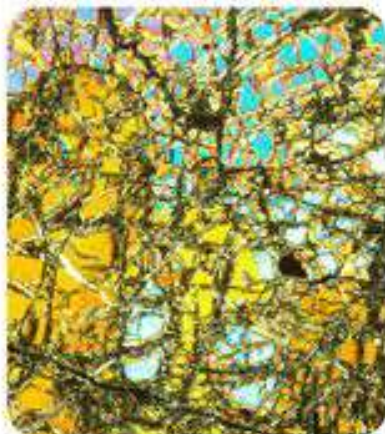


ISSN 2712-7761

№ 7 (367), июль 2025



# Вестник геонаук





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

Июль  
July  
2025,  
№ 7 (367)

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

**Главный редактор** А. М. Асхабов

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

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

**Ответственный секретарь** И. В. Козырева

**Chief Editor** A. M. Askhabov

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

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

**Executive Secretary** I. V. Kozyreva

## Редакционный совет

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

**Технический редактор** Г. Н. Каблис

**Заведующий редакцией** Т. А. Некучаева

## Editorial Board

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

**Technical Editor** G. N. Kablis

**Managing Editor** T. A. Nekuchaeva

## НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

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

**Предыдущее название:**

Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН

Двухлетний импакт-фактор  
РИНЦ журнала (2023) – 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

| Содержание  | Content   |
|---|---|
| Научные статьи  | Scientific articles   |
| <p>Минералы группы кричтонита в метариолитах и апобазитовых породах на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал)<br/> <i>С. А. Онищенко, Е. М. Тропников, В. А. Радаев</i>.....3</p> <p>Динамика развития прибрежной котловины выдувания (Вислинская коса, Юго-Восточная Балтика)<br/> <i>А. Р. Данченков, Е. Д. Питерниекс, Н. С. Белов</i> ..... 16</p> <p>Влияние пробоподготовки на точность определения состава флюида в кварце методом газовой хроматографии при термическом вскрытии включений<br/> <i>С. Н. Шанина, М. А. Корекина</i> ..... 28</p> <p>Динамика изменения состава карьерных вод на примере месторождения гипса в Архангельской области<br/> <i>В. А. Наход</i> ..... 35</p> | <p>Minerals of the crichtonite group in metarhyolites and apobasite rocks at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals)<br/> <i>S. A. Onishchenko, E. M. Tropnikov, V. A. Radaev</i> .....3</p> <p>Dynamics of evolution of coastal blowout (Vistula Spit, South-Eastern Baltic)<br/> <i>A. R. Danchenkov, E. D. Piterniex, N. S. Belov</i> ..... 16</p> <p>Effect of sample preparation on the accuracy of determination of composition of fluid released from quartz by gas chromatography during thermal opening of inclusions<br/> <i>S. N. Shanina, M. A. Korekina</i> .....28</p> <p>Dynamics of changes in the composition of quarry waters as exemplified by the gypsum deposit at the Arkhangelsk region<br/> <i>V. A. Nakhod</i>.....35</p> |
| Хроника, события, факты   | Chronicle, events, facts  |
| <p>Полевой геологический семинар «Палеозойские органогенные постройки бассейна р. Илыч, Северный Урал» ..... 49</p> <p>34-я Всероссийская научная конференция “Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента” (анонс) ..... 52</p>  | <p>Field geological workshop «Paleozoic organic buildups of the Ilych River basin, Northern Urals» .....49</p> <p>The 34<sup>th</sup> All-Russian Scientific Conference “Structure, substance, history of lithosphere of the Timan-Northern Ural segment” (announcement) ..... 52</p>   |

Правила  
оформления  
статей



Vestnik  
article  
Formatting





## Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.63: 552.4 (234.851)

DOI: 10.19110/geov.2025.7.1

### Минералы группы кричтонита в метариолитах и апобазитовых породах на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал)

С. А. Онищенко, Е. М. Тропников, В. А. Радаев

Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия  
mine222@ya.ru

На Au-Pd-месторождении Чудное выявлены сложные Fe-Ti-оксиды группы кричтонита. Видовое разнообразие минералов определяется соотношениями между Pb и Sr, а также между Zn, Mn и Y. В метариолитах присутствуют альмейдаит, кричтонит, сенаит и минералы промежуточного состава. Состав наиболее богатого цинком альмейдаита —  $(\text{Pb}_{0.44}\text{Sr}_{0.38})_{\Sigma 0.82}(\text{Mn}_{0.65}\text{Y}_{0.30})_{\Sigma 0.95}\text{Zn}_{1.23}(\text{Ti}_{13.67}\text{Fe}^{3+}_{5.01})_{\Sigma 18.68}\text{O}_{38}$ . Минеральная ассоциация включает мусковит, гематит, рутил, циркон, эшинит-(Y), монацит-(Ce), алланит-(Ce). В апобазитовых гематит-серицитовых породах на контакте с метариолитами обнаружен грамаччиолиит-(Y). Состав наиболее богатого иттрием грамаччиолиита-(Y) —  $\text{Pb}_{0.91}(\text{Y}_{0.50}\text{Mn}_{0.45})_{\Sigma 0.95}(\text{Ti}_{13.13}\text{Fe}^{3+}_{6.25}\text{Zn}_{0.25})_{\Sigma 19.63}\text{O}_{38}$ . Ассоциирующие минералы: мусковит, гематит, титанит, рутил, циркон и алланит-(Ce). Минералы группы кричтонита выявлены в контурах рудных зон с прожилковой золотофuchситовой минерализацией, но локализованы они не в рудных прожилках, а в породной матрице. Образование минералов группы кричтонита связано с метаморфическими процессами в риолитах и контактирующих с ними породах основного состава.

**Ключевые слова:** альмейдаит, кричтонит, сенаит, грамаччиолиит-(Y), эшинит-(Y), риолиты

### Minerals of the crichtonite group in metarhyolites and apobasite rocks at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals)

S. A. Onishchenko, E. M. Tropnikov, V. A. Radaev

Institute of Geology FRS Komi SC UB HFS, Syktyvkar, Russia

Complex Fe-Ti oxides of the crichtonite group have been identified at the Chudnoe Au-Pd deposit. The species diversity of minerals is determined by the balance between Pb and Sr, and between Zn, Mn and Y. Metarhyolites contain almeidaite, crichtonite, senaite and minerals of intermediate composition. The composition of almeidaite, which is the richest in zinc, —  $(\text{Pb}_{0.44}\text{Sr}_{0.38})_{\Sigma 0.82}(\text{Mn}_{0.65}\text{Y}_{0.30})_{\Sigma 0.95}\text{Zn}_{1.23}(\text{Ti}_{13.67}\text{Fe}^{3+}_{5.01})_{\Sigma 18.68}\text{O}_{38}$ . The mineral association includes muscovite, hematite, rutile, zircon, aeschynite-(Y), monazite-(Ce), allanite-(Ce). In apobasite hematite-sericite rocks, gramaccioliite-(Y) was found at the contact with metarhyolites. The composition of gramaccioliite-(Y), which is the richest in yttrium, —  $\text{Pb}_{0.91}(\text{Y}_{0.50}\text{Mn}_{0.45})_{\Sigma 0.95}(\text{Ti}_{13.13}\text{Fe}^{3+}_{6.25}\text{Zn}_{0.25})_{\Sigma 19.63}\text{O}_{38}$ . Associated minerals: muscovite, hematite, titanite, rutile, zircon and allanite-(Ce). Minerals of the crichtonite group are found in the contours of ore zones with vein gold-fuchsite mineralization, but they are localized not in ore veins, but in the rock matrix. The formation of minerals of the crichtonite group is associated with metamorphic processes in rhyolites and contacting basic rocks.

