работы его по праву называют одним из основателей коллоидной химии. В 1931 г. Вольфганг Оствальд номинировался на Нобелевскую премию, но не получил её.

Важно, что прозвучавший у Вольфганга Оствальда призыв к исследованию «мира обойденных величин» был воспринят с энтузиазмом и послужил стимулом для многих совершенно уникальных и неожиданных открытий, многие из которых были удостоены Нобелевских премий. В частности, в 1925—1926 гг. премию получили Р. Зигмонди (открыл доступ в мир недоступных размеров), Т. Сведберг и Ж. Перрен (за прорыв в мир дискретных частиц).

«Коллоидный» взгляд на мир, пропагандируемый Вольфгангом Оствальдом, вызвал большой интерес не только у химиков. Многим он пришелся по вкусу, в том числе геологам и минералагам. Особенно близки «коллоидные» идеи оказались тем, кто изучал природные дисперсные (коллоидные) системы. В обиход даже вошли термины «коллоидно-дисперсная» и «коллоидная» минералогия.

Идеи Вольфганга Оствальда имели грандиозное влияние на развитие смежных наук, на расширение и появление новых объектов исследования, на прогресс в области изучения дисперсных частиц, ультрадисперсного минерального вещества, получения микро- и наноструктурированных материалов (Асхабов, 2024).

## Закключение

Как исследователь, Вильгельм Оствальд известен своими работами в области изучения химического сродства, электролитической диссоциации и пионерскими работами в области катализа. Он достиг самых высоких званий и признания в науке, стал лауреатом Нобелевской премии. Мировую славу и известность он получил не только за выдающиеся собственно научные достижения, за беспримерный организаторский

талант, как создатель одной из самых известных научных школ, но и как натурфилософ (правда, очень «путанный философ», по В. И. Ленину), теоретик и историк науки, общественный деятель. Его имя вписано золотыми буквами в историю естествознания. Он безусловно принадлежит к числу провидцев, которые видят решение всех проблем человечества в науке.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.*

## Литература / References

- Асхабов А. М. Процессы и механизмы кристаллогенезиса. Л.: Наука, 1984. 168 с.
- Askhabov A. M. Processes and Mechanisms of Crystallogenesis. Leningrad: Nauka, 1984, 168 p. (in Russian)
- Асхабов А. М. О кватаронах и их необычных свойствах // Известия Коми научного центра УрО РАН. 2020. № 46. С. 21—27. DOI 10.19110/1994-5655-2020-6-21-27
- Askhabov A. M. Quatarons and their unusual properties. Proceedings of the Komi SC UB RAS, 2020, No. 46, pp. 21—27. (in Russian)
- Асхабов А. М. Вольфганг Оствальд и его «Мир обойденных величин» // Вестник геонаук. 2024. 8 (356). С. 41—44. DOI: 10.19110/geov.2024.8.5
- Askhabov A. M. Wolfgang Ostwald and his «World of neglected dimensions». Vestnik of Geosciences, 2024, 8 (356), pp. 41—44 (in Russian)
- Болцман Л. Очерки методологии физики. М., 1929.
- Boltzmann L. Essays on the Methodology of Physics. Moscow, 1929. (in Russian)
- Вересаев В. Воспоминания. М., Гослитиздат, 1946. С. 312.
- Veresae V. Memories. Moscow: Goslitizdat, 1946, p. 312. (in Russian)
- Кустяковский В. А. Вильгельм Оствальд // Изв. АН СССР. ОМН, 1939. № 4. С. 431—444.
- Kistyakovsky V. A. Wilhelm Ostwald. Proceedings USSR AS. OMEN, 1939, No. 4, pp. 431—444. (in Russian)
- Оствальд В. Мир обойденных величин. Введение в современную коллоидную химию с обзором её приложений. М.: Мир, 1923. 228 с.
- Ostwald W. The World of Neglected Dimensions. Introduction to Modern Colloid Chemistry with a Review of Its Applications. Moscow: Mir, 1923, 228 p. (in Russian)
- Родный Н. И., Соловьев Ю. И. Вильгельм Оствальд. 1853—1932. Научно-биограф. серия. М.: Наука, 1969. 375 с.
- Rodny N. I., Soloviev Yu. I. Wilhelm Ostwald. 1853—1932. Scientific-biographical series, Moscow: Nauka, 1969, 375 p. (in Russian)
- Ostwald W. Lebenslinien. Eine Selbstbiographic. Bd. I-III, Berlin, 1926—1927.
- Ostwald W. How One Becomes a Chemist. J. Chem. Educ., 1953, V. 30, № 12, P. 606.
- Walden P. Wilhelm Ostwald, Leipzig, 1904.
- Zewial A. N. Femtochemistry: Atomic-Scale dynamics of the Chemical Bend // The Journ. of Phys. Chem., 2000, V. 4, № 1.

Поступила в редакцию / Received 4.12.2024

## Оценка объемного содержания фаз по случайным сечениям

А. В. Журавлев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия  
*micropalaeontology@gmail.com*

В данной работе приведена экспериментальная оценка применимости стереологического принципа (равенство площадных и объемных соотношений) для невысоких содержаний изучаемой фазы и различных текстурно-структурных параметров. Этот принцип хорошо работает для равномерно распределенных в объеме эллипсоидальных частиц. В других случаях к средним значениям соотношений фаз, определенных по шлифам или аншлифам, необходимо применять поправочный коэффициент, зависящий от структурно-текстурных характеристик.

Ключевые слова: *стереологический принцип, соотношение фаз, шлифы, аншлифы, трехмерное моделирование*

## Estimation of volumetric content of phases from random cross sections

A. V. Zhuravlev

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

In this paper we present an experimental evaluation of the applicability of the stereological principle (equality of area and volume ratios) for low contents of the studied phase and various textural and structural parameters. This principle works well for uniformly distributed ellipsoidal particles. In other cases, it is necessary to apply a correction factor to the average values of the phase ratios determined from sections. This factor depends on textural and structural characteristics.

Keywords: *stereological principle, phase ratio, thin sections, polished sections, three-dimensional modelling*

### Введение

Проблема стереологической реконструкции заключается в определении объемных характеристик объектов по их сечениям (Салтыков, 1976; Чернявский, 1977). Применительно к шлифам и аншлифам горных пород это оценка объемного содержания фазы породы по доле площади, занимаемой ей в сечении, а также определение размера частиц по размеру их сечений (Chayes, 1956). Подобные задачи возникают при любом микроскопическом изучении горных пород, а точность их решения существенно влияет на дальнейшие интерпретации. Проблема стереологической реконструкции и ее разнообразные решения известны с середины XIX века (Delesse, 1848). Объемные соотношения фаз предлагалось аппроксимировать соотношениями в сечениях площадей (или вероятностей попадания случайных точек в ту или иную область) или линейных размеров (Delesse, 1848; Rosiwal, 1898; Wickse, 1926; Глаголев, 1941). Подробный исторический обзор данного вопроса приведен в работе Ю. Л. Войтеховского (2018).

Данная работа посвящена решению первой задачи — определению объемного содержания фазы породы по доле площади, занимаемой им в шлифе или аншлифе.

Отсутствие строгого аналитического решения для неравномерно распределенных частиц неизвестной (случайной) формы и размера по одному случайному

сечению очевидна (Chayes, 1956; Бакунов, Беляков, 1992). Один из экстремальных случаев — пластинчатые частицы, лежащие в одной плоскости, могут занимать 100 % площади в сечении, проходящем в ней, и 0 % в сечении, не пересекающем ее. Даже при равномерном распределении частиц известной формы строгое аналитическое решение по одному случайному сечению невозможно. При наличии данных по многим случайным сечениям аналитическими методами можно получить смещенную оценку объемных соотношений частиц (Усманов, 1977), а в случае эллипсоидальных частиц — оценить не только объемные соотношения, но и распределение их по размеру (Wickse, 1926; Шванов, Марков, 1960). Когда не требуется высокая точность и можно получить много сечений образца породы, условно принимается, что средние содержания, получаемые по площади шлифа или аншлифа, соответствуют объемным. То есть используется стереологический принцип, приравнивающий площадные и объемные соотношения фаз (Delesse, 1848).

Оценить применимость стереологического принципа к различным по текстурно-структурным признакам породам (материалам) можно экспериментально. В данной работе приведена такая оценка для невысоких содержаний изучаемой фазы. Подобная ситуация часто встречается при анализе содержаний различных типов аллохем в карбонатных породах.