**Keywords:** almeidaite, crichtonite, senaite, gramaccioliite-(Y), aeschynite-(Y), rhyolites

#### Введение

Минералы группы кричтонита — сложные оксиды, которые описываются общей формулой:  $M_0M_1M_2M_3M_4M_5O_{38}$ , где  $M_0 = \text{Ba, K, Pb, Sr, La, Ce, Na, Ca}$ ;  $M_1 = \text{Mn}^{2+}, \text{Y, U, Fe}^{2+}, \text{Zr, Ca, Sc}$ ;  $M_2 = \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{Mg, Zn}$ ;  $M_3 = \text{Fe}^{3+}, \text{Cr, V, Mn}^{3+}, \text{Al}$ ; позиции  $M_4$  и  $M_5$  заняты преимущественно атомами Ti. Кричтониты характеризуются необычайным разнообразием состава. Номенклатура группы основана на комбинации доминирующих катионов в позициях. По преобладанию крупного катиона в позиции  $M_0$  (Sr, Pb, Ba, Ca, Na, K и REE) выделены восемь минеральных видов: кричтонит, сенаит, линдслейит, лаверингит, ландауит, матиасит, давидит-(La) и давидит-(Ce) соответст-

венно. Среди Sr-Pb-доминантных минералов выявлены минералы, различающиеся заполнением позиции  $M_1$ . У клейстонита  $(\text{Pb, Sr})(\text{U}^{4+}, \text{U}^{6+})(\text{Fe}^{2+}, \text{Zn})_2(\text{Ti, Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})_{18}(\text{O, OH})_{38}$  и мапиквириита  $(\text{Sr, Pb})(\text{Y, U})\text{Fe}_2(\text{Ti, Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{38}$  в позиции  $M_1$  преобладает уран, у дессоита-(Y)  $(\text{Sr, Pb})(\text{Y, U})(\text{Ti, Fe}^{3+})_{20}\text{O}_{38}$  — иттрий. По сочетанию Pb в  $M_0$ -позиции и Y в  $M_1$ -позиции выделен грамаччиолиит-(Y)  $(\text{Pb, Sr})(\text{Y, Mn})\text{Fe}_2(\text{Ti, Fe})_{18}\text{O}_{38}$ . Для альмейдаита характерно преобладание цинка в позиции  $M_2$ , его формула  $\text{Pb}(\text{Mn}^{2+}, \text{Y})\text{Zn}_2(\text{Ti, Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{36}(\text{O, OH})_2$ . По преобладанию ванадия и хрома в позиции  $M_3$  минеральными видами являются пазероит  $\text{PbMn}^{2+}(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{V}^{5+}, \text{Ti, Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{38}$  и сарановскит  $\text{SrCaFe}^{2+}_2(\text{Cr}_4\text{Ti}_2)\text{Ti}_{12}\text{O}_{38}$  (Расцветаева, 2020).

**Для цитирования:** Онищенко С. А., Тропников Е. М., Радаев В. А. Минералы группы кричтонита в метариолитах и апобазитовых породах на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2025. 7(367). С. 3–15. DOI: 10.19110/geov.2025.7.1

**For citation:** Onishchenko S. A., Tropnikov E. M., Radaev V. A. Minerals of the crichtonite group in metarhyolites and apobasite rocks at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals). Vestnik of Geosciences, 2025, 7(367), pp. 3–15, DOI: 10.19110/geov.2025.7.1



Минералы группы кричтонита выявлены в гидротермальных жилах, в норитах и анортозитах, в щелочных магматических породах, гранитных пегматитах и карбонатитах (Barkov, 2006; Барков, Никифоров, 2015; Карпов и др., 2016). Обычно эти минералы присутствуют в породах в незначительном количестве, но на месторождении Радий-Хилл (Австралия) давидит-(La) и давидит-(Ce) добывались для извлечения урана (Черников, 2012). Из многочисленных минералов группы кричтонита для наших целей представляют интерес геологические условия локализации альмейдаита и грамаччиолита-(Y).

Альмейдаит был открыт близ г. Нову-Оризонти в бразильском штате Баия. Черные пластинчатые кристаллы альмейдаита толщиной до 6 мм найдены в измененном даците в 2 м от кварцевой жилы. В ассоциации с альмейдаитом присутствуют кварц, рутил, анатаз, гематит, мусковит, ксенотим-(Y) и бастнезит-(La). Альмейдаит рассматривается как продукт реакции гидротермальных флюидов, которые образовали кварцевую жилу, с вмещающим дацитом (Menezes Filho et al., 2015).

Минерал, весьма близкий к альмейдаиту, был обнаружен в пегматитах штата Колорадо (США); описан под названием сенаита, обогащенного Zn и Y (Foord et al., 1984). Минерал находится в сростании с астрофиллитом, муратаитом и ксенотимом, ассоциирует с рибекитом и кварцем. От альмейдаита отличается высоким содержанием Y.

Альмейдаит, описанный как Zn-содержащий сенаит, был обнаружен в редкометалльных щелочных гранитах Халдзан-Бурэгтэга (Монгольский Алтай). Порода представляет собой микроклин-альбитовый гранит с пойкилокристаллами арфведсонита; альмейдаит находится в сростании с гематитом, флюоритом и кальциевым цирконосиликатом (Карташов и др., 1993).

Грамаччиолит-(Y) был открыт в кварцевых жилах в биотитовом гнейсе герцинского массива Аргентера (провинция Пьемонт, Италия). В ассоциации с ним отмечены альбит, мусковит, анатаз, брукит, рутил, фторапатит, ксенотим, пирит, минерал, сходный с синхизитом, и два других члена группы кричтонита, а именно дессаут-(Y) и сенаит. Иногда домены сенаита сосуществуют с грамаччиолитом-(Y) в одном и том же кристалле (Orlandi et al., 2004). Позднее грамаччиолит-(Y) был обнаружен на острове Самос в Греции. Минерал встречается в виде сантиметровых кристаллов в брекчированных метабокситах, ассоциирует с диапором, гематитом, мусковитом, хлоритоидом, кальцитом, рутилом, монацитом-(Ce), бастнезитом-(La) и паризитом-(Ce). Предполагается, что грамаччиолит-(Y) образовался при метаморфизме пород одновременно с хлоритоидом и диапором (Theye et al., 2010).

В рудовмещающих породах золотопалладиевого месторождения Чудное обнаружены минералы группы кричтонита: альмейдаит, кричтонит, сенаит и грамаччиолит-(Y). Целью работы является характеристика этих сложных Fe-Ti-оксидов, определение их роли в процессе минералообразования, соотношения с Au-Pd-оруденением.

## Геологическое строение

В геологическом отношении район относится к Центрально-Уральскому поднятию и северной части выделяющейся здесь крупной геологической структуры — Ляпинскому антиклинорию. Месторождение приурочено к осевой зоне Малдинской антиклинали, осложненной разрывными нарушениями. Ядро антиклинали сложено рифей-вендскими вулканогенными породами эффузивной и субвулканической фаций кислого и основного состава, а крылья — нижнепалеозойскими терригенными отложениями алькесвожской и обизской свит.

На площади месторождения Чудное распространены риолиты и породы основного состава рифей-вендского возраста, среди которых преобладают базальты, реже долериты (рис. 1). В виде самостоятельных тел отмечены андезиты, присутствующие как в базитах, так и риолитах. На докембрийских образованиях несогласно залегают кварцевые гравелиты, песчаники и сланцы алькесвожской свиты позднего кембрия — раннего ордовика, перекрывающиеся кварцитопесчаниками, конгломератами и гравелитами обизской свиты раннего ордовика.

В постордовикское время все породы Ляпинского антиклинория испытали метаморфизм зеленосланцевой фации. Метариолиты представлены массивными, флюидалными и брекчиевидными разностями редкопорфировой структуры, в различной степени расланцованными. Порфировые вкрапленники калиевого полевого шпата (замещенного альбитом) и кварца слагают от 3 до 10 % породы. Кварц-полевошпатовая цементирующая масса имеет микропойкилобластовую, изредка сферолитовую структуру, характерны струйчатые скопления серицита. В риолитах распространена мелкая вкрапленность гематита, акцессорные минералы представлены цирконом, апатитом, ильменитом, титанитом, рутилом, алланитом, монацитом. Риолиты характеризуются относительно стабильными содержаниями  $\text{SiO}_2$  (73–79 мас. %) и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (10–13 мас. %) при значительных вариациях в содержании щелочей, при этом  $\text{K}_2\text{O}$  чаще всего преобладает над  $\text{Na}_2\text{O}$ . Второстепенным компонентом риолитов является железо, содержание  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в среднем составляет 1.8 мас. %, FeO — около 1 мас. %. Базиты преобразованы в зеленые сланцы альбит-хлоритового состава с переменным количеством кварца, эпидота и актинолита, характерно наличие магнетита и минералов титана (титанита, ильменита, лейкоксена). Индикаторным является минеральный парагенезис (мусковит-биотит-альбит), характерный для сланцев, образованных по андезитам (Онищенко, Кузнецов, 2019), который соответствует биотитовой субфации зеленосланцевой фации регионального метаморфизма.

Вдоль разрывных нарушений риолиты преобразованы в кварц-серицитовые и серицитовые метасоматиты. В зонах контакта риолитов с базитами развиты породы альбит-кварцевого, альбит-кварц-серицитового и гематит-серицитового состава. В районе месторождения фиксируется также протяженная зона глиноземистых серицит-пиррофиллитовых и пиррофиллит-диапоровых пород, трассирующая зону разлома (рис. 1). По одним представлениям эти породы являются приразломными метасоматитами (Козырева и др., 2003), по другим — метаморфизованной верхне-

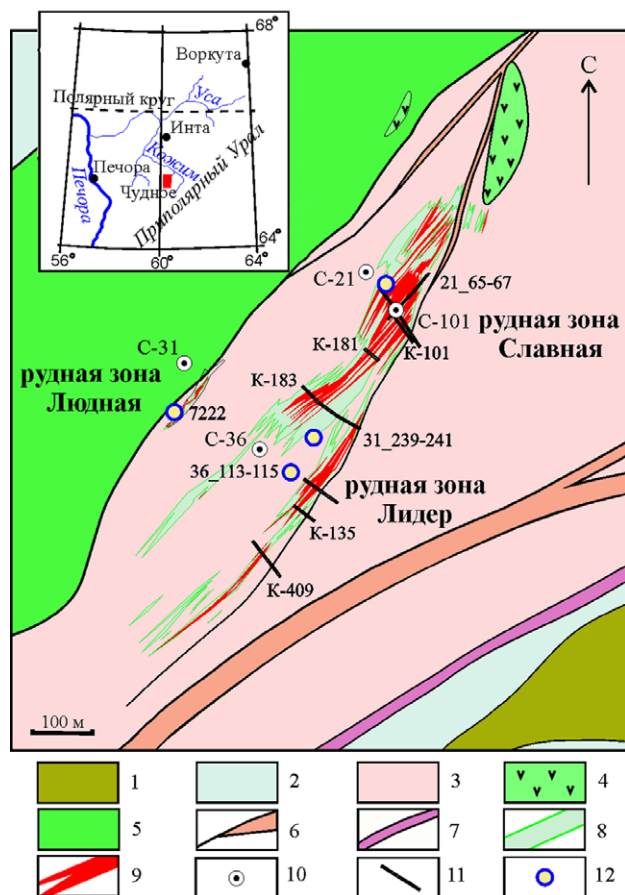


Рис. 1. Геологическая карта месторождения Чудное:

1 — обеизская свита (нижний ордовик): кварцитопесчаники, конгломераты, гравелиты; 2 — алькесвожская свита (верхний кембрий — нижний ордовик): гравелиты, песчаники с прослоями сланцев; 3 — риолиты; 4 — андезиты; 5 — базиты (базальты и долериты); 6, 7 — разрывные нарушения, вдоль которых распространены метасоматиты: 6 — кварц-серицитовые и серицитовые, 7 — диаспор-пиропфиллитовые; 8 — зоны фукситовой минерализации; 9 — рудные тела ( $\text{Au} > 1 \text{ г/т}$ ); 10 — скважины, 11 — каналы; 12 — места отбора образцов, содержащих минералы группы кричтонита

Fig. 1. Geological map of the Chudnoe deposit:

1 — Obeese Formation (Lower Ordovician): quartzite sandstones, conglomerates, gravelites; 2 — Alkesvozh Formation (Upper Cambrian — Lower Ordovician): gravelites, sandstones with shale layers; 3 — rhyolites; 4 — andesites; 5 — mafic rocks (basalts and dolerites); 6, 7 — faults along which metasomatites are distributed: 6 — quartz-sericite and sericite, 7 — diaspore-pyrophyllite; 8 — zones of fuchsite mineralization; 9 — orebodies ( $\text{Au} > 1 \text{ ppm}$ ); 10 — boreholes; 11 — trenches; 12 — sampling locations containing minerals of the crichtonite group

кембрийской линейной корой выветривания по рифей-вендским вулканитам (Озеров, 1996).

Золотое оруденение, относящееся к типу минерализованных прожилковых зон, приурочено к трещиноватым и брекчированным риолитам. Рудные зоны имеют северо-восточное простирание и крутое северо-западное падение. Золоторудные зоны Славная и Лидер протягиваются в центральной части месторождения, вблизи контакта риолитов с базитами расположена маломощная зона Людская.

Самородное золото и минералы палладия приурочены главным образом к прожилкам Cr-содержащего

мусковита (фуксита) в риолитах. Толщина фукситовых прожилков колеблется от долей миллиметра до 1–1.5 см. Фуксит представлен тонкочешуйчатыми агрегатами зеленого цвета, обычное содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в минерале 1–7 мас. %. Вместе с фукситом в прожилках присутствуют алланит, кварц, альбит, отмечаются кальцит, калиевый полевой шпат, титанит, апатит, цинкохромит и другие минералы. Золото образует в фуксите выделения чешуйчатой, уплощенной и неправильной форм, размер их варьирует от 1 мкм до 2 мм, крайне редко до 8 мм.

Самородное золото характеризуется значительными вариациями состава и строения. Содержание Au заключено в интервале от 65.8 до 92.7 мас. %, Ag — от 0.4 до 33.8 мас. %, почти всегда присутствует Cu — до 12.7 мас. % и Pd — до 2.9 мас. %, отмечается Hg (Тарбаев и др., 1996; Palyanova et al., 2021; Онищенко, Кузнецов, 2023). Самородное золото формировалось в виде гомогенного Au-Ag-Cu-твердого раствора при температуре выше 220 °C. При понижении температуры в зависимости от исходного состава твердый раствор остается гомогенным либо (при содержании Cu более 1.1–2.5 мас. %) распадается на две или три фазы. Матрица в структурах распада имеет Ag-Au-состав, пластинки соответствуют фазам  $\text{Au}_3\text{Cu}$  и  $\text{AuCu}$ .

Основные Pd-минералы месторождения — изомертиит/псевдомертиит  $\text{Pd}_{11}\text{Sb}_2\text{As}_2$  и мертиит  $\text{Pd}_8\text{Sb}_{2.5}\text{As}_{0.5}$ , второстепенные — атенит  $\text{Pd}_2(\text{As}_{0.75}\text{Hg}_{0.25})$  и неназванный минерал  $\text{Pd}_6\text{BiSe}$ , отмечается Pt-минерал — сперрилит  $\text{PtAs}_2$  (Онищенко, Кузнецов, 2024).

Вопросы датирования Au-Pd-оруденения месторождения Чудное рассмотрены в работе А. В. Козлова с соавторами (2024). Основываясь на результатах изотопно-геохронологических исследований с учетом особенностей геологического развития Приполярного Урала, авторы связывают образование месторождения Чудное с кембрийским этапом эндогенной активизации (около 500 млн лет), который соответствует началу рифтогенной стадии уралид.

По заключению В. Л. Андреичева (2010), в постордовикское время все породы Ляпинского антиклинария испытали зеленосланцевый метаморфизм (400 млн лет) и однофазальный диафорез (250 млн лет). К последнему рубежу приурочены большинство K-Ar-датировок пород, а также Rb-Sr-изохронные возрасты по минералам из некоторых гранитных массивов.

На месторождении Чудное датировка около 249 млн лет получена Rb-Sr-методом по изохроне, построенной на результатах анализа проб альбита, фуксита, мусковита и риолита (Кузнецов, Андреичев, 1998).

Датирование фуксита месторождения Чудное методом  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  по двум пробам из рудной зоны Славной показало возраст 254 и 265 млн лет. Обе датировки интерпретируются как гидротермально-метасоматические события, наложившиеся на фуксит с переустановкой изотопной системы Ar. Появление высокотемпературных ступеней на спектре кажущихся возрастов дало основание предполагать, что фуксит древнее 300 млн лет (Моралев и др., 2005а).

Таким образом, Rb-Sr-изохронный возраст (249 млн лет) и  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -возраст (254 и 265 млн лет) отражают этап метаморфических преобразований пород месторождения Чудное в целом и золотофукситовых прожилков в частности.



## Материал и методы исследований

Строение и минеральный состав пород изучались в керне скважин, в петрографических шлифах, в полированных шлифах руд и концентратов тяжелых минералов, монтированных в эпоксидной смоле. Минералы группы кричтонита обнаружены в метариолитах при изучении тяжелых электромагнитных фракций, полученных из измельченного до 1 мм материала керновых проб 21\_65-67, 31\_239-241, 36\_113-115 (номер скважины и интервал опробования в м) и в апобазитовых породах из зоны контакта риолитов и базитов (обр. 7222).