## Материал и методы

Основу эксперимента составили компьютерные трехмерные модели и их виртуальные сечения. Модели соответствуют различным текстурам (распределению «минеральных фаз» в матрице) изучаемого материала, но в первую очередь имитируют распределения аллохем в осадочных карбонатных породах. Наиболее распространенные аллохемы имеют неправильную, эллипсоидальную (литокласты, микрофоссилии) или субцилиндрическую форму (членики криноидей). Это отличает их от моделей минеральных агрегатов и мягких тканей биологических объектов (Mayhew, Cruz Orive, 1974; Gulbin, 2008).

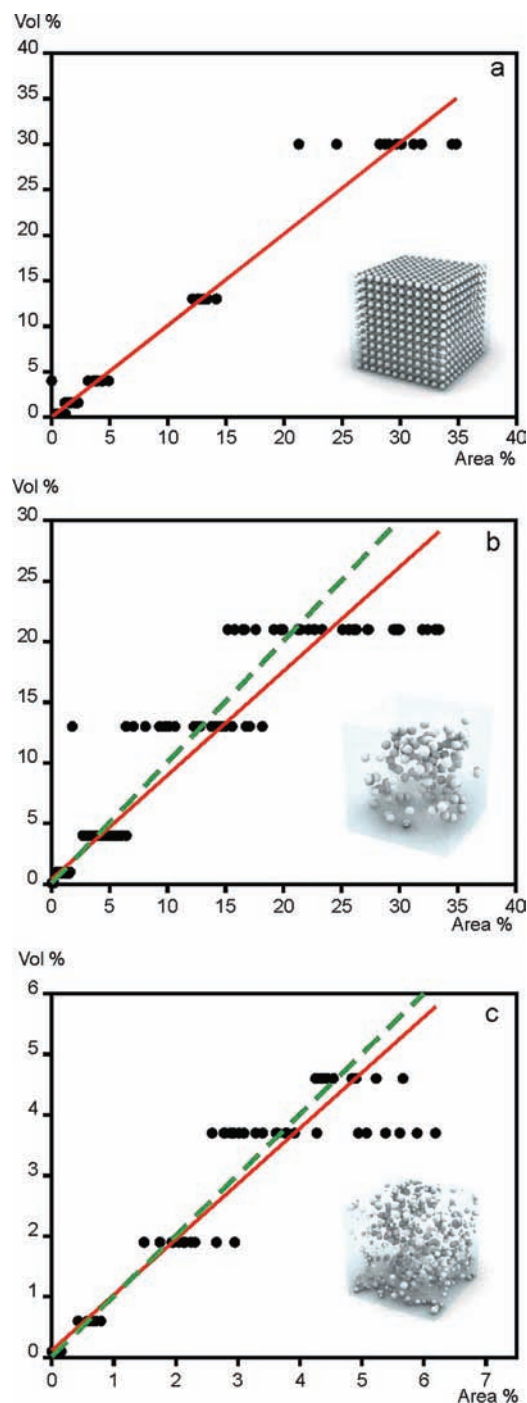
Всего построено четыре типа моделей с разной степенью упорядоченности объектов: 1) с распределением шарообразных частиц одного диаметра в узлах кубической решетки; 2) с равномерным случайным распределением шарообразных частиц одного диаметра; 3) с равномерным случайным распределением шарообразных частиц случайного диаметра; 4) с равномерным случайным распределением частиц различного размера и формы (эллипсоиды, параллелепипеды, цилиндры). Выбранные типы моделей, за исключением первого, в разной степени отвечают морфологии и распределению аллохем (био- и литокластов) в осадочных карбонатных породах. Согласно теоретическим построениям, для первых трех моделей должно соблюдаться равенство площадного и объемного соотношения фаз (Wicksel, 1926).

Первый тип представлен пятью моделями с заданным объемным содержанием частиц 0.4, 1.6, 4, 13 и 30 %, для которых сгенерировано 111 случайно ориентированных виртуальных сечений. По ним определены «площадные проценты» (соотношение суммарной площади сечений частиц и общей площади сечения).