Лабораторные исследования проведены в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН. Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром X-Max 50 Oxford Instruments (оператор Е. М. Тропников) и электронном микроскопе KYKY EM-6900 с энергодисперсионным спектрометром Xplore 30 Oxford Instruments (оператор В. А. Радаев). Напряжение 20 кВ, диаметр электронного зонда 1 мкм. Время набора спектров составляло 60–80 сек (600 тыс. импульсов). Эталоны — чистые металлы для Au, Ag, Pd, Fe, Cr, Zn, Ti, Mn, Y, V, Nb и Sn, PbTe для Pb, SrF<sub>2</sub> для Sr, KBr для K, альбит для Na, LaB<sub>6</sub> для La, CeO<sub>2</sub> для Ce, ThO<sub>2</sub> для Th, волластонит для Ca, MgO для Mg, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для Al. Погрешность определения (мас. %): PbO — 0.2, SrO — 0.15, ZnO — 0.15, MnO — 0.1, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 0.2.

Коэффициенты в формулах минералов (далее  $k_f = arfu$ ) группы кричтонита рассчитывались на 38 атомов кислорода, все железо считалось трехвалентным. Основанием для этого послужили результаты изучения альмейдаита, в котором, по данным мессбауэровской спектроскопии, почти все железо находится в трехвалентном состоянии (Menezes Filho et al., 2015).

В связи с небольшими размерами зерен монацита, заключенных в альмейдаите, при микронзондовом анализе в некоторых случаях захватывается материал матрицы. Компоненты, содержащиеся во вмещающем минерале (TiO<sub>2</sub> до 1.5, FeO до 0.7 мас. %), а также эквивалентное количество SrO (до 0.08 мас. %) вычтены из первичных результатов анализов монацита, сумма компонентов в этих анализах приведена к 100 мас. %. Формула монацита рассчитывалась на 4 атома кислорода.

Расчет содержаний FeO и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в алланите выполнен на 8 катионов и 25 положительных зарядов (Armbruster et al., 2006). Формула оксидов Y-Ti-Nb-состава рассчитывалась на 3 катиона.

## Результаты

Минералы группы кричтонита на месторождении Чудное обнаружены в двух геологических обстановках: в метариолитах и в значительно преобразованных базитах на контакте с риолитами (рис. 1). Состав минералов варьирует; в метариолитах преимущественно распространены разновидности, близкие к альмейдаиту, для апобазитовых гематит-серицитов пород более характерны минералы, близкие к грамаччиолииту-(Y). Минералы группы кричтонита ассоциируют с рядом REE-минералов, с некоторыми из них находятся в сростании.

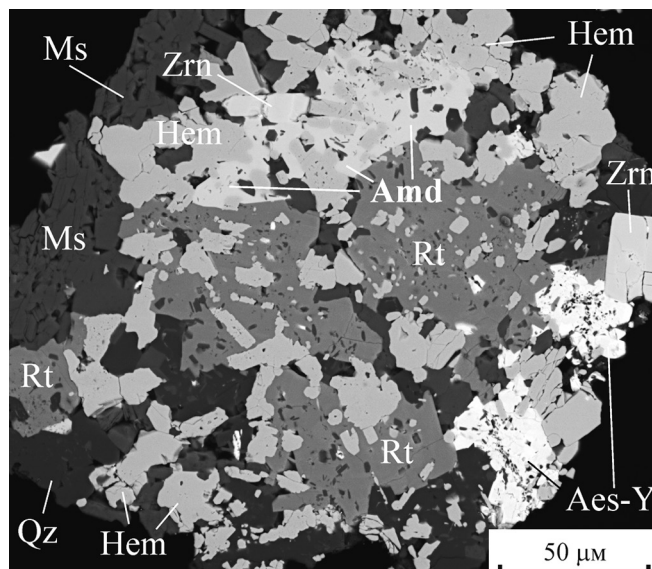
## Минералы группы кричтонита

Метариолиты представляют собой темно-лиловые, серые и светло-оливковые полосчатые породы, рассланцованные, местами брекчированные, в некоторых случаях содержащие прожилки кварца.

В метариолитах минералы группы кричтонита присутствуют в виде изометричных или удлиненных зерен размером от 20 до 250 мкм; находятся в сростании с мусковитом, калиевым полевым шпатом, гематитом, монацитом, рутилом, цирконом, альбитом, кварцем (рис. 2). Кроме того, в этих породах отмечаются сложные оксиды Y-Ti-Nb-состава и алланит. Для минералов группы кричтонита характерен черный цвет и раковистый излом, в сколе они напоминают ильменит. Отражение в видимом свете заметно ниже, чем у гематита, примерно соответствует рутилу, внутренние рефлексии не наблюдались, минералы изотропны, что, видимо, является следствием их метамиктного преобразования, в крупных зернах проявлены концентрические трещины. В отраженных электронах минералы более светлые по сравнению с гематитом.

В составе минералов группы кричтонита преобладают TiO<sub>2</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, содержания PbO, SrO, ZnO, MnO и Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> испытывают колебания, отражая изоморфные замещения в соответствующих позициях структуры. Составы минералов заключены между альмейдаитом, кричтонитом и сенаитом. Минеральные зерна могут иметь относительно выдержанный состав, но чаще отмечаются его вариации, свидетельствующие о неоднородном строении, что хорошо заметно в отраженных электронах, особенно при повышенном контрасте.

К альмейдаиту отнесены разновидности с преобладанием Pb над Sr и содержанием Zn, превышающим



**Рис. 2.** Альмейдаит в перекристаллизованном риолите (отраженные электроны). Полированный шлиф 21\_65-67. Amd — альмейдаит, Hem — гематит, Rt — рутил, Zrn — циркон, Aes-Y — эшинит-(Y), Ms — мусковит, Qz — кварц  
**Fig. 2.** Almeidaite in recrystallized rhyolite BSE image. Polished section 21\_65-67. Amd — almeidaite, Hem — hematite, Rt — rutile, Zrn — zircon, Aes-Y — aeschnite-(Y), Ms — muscovite, Qz — quartz





1.00 в коэффициенте в формуле минерала (кф) (Расцветаева и др., 2014; Menezes Filho et al., 2015). Альмейдаитом являются мелкие зерна в полиминеральном агрегате перекристаллизованного риолита (рис. 2, табл. 1, ан. 1, 2). Наиболее высокое содержание цинка (1.23 кф Zn, 5.4 мас. % ZnO) отмечено в одном из зерен (табл. 1, ан. 3), в другой части зерна содержание Zn ниже (1.06 кф), при этом Sr преобладает над Pb.

Зерна промежуточного состава между альмейдаитом и кричтонитом, в которых содержание Zn превышает 1.00 кф, но Sr преобладает над Pb, довольно

распространены (рис. 3, б, табл. 1, ан. 4, 5). К **кричтониту** относятся участки таких зерен, в которых Sr преобладает над Pb, но содержание Zn меньше 1.00 кф (рис. 3, б, табл. 1, ан. 6).

Промежуточный состав между альмейдаитом и кричтонитом наблюдается в зерне (рис. 3, а), в котором, по данным четырех анализов, Sr (0.40–0.57 кф) преобладает над Pb (0.20–0.37 кф), при этом в трех точках содержание Zn немного превышает 1 кф, а в одной оно меньше единицы (0.83 кф), т. е. соответствует кричтониту. Во всех анализах зерна фиксируется примесь  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0.8–1.2 мас. %).