Второй тип представлен шестью моделями с объемным содержанием частиц 0.08, 0.9, 1, 4, 13 и 21 %, для которых сгенерировано 244 виртуальных сечения. Для третьего типа сгенерировано пять моделей с объемным содержанием частиц 0.1, 0.6, 1.9, 3.7 и 4.6 %, для которых получено 73 виртуальных сечения. Четвертый тип представлен восьмью моделями с относительно равномерным распределением частиц различной морфологии (эллипсоиды, параллелепипеды, цилиндры) и заданным объемным содержанием: 1.5, 3, 6, 10, 15, 23, 26 и 31 %. Для каждой модели сгенерировано не менее 36 случайно ориентированных виртуальных сечений (всего 345), по которым определены «площадные проценты». Построение трехмерных моделей, генерация случайных сечений и вычисление соотношения площади сечения частиц к общей площади сечения («площадные проценты») выполнено в программном пакете трехмерного моделирования Rhinoceros 7.

## Результаты и обсуждение

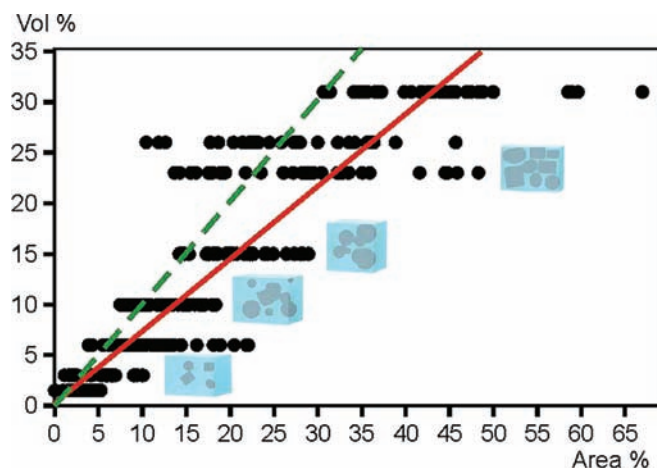
Построенные модели, разумеется, не охватывают всего разнообразия форм, распределения и размеров частиц, но позволяют провести некоторые количественные оценки. Соотношение объемных и «площадных» содержаний для первых трех типов моделей дано на рис. 1, а для четвертого типа — на рис. 2.



**Рис. 1.** Соотношение «площадных» (Area %) и объемных (Vol %) содержаний частиц для различных типов трехмерных моделей:

a — с распределением шарообразных частиц одного диаметра в узлах кубической решетки; b — с равномерным случайным распределением шарообразных частиц одного диаметра; c — с равномерным случайным распределением шарообразных частиц случайного диаметра. Красным обозначена линия регрессии, зеленым пунктиром — линия равных значений «площадных» и объемных содержаний

**Fig. 1.** Ratio of 'areal' (Area %) and volumetric (Vol %) particle contents for different types of three-dimensional models: a — with distribution of spherical particles of the equal diameter in nodes of a cubic lattice; b — with uniform random distribution of spherical particles of the equal diameter; c — with uniform random distribution of spherical particles of random diameter. The regression line is marked in red, the dashed line of equal values of 'areal' and volumetric contents is marked in green



**Рис. 2.** Соотношение «площадных» (Area %) и объемных (Vol %) содержаний частиц для трехмерной модели с равномерным случайным распределением частиц различного размера и формы (эллипсоиды, параллелепипеды, цилиндры). Красным обозначена линия регрессии, зеленым пунктиром — линия равных значений «площадных» и объемных содержаний.

**Fig. 2.** Correlation of 'areal' (Area %) and volume (Vol %) particle contents for a three-dimensional model with uniform random distribution of particles of different sizes and shapes (ellipsoids, parallelepipeds, cylinders). The regression line is marked in red; the dashed line of equal values of 'areal' and volume contents is marked in green.

Распределение «площадных процентов» для каждой модели неравномерное и характеризуется большим интервалом изменений. При этом отдельные значения могут быть как выше, так и ниже объемного содержания. Для каждого типа модели определено уравнение линейной регрессии и построена линия регрессии (рис. 1 и 2).

В случае упорядоченного распределения сферических частиц одного диаметра (первый тип) среднее соотношение объемных и «площадных» процентов практически не отличается от 1 (уравнение регрессии  $\text{Vol}\% = 0.971 \cdot \text{Area}\%$ ) (рис. 1, а). Для таких моделей соблюдается стереологический принцип, приравнивающий средние площадные и объемные соотношения фаз (Delesse, 1848).

Для моделей второго, третьего и четвертого типов полученное соотношение средних «площадных» и объемных процентов отличается от 1. В среднем «площадные» проценты незначительно больше объемных, то есть при оценке содержания фазы по сечениям значения получаются завышенными. Подобный эффект наблюдался на реальных геологических объектах, где отмечено завышение содержания минералов по шлифам по отношению к результату рентгенофазового анализа (Кузнецова и др., 2024). Обратное соотношение («площадные» проценты несколько меньше объемных) из геометрических соображений ожидаемо при анализе любого единичного объекта выпуклой формы, у которого площадь случайного сечения меньше максимальной (Mayhew, Cruz Orive, 1974).

Модели со случайно распределенными в пространстве шарообразными частицами одного размера показывают соотношение «площадных» и объемных процентов, описываемое формулой  $\text{Vol}\% = 0.86 \cdot \text{Area}\%$ ,

а для частиц случайного размера — формулой  $\text{Vol}\% = 0.93 \cdot \text{Area}\%$ . В целом для случайно и равномерно распределенных шарообразных частиц объемные соотношения составляют около 0.9 от установленных по соотношению площадей в случайных сечениях, что близко к теоретическому соотношению около 1 (Wicksel, 1926). Для моделей с различной формой и размером частиц соотношение значительно отличается от 1 (рис. 2). В этом случае площадные и объемные проценты связаны формулой  $\text{Vol}\% = 0.72 \cdot \text{Area}\%$  (СКО = 4.9 %), а максимальное отклонение может достигать 15 %. Модели четвертого типа по характеристикам ближе всего к большинству реальных геологических объектов. Выбранные соотношения размеров частиц и площади сечения примерно отвечают типичному соотношению биокластов в карбонатах и площади «стандартного» шлифа (около 4 см<sup>2</sup>). Для более мелких биокластов (или шлифов большой площади) применим третий тип моделей.

Полученные результаты применимы к объектам, в которых содержание изучаемой фазы находится в интервале 0.1—20 % (именно он охватывается большинством типов использованных моделей). За его пределами выявленные соотношения, возможно, будут нарушаться.

## Выводы

Таким образом, при невысоких содержаниях изучаемой фазы стереологический принцип хорошо работает для равномерно распределенных в объеме и упорядоченно расположенных частиц, что в природных объектах встречается редко. В других случаях к средним значениям соотношений фаз, определенных по серии шлифов или аншлифов, необходимо применять поправочный коэффициент. Для получения более точных результатов его можно определить по специальному набору моделей, учитывающему особенности текстурно-структурных характеристик конкретного объекта.

*Работа выполнена в рамках госзадания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.*

*Автор благодарен рецензентам за конструктивные замечания, позволившие существенно улучшить текст статьи.*

## Литература / References

- Бакунов В. С., Беляков А. В. К вопросу об анализе структуры керамики // Неорганические материалы. 1996. 32(2). С. 243—248.
- Bakunov V. S., Belyakov A. V. Towards the analysis of the structure of ceramics. Non-organic materials, 1996, No. 32(2), pp. 243—248. (in Russian)
- Войтеховский Ю. Л. Из истории модального анализа и стереологии в петрографии // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2018. № 15. С. 92—94. DOI: 10.31241/FNS.2018.15.022
- Voytekhevsky Yu. L. From the history of modal analysis and stereology in petrography. Proc. Fersmanov Conference GI KSC RAS, 2018, No. 15, pp. 92—94. (in Russian)
- Глаголев А. А. Геометрические методы количественного анализа агрегатов под микроскопом. М.—Л.: Гостеол-издат, 1941. 263 с.