**Таблица 1.** Состав минералов группы кричтонита (мас. %)   
 **Table 1.** Composition of minerals of the crichtonite group (wt. %)

| Оксид<br>Oxide          | 1     | 2     | 3     | 4      | 5      | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|-------------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PbO                     | 8.70  | 8.26  | 5.33  | 5.44   | 4.50   | 2.83  | 5.25  | 10.73 | 10.61 | 10.87 | 9.89  | 6.98  |
| SrO                     | 1.01  | 1.06  | 2.12  | 2.78   | 2.97   | 3.59  | 1.96  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 2.08  |
| CaO                     | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.22  | 0.0   |
| ZnO                     | 4.87  | 4.64  | 5.39  | 5.28   | 5.03   | 3.77  | 3.29  | 1.02  | 1.05  | 0.96  | 1.24  | 2.21  |
| MnO                     | 1.46  | 1.44  | 2.46  | 2.05   | 2.62   | 1.72  | 3.97  | 1.56  | 1.68  | 1.80  | 1.11  | 1.53  |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 18.80 | 22.06 | 21.47 | 20.16  | 19.74  | 23.69 | 24.60 | 26.33 | 26.11 | 26.22 | 18.30 | 24.83 |
| $\text{Y}_2\text{O}_3$  | 2.20  | 2.66  | 1.83  | 2.07   | 1.38   | 2.67  | 0.0   | 2.80  | 2.92  | 2.74  | 2.56  | 2.54  |
| $\text{Yb}_2\text{O}_3$ | 0.43  | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.75  | 0.0   |
| $\text{UO}_2$           | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 2.05  | 0.0   |
| $\text{Cr}_2\text{O}_3$ | 0.33  | 0.19  | 0.0   | 0.0    | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| $\text{TiO}_2$          | 59.23 | 56.43 | 58.63 | 62.46  | 63.62  | 60.71 | 58.81 | 54.65 | 54.85 | 54.69 | 58.91 | 55.02 |
| $\text{SnO}_2$          | 1.04  | 0.65  | 0.0   | 0.37   | 0.22   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| $\text{V}_2\text{O}_5$  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.46  | 0.0   | 0.42  | 0.0   | 0.69  |
| $\text{Nb}_2\text{O}_5$ | 0.34  | 0.49  | 0.0   | 0.55   | 0.52   | 0.26  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| $\Sigma$                | 98.41 | 97.88 | 97.23 | 101.16 | 100.60 | 99.24 | 97.88 | 97.55 | 97.22 | 97.70 | 95.03 | 95.88 |

Коэффициенты в формуле (O = 38) / Coefficient in formula (O = 38)

|    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pb | 0.73  | 0.70  | 0.44  | 0.43  | 0.36  | 0.23  | 0.43  | 0.92  | 0.91  | 0.93  | 0.86  | 0.60  |
| Sr | 0.18  | 0.19  | 0.38  | 0.48  | 0.51  | 0.62  | 0.35  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.38  |
| Ca | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.08  | 0.0   |
| Zn | 1.12  | 1.08  | 1.23  | 1.16  | 1.10  | 0.83  | 0.74  | 0.24  | 0.25  | 0.23  | 0.30  | 0.52  |
| Mn | 0.39  | 0.38  | 0.65  | 0.52  | 0.65  | 0.43  | 1.03  | 0.42  | 0.45  | 0.48  | 0.30  | 0.41  |
| Fe | 4.42  | 5.22  | 5.01  | 4.50  | 4.38  | 5.31  | 5.65  | 6.30  | 6.25  | 6.27  | 4.45  | 5.94  |
| Y  | 0.37  | 0.45  | 0.30  | 0.33  | 0.22  | 0.42  | 0.00  | 0.47  | 0.50  | 0.46  | 0.44  | 0.43  |
| Yb | 0.04  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.07  | 0.0   |
| U  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.17  | 0.0   |
| Cr | 0.08  | 0.05  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| Ti | 13.91 | 13.36 | 13.67 | 13.94 | 14.12 | 13.60 | 13.49 | 13.06 | 13.13 | 13.07 | 14.33 | 13.16 |
| Sn | 0.13  | 0.08  | 0.0   | 0.04  | 0.03  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| V  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.10  | 0.0   | 0.09  | 0.0   | 0.14  |
| Nb | 0.05  | 0.08  | 0.0   | 0.08  | 0.08  | 0.04  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |

*Примечания:* 1–3 — альмейдаит; 4–6 — зерно неоднородного строения (рис. 3, б); 4–5 — альмейдаит-кричтонит, 6 — кричтонит; 7 — сенайт; 8–11 — зерна неоднородного строения (рис. 4); 8, 9, 11 — грамаччиолиит-(Y), 10 — грамаччиолиит-(Y)-сенайт; 12 — грамаччиолиит-(Y) (Козырева, Швецова, 2010)

*Notes:* 1–3 — almeidaite; 4–6 — grains of heterogeneous structure (Fig. 3, b); 4–5 — almeidaite-crichtonite, 6 — crichtonite; 7 — senaite; 8–11 — grains of heterogeneous structure (Fig. 4); 8, 9, 11 — gramaccioliite-(Y), 10 — gramaccioliite-(Y)-senaite; 12 — gramaccioliite-(Y) (Kozyreva, Shvetsova, 2010)

Изменчивость состава проявлена также в зерне (рис. 3, с), в котором, по данным двух анализов, Pb (0.43–0.48 кф) преобладает над Sr (0.31–0.40 кф), при этом в одной точке содержание Zn составляет 1.11 кф, что соответствует альмейдаиту, во второй содержание Zn составляет 0.86 кф, что отвечает промежуточному составу между альмейдаитом и сенаитом.

Сенаитовая составляющая, обусловленная наличием марганца, присутствует во всех зернах, но собственно **сенаит**, в котором содержание Mn более 1 кф в случае преобладания Pb над Sr, зафиксирован в одном из зерен пробы 36\_113-115 (табл. 1, ан. 7). Следует отметить, что и в этом случае состав зерна размером 100 мкм не отличается стабильностью, в другой его части минерал является промежуточным между альмейдаитом, кричтонитом и сенаитом. В этой же пробе отмечены зерна, содержащие 0.79–0.98 кф Mn, приближающиеся к составу сенаита.

Апобазитовые гематит-серицитовые породы распространены в зонах контакта с метариолитами. Минералы группы кричтонита обнаружены в маломощных (3–10 см), линзах гематит-серицитовых пород, заключенных в риолитах. Для пород характерно высокое содержание титана, железа и калия (проба 7222, мас. %):  $\text{SiO}_2$  – 37.70,  $\text{TiO}_2$  – 5.80,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 21.80,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 18.81, FeO – 1.30, MnO – 0.05, MgO – 0.65, CaO – 1.48,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0.23,  $\text{K}_2\text{O}$  – 8.10,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0.17, п.п.п – 3.45, сумма – 99.54.

Минералы группы кричтонита образуют в сериците вкрапленность зерен угловато-изометричной формы размером 15–40 мкм, сопутствующие минералы представлены гематитом, титанитом, рутилом, алланитом. Обычно выделения минералов группы кричтонита имеют неоднородное строение, центральная часть выглядит темнее в видимом свете и отраженных электронах и, кроме того, в ней часто отмеча-

ются включения мусковита (рис. 4). По химическому составу периферическая часть выделений соответствует грамаччиолииту-(Y) со значительной долей сенаитовой составляющей. Для грамаччиолиита характерно доминирование свинца, занимающего позицию M0 в структуре минерала, и преобладание Y над Mn, занимающих позицию M1 (Orlandi et al., 2004). Грамаччиолииту-(Y) соответствуют ан. 8 и 9 (табл. 1), в ан. 10 марганца больше, чем иттрия, что свидетельствует о преобладании сенаитовой составляющей в минерале.

Центральная часть выделений грамаччиолиита-(Y) отличается неоднородным строением и наличием урана в составе фаз, темные в отраженных электронах участки имеют высокое содержание титана (до 70 мас. %  $\text{TiO}_2$ ) и характеризуются низкой суммой элементов (рис. 4, b). Более светлые участки имеют состав U-содержащего грамаччиолиита-(Y) (табл. 1, ан. 11).

Ранее грамаччиолиит-(Y) в районе месторождения был обнаружен в аналогичных гематит-серицитовых сланцах, приуроченных к контактовой зоне между риолитами и базитами (Козырева, Швецова, 2010). Состав минерала отличается наличием Sr (табл. 1, ан. 12).

#### Ассоциирующие минералы

Минералы группы кричтонита в метариолитах ассоциируют с мусковитом, гематитом, рутилом, цирконом и минералами редкоземельных элементов (REE), среди которых отмечены эшинит-(Y), монацит-(Ce) и алланит-(Ce).

**Эшинит-(Y)**, сложный оксид Y-Ti-Nb-состава, характеризуется варьирующими соотношениями между Ti и Nb. Состав минерала неплохо рассчитывается на формулу  $(Y, \text{REE})(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_4$ , среди REE преобладают тяжелые лантаноиды (табл. 2, ан. 1–5).

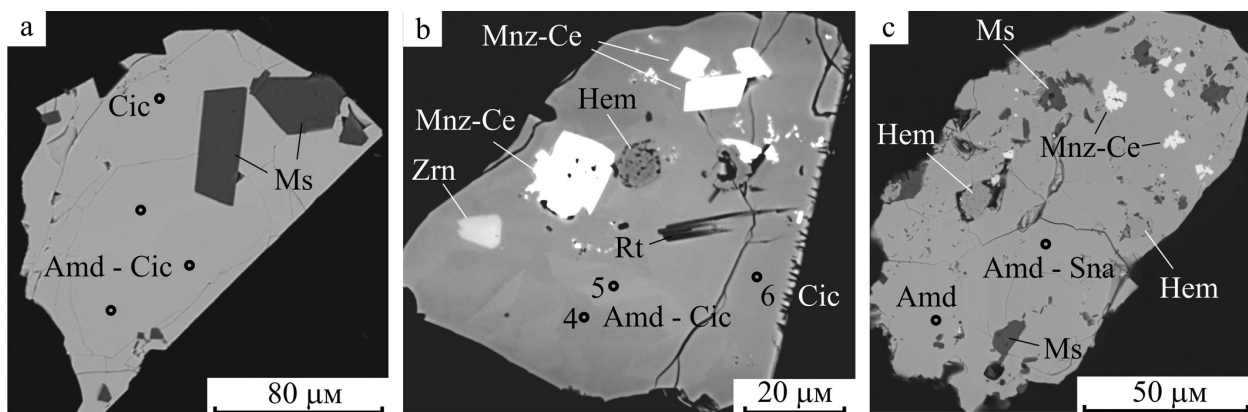
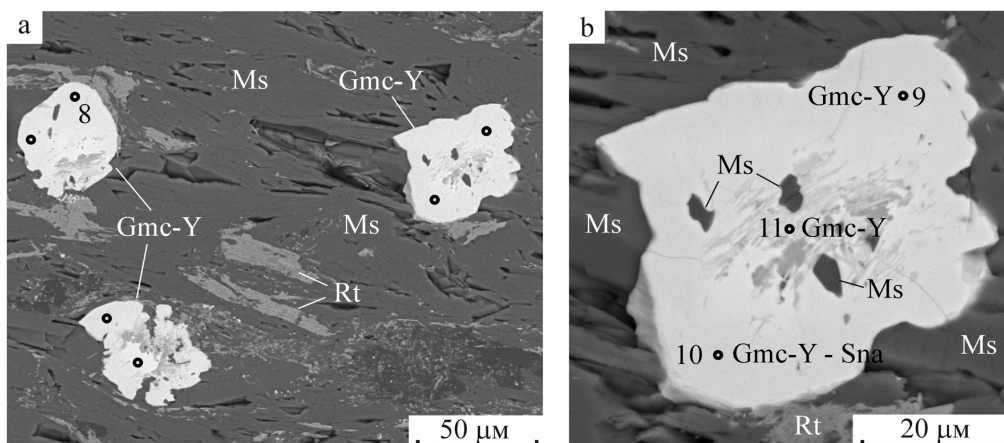


Рис. 3. Альмейдаит-кричтонит-сенаит (вариации состава и минеральные включения):

а — зерно альмейдаит-кричтонитового состава с идиоморфными кристаллами мусковита; б — зерно альмейдаит-кричтонитового состава с включениями циркона, монацита и гематита; с — зерно альмейдаит-сенаитового состава с включениями монацита, гематита и мусковита. Обозначены точки анализов, цифры на рис. 3, б соответствуют номеру анализа в табл. 1. Изображения в отраженных электронах. Полированный шлиф 21\_65-67. Amd — альмейдаит, Cic — кричтонит, Sna — сенаит, Mnz-Ce — монацит-(Ce), Hem — гематит, Zrn — циркон, Rt — рутил, Ms — мусковит

Fig. 3. Almeidaite-crichtonite-senaite: composition variations and mineral inclusions:

а — grain of almeidaite-crichtonite composition with idiomorphic crystals of muscovite; б — grain of almeidaite-crichtonite composition with inclusions of zircon, monazite and hematite; с — grain of almeidaite-senaite composition with inclusions of monazite, hematite and muscovite. The analysis points are indicated, the numbers in Fig. b correspond to the analysis number in Table 1. BSE images. Polished section 21\_65-67. Amd — almeidaite, Cic — crichtonite, Sna — senaite, Mnz-Ce — monazite-(Ce), Hem — hematite, Zrn — zircon, Rt — rutile, Ms — muscovite



**Рис. 4.** Грамаччиолиит-(Y) в серицитовом агрегате (a) и детали его строения (b):

Изображения в отраженных электронах. Полированный шлиф 7222. Gmc-Y — грамаччиолиит-(Y), Sna — сенаит, Rt — рутил, Ms — мусковит. Обозначены точки анализов, цифры соответствуют номерам анализов в табл. 1

**Fig. 4.** Gramaccioliite-(Y) in sericite aggregate (a) and details of its structure (b):

The analysis points are indicated, the numbers correspond to the analysis number in Table 1. BSE images. Polished section 7222. Gmc-Y — gramaccioliite-(Y), Sna — senaite, Rt — rutile, Ms — muscovite

В ассоциации с альмейдаитом эшинит-(Y) обнаружен в перекристаллизованном риолите (рис. 2). В отраженных электронах выглядит ярким, в отраженном видимом свете — темнее рутила. Содержание  $Y_2O_3$  составляет 23.7 мас. %,  $Nb_2O_5$  — 3.6 мас. %,  $TiO_2$  — 47.0 мас. % (табл. 2, ан. 1).

Единичные зерна эшинита-(Y) присутствуют в той же пробе метариолита, где обнаружены минералы группы кричтонита. Для эшинита-(Y) характерно неоднородное строение, хорошо заметное в отраженных электронах при повышенном контрасте (рис. 5, a). Вариации состава значительны (мас. %):  $Y_2O_3$  — 12.9–22.8,  $Nb_2O_5$  — 13.9–17.4,  $ThO_2$  — 3.2–11.2,  $TiO_2$  — 32.8–40.2 (табл. 2, ан. 2–5). Наиболее яркой в отраженных электронах разности эшинита-(Y) соответствует высокое содержание  $ThO_2$ . Ранее под названием поликраз-(Y) сложный оксид Y-Ti-Nb-состава указывался в риолитах рудной зоны Славной (мас. %):  $Y_2O_3$  — 12.0,  $Nb_2O_5$  — 5.2,  $TiO_2$  — 45.9,  $ThO_2$  — 1.7 (Моралев и др., 2005б).

**Монацит-(Ce)** встречается в сростании с минералами группы кричтонита, по отношению к которым в некоторых случаях отчетливо идиоморфен (рис. 3, b), в других случаях этого не наблюдается (рис. 3, c). В концентратах тяжелых минералов встречается также в виде сростков кристаллов (рис. 5, b). Состав довольно постоянен, эпизодически фиксируются примеси As и S, замещающие фосфор в структуре минерала (табл. 3). Монацит является распространенным REE-минералом в метариолитах, отмечается в золотофукситовых прожилках (Моралев и др., 2005б; Онищенко и др., 2024).

**Алланит-(Ce)** является наиболее распространенным REE-минералом в метариолитах, часто встречается в золотофукситовых прожилках (Тарбаев и др., 1995; Моралев и др., 2005б; Онищенко и др., 2024). В пробах метариолитов, содержащих минералы группы кричтонита, алланит также присутствует, но их совместных сростаний не обнаружено. Алланит имеет неоднородное строение, хорошо заметное в отраженных электронах. Нередко в зернах алланита проявляются элементы зонального строения. Так, в зернах алланита, заключенных в мусковитовой массе, от-

носительно светлая центральная часть сменяется более темной краевой частью и окружается узкой светлой периферической каймой (рис. 5, c; табл. 4, ан. 1–3). Неоднородное строение алланита ярко проявлено в зерне (рис. 5, d; табл. 4, ан. 4–5). Более светлые в отраженных электронах зоны имеют более высокие содержания REE. Все разности алланита-(Ce) содержат заметную долю эпидотовой составляющей, которая проявляется в повышенном содержании кальция и наличии трехвалентного Fe.

**Рутил** содержит 0.5–2.0 мас. %  $Nb_2O_5$  и до 1.5 мас. % FeO. Для **гематита** характерна примесь  $TiO_2$  (1.3–5.0, иногда до 10.9 мас. %), изредка отмечается  $Cr_2O_3$  (до 0.4 мас. %).