- Glagolev A. A. Geometric methods for quantitative analysis of aggregates under the microscope. Moscow-Leningrad: Gosgeolizdat, 1941, 236 pp. (in Russian)
- Кузнецова В. А., Костеневич К. А., Алимгафарова А. Д., Панев Е. В., Сафронова А. Г. Влияние песчаников с высокой концентрацией тяжелых минералов на распределение углеводородов в залежи на примере месторождения Западной Сибири // Георесурсы. 2024. 26(3). С. 96—108. DOI: 10.18599/grs.2024.3.11
- Kuznetsova V. A., Kostenevich K. A., Alimgafarova A. D., Panev Y. V., Safronova A. G. The influence of sandstones with a high concentration of heavy minerals on the distribution of hydrocarbons in a reservoir using the example of a field in western siberia. Georesources, 2024, No. 26(3), pp. 96—108. (in Russian).
- Салтыков С. А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургия, 1976. 272 с.
- Saltykov S. A. Stereometric metallography. Moscow: Metallurgiya, 1976, 272 p. (in Russian)
- Усманов Ф. А. Основы математического анализа геологических структур. Ташкент: ФАН, 1977. 202 с.
- Usmanov F. A. Fundamentals of mathematical analysis of geological structures. Tashkent: FAN, 1977, 202 p. (in Russian)
- Шванов В. Н., Марков А. Б. Гранулометрический анализ песчаников в шлифах // Геология и разведка. 1960. 12. С. 49—55.
- Shvanov V. N., Markov A. B. Granulometric analysis of sandstones in thin sections. Geologiya i razvedka, 1960, No. 12, pp. 49—55. (in Russian)
- Чернявский К. С. Стереология в металловедении. М.: Металлургия, 1977. 279 с.
- Tchernyavskiy K. S. Stereology in metallurgical science. Moscow: Metallurgiya, 1977, 279 p. (in Russian)
- Chayes F. Petrographic modal analysis. An elementary statistical appraisal. New York: John Wiley & Sons Inc., 1956. 113 pp.
- Delesse M. A. Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches // Annales des Mines 13, 4th series. 1848. P. 379—388.
- Gulbin Y. On estimation and hypothesis testing of the grain size distribution by the Saltykov method // Image Analysis and Stereology. 2008. 27. P. 163—174. DOI: 10.5566/ias.v27.p163-174
- Mayhew T. M., Cruz Orive L.-M. Caveat on the use of the Delesse principle of areal analysis for estimating component volume densities // Journal of Microscopy. 1974. 102(2). P. 195—207.
- Rosival A. Über geometrische Gesteinanalysen. Ein einfacher Weg Zur ziffermässigen Feststellung des Quantitätsverhältnisses der Mineralbestandtheile gemengter Gesteine // Verhandlungen der kaiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt. Wien: Verlag der kaiserlich-königlichen Geologischen Reichsanstalt, 1898. P. 143—175.
- Wicksel S. D. The corpuscle problem. 2<sup>nd</sup> memoir. Case of ellipsoidal corpuscles // Biometrika. 1926. 18(1/2). P. 151—172. DOI: 10.2307/2332500

Поступила в редакцию / Received 31.01.2025

## ДЕНЬ РОССИЙСКОЙ НАУКИ — 2025 / RUSSIAN SCIENCE DAY 2025

Traditionally, on the Russian Science Day, the Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences held an open day. The holiday started on February 7 with a master class for pupils "Riddles of the Mineral Resources: What is What?" at the Geological Museum and an open day at the Pitirim Sorokin Syktyvkar State University. One of the areas of training — 05.03.01 «Geology» (Bachelor's Degree) — was presented by students of the Department of Ecology and Geology of the Institute of Natural Sciences and researchers of the Institute of geology Komi SC UB RAS. The participants of these events got acquainted with the profession of a geologist, various geological and mineralogical collections, and mastered some practical skills.

### Загадки недр / Riddles of Mineral Resources

В этом году День российской науки в Институте геологии им. академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН отмечали 7 февраля. В рамках празднования проводился мастер-класс «Загадки недр: что есть что?», который проходил на базе Геологического музея им. А. А. Чернова.

В недрах Земли хранится великое множество загадочных камней, минералов, горных пород и ископаемых остатков. Каждый человек хоть раз в жизни находил камни, которые привлекли его внимание своим блеском, цветом, формой, красотой рисунка. Однако люди затрудняются дать определение своим находкам, так как не владеют геологическими знаниями и навыками. Целью проведения необычного мероприятия и стало дать первичные знания и навыки, которые позволили бы самостоятельно диагностировать минералы, горные породы и ископаемые остатки. В этом году было организовано 4 группы школьников — от младших до старших классов.

По основным направлениям геологических знаний были организованы учебные коллекции. Минералогическая коллекция знакомила с основными свойствами минералов (цвет, блеск, твердость, цвет черты, люминисценция и т. д.). После получения знаний ребята самостоятельно смогли определить шеелит, флюорит, соль, халькопирит.