Минералы группы кричтонита в *апобазитовых гематит-серицитовых породах* ассоциируют с мусковитом, гематитом (2 мас. %  $TiO_2$ ), титанитом, рутилом ( $Nb$  не обнаружен) цирконом и алланитом-(Ce). Зерна последнего размером до 150 мкм содержат обычно многочисленные включения чешуек мусковита (табл. 4, ан. 6).

## Обсуждение результатов

Минералы группы кричтонита в риолитах месторождения Чудное выявлены в контурах рудных зон с прожилковой золотофукситовой минерализацией. Как отмечалось выше, изучался измельченный материал керновых проб, поэтому в монтированных полированных шлифах совместно присутствуют как обломки вмещающих метариолитов, так и золотоносных прожилков. Минералы группы кричтонита приурочены к матрице пород, поскольку они находятся в сростании с породообразующими минералами метариолитов: мусковитом, калиевым полевым шпатом, гематитом, монацитом, рутилом, цирконом, альбитом, кварцем. Напротив, в золотоносных фукситсодержащих прожилках, изученных в полированных шлифах по всему месторождению, минералы группы кричтонита не обнаружены.

Самородное золото, присутствующее в пробах метариолитов наряду с минералами группы кричтонита,





**Таблица 2.** Состав эшинита-(Y) в метариолитах (мас. %)  
**Table 2.** Composition of aeschynite-(Y) in metarhyolites (wt. %)

| Оксид<br>Oxide                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 23.65 | 22.75 | 15.46 | 12.93 | 17.25 | 13.62 | 11.28 | 16.70 | 20.12 | 19.36 | 20.18 | 18.64 |
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.0   | 0.36  | 1.44  | 2.33  | 1.14  | 2.33  | 7.88  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 1.07  | 0.97  |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.53  | 2.31  | 3.21  | 7.71  | 4.69  | 4.35  | 7.60  | 2.41  | 2.16  | 0.78  | 2.41  | 2.92  |
| Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.44  | 1.69  | 2.07  | 3.18  | 2.21  | 2.44  | 3.68  | 2.18  | 1.90  | 1.39  | 1.82  | 2.38  |
| Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.78  | 3.02  | 3.29  | 3.94  | 3.49  | 3.50  | 3.90  | 3.76  | 4.20  | 3.85  | 3.26  | 4.30  |
| Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.09  | 0.62  | 0.0   | 0.67  | 0.66  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 1.04  |
| Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.26  | 4.18  | 3.25  | 3.18  | 3.74  | 3.60  | 3.01  | 3.58  | 5.10  | 5.50  | 3.99  | 6.07  |
| Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.86  | 0.48  | 0.53  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.96  | 1.08  | 1.54  |
| Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2.24  | 2.15  | 1.77  | 1.20  | 1.41  | 1.89  | 0.0   | 1.86  | 2.77  | 2.68  | 2.07  | 2.57  |
| Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.76  | 1.39  | 0.98  | 0.62  | 0.79  | 1.23  | 0.0   | 0.0   | 1.58  | 1.77  | 1.24  | 1.57  |
| ThO <sub>2</sub>               | 0.0   | 3.16  | 11.17 | 7.43  | 5.27  | 0.0   | 1.56  | 10.81 | 1.46  | 2.01  | 2.27  | 0.0   |
| UO <sub>2</sub>                | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 9.01  | 0.0   | 1.35  | 2.02  | 3.06  | 2.52  | 1.91  |
| CaO                            | 0.0   | 0.26  | 0.51  | 0.46  | 0.34  | 0.69  | 1.04  | 0.0   | 0.0   | 0.15  | 0.25  | 1.25  |
| TiO <sub>2</sub>               | 47.03 | 40.22 | 32.84 | 37.69 | 37.93 | 39.69 | 44.48 | 39.16 | 40.65 | 38.00 | 43.28 | 42.78 |
| Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 3.64  | 14.09 | 17.44 | 13.88 | 15.84 | 9.02  | 6.97  | 12.43 | 10.95 | 13.52 | 7.2   | 6.42  |
| Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.89  | 1.08  | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| WO <sub>3</sub>                | 0.81  | 0.79  | 2.27  | 0.0   | 0.0   | 1.15  | 0.0   | 0.0   | 3.09  | 1.37  | 1.07  | 1.03  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.23  | 0.57  | 0.82  | 0.32  | 0.41  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.49  | 0.51  | 0.49  |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.0   | 0.0   | 0.53  | 0.0   | 0.0   | 0.57  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.65  | 0.0   | 0.0   | 0.31  | 0.35  | 0.82  | 1.65  | 0.0   | 0.0   | 0.35  | 0.52  | 0.40  |
| Σ                              | 96.97 | 98.04 | 97.58 | 95.85 | 95.52 | 93.91 | 93.05 | 95.13 | 97.08 | 95.24 | 94.74 | 96.28 |

Коэффициенты в формуле (3 катиона) / Coefficients in formula (3 cations)

|    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Y  | 0.65 | 0.65 | 0.49 | 0.40 | 0.52 | 0.42 | 0.33 | 0.52 | 0.60 | 0.58 | 0.59 | 0.53 |
| Ce | 0.0  | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 0.05 | 0.16 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.02 |
| Nd | 0.05 | 0.04 | 0.07 | 0.16 | 0.09 | 0.09 | 0.15 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.05 | 0.06 |
| Sm | 0.04 | 0.03 | 0.04 | 0.06 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.03 | 0.04 |
| Gd | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.08 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.06 | 0.08 |
| Tb | 0.02 | 0.01 | 0.0  | 0.01 | 0.01 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.02 |
| Dy | 0.09 | 0.07 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.05 | 0.07 | 0.09 | 0.10 | 0.07 | 0.11 |
| Ho | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| Er | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.0  | 0.03 | 0.05 | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| Yb | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.0  | 0.0  | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.03 |
| Th | 0.0  | 0.04 | 0.15 | 0.10 | 0.07 | 0.0  | 0.02 | 0.14 | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.0  |
| U  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.12 | 0.0  | 0.02 | 0.02 | 0.04 | 0.03 | 0.02 |
| Ca | 0.0  | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.0  | 0.0  | 0.01 | 0.02 | 0.07 |
| Ti | 1.83 | 1.63 | 1.45 | 1.63 | 1.61 | 1.72 | 1.83 | 1.72 | 1.70 | 1.62 | 1.78 | 1.74 |
| Nb | 0.09 | 0.34 | 0.46 | 0.36 | 0.40 | 0.23 | 0.17 | 0.33 | 0.27 | 0.35 | 0.18 | 0.16 |
| Ta | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.01 | 0.02 | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| W  | 0.01 | 0.01 | 0.04 | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.0  | 0.0  | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.01 |
| Fe | 0.05 | 0.02 | 0.04 | 0.01 | 0.02 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.02 | 0.02 |
| V  | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| Si | 0.03 | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.02 | 0.05 | 0.09 | 0.0  | 0.0  | 0.02 | 0.03 | 0.02 |

Примечания: ан. 1 — рис. 2, ан. 2—5 соответствуют точкам анализа на рис. 5, а.

Notes: an. 1 — Fig. 2, an. 2—5 correspond to the analysis points in Fig. 5, a.



довольно разнообразно. В пробе 31\_239-241 (рудная зона Лидер) самородное золото медистое, содержит 7.8–12.7 мас. % Cu, 0.4–6.0 мас. % Ag и до 2.3 мас. % Pd, испытывает распад на фазы  $\text{Au}_3\text{Cu}$  +  $\text{AuCu}$  +  $\text{Au-Ag}$ . В пробе 36\_113-115 (рудная зона Лидер) самородное золото имеет гомогенное строение, по составу серебристое, интервал содержаний Ag — 6.4–21.5, Cu до 2.1, Pd до 0.8 мас. % (Онищенко, Кузнецов, 2023). В пробе 21\_65-67 (рудная зона Славная) преобладающая часть самородного золота имеет гомогенное строение, содержит (мас. %): Ag — 11.8–13.4, Cu — до 0.5, Pd — до 0.9. Единичные частицы гомогенного строения содержат 2.8 мас. % Cu. В частице золота, содержащей 3.2 мас. % Cu, происходит распад твердого раствора с образованием тонких пластинок фазы  $\text{AuCu}$  в матрице, содержащей 2.4 мас. % Cu.