Сотрудники лаборатории петрографии и региональной геологии раскрыли тайны глубинного строения Земли и вулканов. Заглянув в петрографический микроскоп, ребята определяли по шлифам гранит, сланец, мрамор и т. д. Сотрудники лаборатории литологии объяснили ребятам значение осадочных горных пород, в которых сосредоточено более 75 % полезных ископаемых. На ощупь научились различать разнозернистый песок, гравий, щебень. Сотрудники лаборатории четвертичной геологии научили определять по валунам направление движения древних ледников. Ребята получили практические навыки определения ископа-





емых остатков. В зале «Полезные ископаемые» узнали практическое значение минералов и горных пород. Расширили свои знания о применении полезных ископаемых, например, из нефти производят не только бензин, но и множество других продуктов. Число гостей в День науки превысило 70 человек.



Нам удалось охватить лишь малую долю желающих познать недра нашей планеты. Данный опыт показал заинтересованность жителей и гостей нашего города, и в дальнейшем планируется проводить подобные мероприятия в рамках других проектов.

*к. г.-м. н. И. С. Астахова*

## **День открытых дверей «Твой успех» в СГУ им. Питирима Сорокина — направление подготовки «Геология»**

### **Open Day “Your Success” at the Pitirim Sorokin Syktyvkar State University — “Geology” training program**

В СГУ им. Питирима Сорокина, включая базовую кафедру Института геологии, 21 февраля прошел день открытых дверей «Твой успех». Старшеклассники, сту-

денты колледжей и техникумов познакомились с направлениями обучения в вузе, в том числе с направлением подготовки 05.03.01 «Геология» (бакалавриат),





на которое в этом году объявлен прием абитуриентов. Это направление презентовали студенты кафедры экологии и геологии Института естественных наук и научные сотрудники Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Участники мероприятия познакомились с профессией геолога, коллекциями минералов, горных пород, полезных ископаемых, палеонтологических остатков, нефтематеринских пород.

Под руководством студентов они протестировали один из минералов, определив его твердость, цвет черты и реакцию с соляной кислотой, ощутили запах нефти, посмотрели шлифы горных пород в поляризационном микроскопе. Презентация направления подготовки «Геология» вызвала большой интерес у участников мероприятия.

**к. г.- м. н. Т. П. Майорова**



Сыктывкарский государственный университет имени Питирима Сорокина



Институт геологии имени акад. Н. П. Юшкина Коми НЦ УрО РАН

### Прием на 2025/2026 учебный год

05.03.00 Науки о Земле

Направление подготовки **05.03.01 Геология (бакалавриат)**

Профиль «Геология и экологическая безопасность недропользования»

**Количество мест – 15 (очная форма обучения)**

**Начало приема заявлений и документов - 20 июня 2025 г.**

Перечень вступительных испытаний:

#### **05.03.01 Геология**

**1. Обязательное:** Математика профильного уровня (ЕГЭ [40 баллов] / тест)

**2. Обязательное:** Русский язык (ЕГЭ [40 баллов] / тест)

**3. По выбору:**

- География (ЕГЭ [40 баллов] / тест)
- Физика (ЕГЭ [39 баллов] / тест)
- Информатика (ЕГЭ [44 балла] / тест)
- Химия (ЕГЭ [39 баллов] / тест)

Тестирование по внутренним тестам проходят выпускники средних профессиональных учебных заведений. Иногородним предоставляется общежитие.

**Подробная информация на сайте:** <https://www.syktsu.ru/abitur/bachelor/>

#### Редакторы издательства:

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

#### Компьютерная верстка

А. Ю. Перетягина

Свид. о рег. средства массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 31.03.2025. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6.5. Тираж 140. Заказ 1243. Учредитель: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН). Редакция, издательство, типография: издательско-информационный отдел Института геологии имени академика Н. П. Юшкина Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН).

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

На обложке использованы фото П. Безносова, А. Перетягина, Н. Уляшевой, А. Иевлева, Н. Сокериной

**На обложке:** известняк криноидный, р. Подчерем,  $C_1$ , визейский ярус.  
Коллекция А. Н. Шадрина (обр. № 548/396). Фото А. Ю. Перetyгина

**On the cover:** Crinoid limestone, Podcherem River,  $C_1$ , Visean stage.  
Collection by A. N. Shadrin (sample 548/396). Photo by A. Peretyagin

Журнал включен в международные базы цитирования, ядро РИНЦ (RSCI),  
а также Перечень ВАК. Распространяется бесплатно

The Journal is included in Russian and International information databases (incl. RSCI WoS)  
and in the list of Higher Attestation Commission. Free of charge