Гематит-серицитовые породы, в которых обнаружен грамаччиолиит, находятся в контуре рудной зоны

Людная, самородное золото приурочено к фукситовым прожилкам в риолитах, гематит-серицитовые породы золота не содержат.

Минералы группы кричтонита — сложные Ti-Fe-оксиды, минеральный вид в которых определяются соотношениями между Pb и Sr, а также между Zn, Mn и Y. Выделяются альмейдаит, кричтонит, сенаит и грамаччиолиит-(Y), многие зерна имеют промежуточный состав, кроме того, во многих зернах отмечена неоднородность состава. Следует отметить, что в некоторых случаях состав минералов находится вблизи границ между видами и его название зависит от точности анализа. В этом отношении интересен состав альмейдаита (табл. 1, ан. 2), в нем иттрия чуть больше, чем марганца, т. е. намечается переход к альмейдаиту-(Y).

Образование грамаччиолиита-(Y) в гематит-серицитовых породах вполне определенно трактуется как порфириобластез (рис. 4). Закономерности образования

Таблица 3. Состав монацита (мас. %)

Table 3. Composition of monazite (wt. %)

| Оксид<br>Oxide          | 1     | 2     | 3     | 4      | 5     |
|-------------------------|-------|-------|-------|--------|-------|
| $\text{La}_2\text{O}_3$ | 15.23 | 17.36 | 14.71 | 16.98  | 14.59 |
| $\text{Ce}_2\text{O}_3$ | 30.41 | 31.53 | 30.90 | 31.77  | 29.47 |
| $\text{Pr}_2\text{O}_3$ | 4.30  | 3.87  | 4.72  | 4.47   | 3.17  |
| $\text{Nd}_2\text{O}_3$ | 14.03 | 12.88 | 16.22 | 14.97  | 13.19 |
| $\text{Sm}_2\text{O}_3$ | 1.90  | 1.63  | 1.97  | 1.75   | 2.11  |
| $\text{Gd}_2\text{O}_3$ | 0.85  | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 1.10  |
| $\text{ThO}_2$          | 0.35  | 0.33  | 0.0   | 0.0    | 1.03  |
| $\text{Y}_2\text{O}_3$  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0    | 1.19  |
| CaO                     | 0.97  | 0.91  | 0.46  | 0.48   | 0.73  |
| SrO                     | 0.59  | 0.36  | 0.0   | 0.0    | 1.13  |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 27.84 | 28.27 | 28.68 | 29.72  | 29.06 |
| $\text{As}_2\text{O}_5$ | 1.83  | 1.55  | 0.0   | 0.0    | 0.0   |
| $\text{SO}_3$           | 1.69  | 1.3   | 0.69  | 0.0    | 0.99  |
| $\Sigma$                | 99.99 | 99.99 | 98.35 | 100.14 | 97.76 |

Коэффициенты в формуле (O = 4)

Coefficients in formula (O = 4)

|    |      |      |      |      |      |
|----|------|------|------|------|------|
| La | 0.22 | 0.25 | 0.22 | 0.25 | 0.21 |
| Ce | 0.43 | 0.45 | 0.45 | 0.46 | 0.43 |
| Pr | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.06 | 0.05 |
| Nd | 0.19 | 0.18 | 0.23 | 0.21 | 0.19 |
| Sm | 0.03 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.03 |
| Gd | 0.01 | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.01 |
| Th | 0.01 | 0.01 | 0.0  | 0.0  | 0.02 |
| Y  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.0  | 0.03 |
| Ca | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.03 |
| Sr | 0.01 | 0.01 | 0.0  | 0.0  | 0.03 |
| P  | 0.92 | 0.93 | 0.97 | 0.99 | 0.97 |
| As | 0.04 | 0.03 | 0.0  | 0.0  | 0.0  |
| S  | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.0  | 0.03 |

Примечания: ан. 1, 2 — рис. 3, б, ан. 3, 4 — рис. 5, б.

Notes: an. 1, 2 — Fig. 3, b, an. 3, 4 — Fig. 5, b.

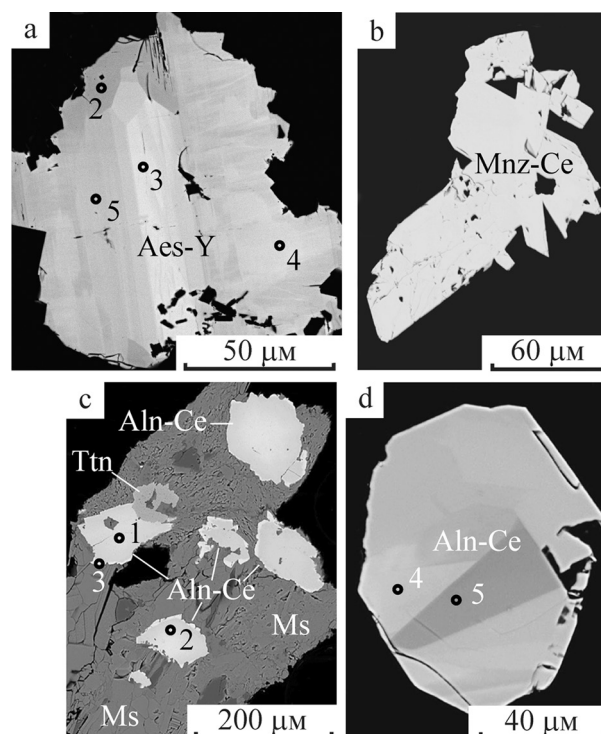


Рис. 5. Минералы REE, ассоциирующие с минералами группы кричтонита:

а — эшинит-(Y) неоднородного строения, б — сросток кристаллов монацита-(Ce), с — алланит-(Ce) в мусковитовой массе, д — алланит-(Ce) неоднородного строения. Обозначены точки анализов, цифры соответствуют номеру анализа в табл. 2 (рис. 5, а) и табл. 4 (рис. 5, с, д). Изображения в отраженных электронах. Полированный шлиф 21\_65-67. Aes-Y — эшинит-(Y), Mnz-Ce — монацит-(Ce), Aln-Ce — алланит-(Ce), Ttn — титанит, Ms — мусковит

Fig. 5. REE minerals associated with crichtonite group minerals:

a — aeschinite-(Y) of heterogeneous structure, b — intergrowth of monazite-(Ce) crystals, c — allanite-(Ce) in muscovite mass, d — allanite-(Ce) of heterogeneous structure. Analysis points are indicated, numbers correspond to the analysis number in Table 2 (Fig. 5, a) and Table 4 (Fig. 5, c, d). BSE images. Polished section 21\_65-67. Aes-Y — aeschynite-(Y), Mnz-Ce — monacite-(Ce), Aln-Ce — allanite-(Ce), Ttn — titanite, Ms — muscovite

**Таблица 4.** Состав алланита (мас. %)

**Table 4.** Composition of allanite (wt. %)

| Оксид<br>Oxide                 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 33.21 | 33.21 | 33.26 | 31.86 | 32.84 | 30.69 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 18.92 | 18.71 | 16.59 | 15.80 | 18.23 | 14.57 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.01  | 10.06 | 9.81  | 10.19 | 9.35  | 7.18  |
| FeO                            | 5.95  | 4.19  | 7.41  | 6.13  | 4.55  | 9.49  |
| MnO                            | 1.27  | 1.08  | 1.90  | 1.56  | 1.31  | 0.95  |
| CaO                            | 14.96 | 16.41 | 13.41 | 13.72 | 15.81 | 10.97 |
| La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.77  | 4.46  | 4.38  | 5.05  | 3.49  | 5.65  |
| Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.95  | 5.82  | 9.15  | 8.55  | 6.29  | 13.31 |
| Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.15  | 3.02  | 3.66  | 3.83  | 3.06  | 2.40  |
| Σ                              | 98.19 | 96.96 | 99.57 | 96.69 | 94.93 | 95.21 |

**Коэффициенты в формуле (8 катионов)**
**Coefficients in formula (8 cations)**

|                  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|------------------|------|------|------|------|------|------|
| Si               | 2.99 | 2.96 | 3.00 | 2.98 | 2.99 | 3.01 |
| Al               | 2.00 | 1.97 | 1.76 | 1.74 | 1.95 | 1.69 |
| Fe <sup>3+</sup> | 0.47 | 0.67 | 0.67 | 0.72 | 0.64 | 0.53 |
| Fe <sup>2+</sup> | 0.45 | 0.31 | 0.56 | 0.48 | 0.35 | 0.78 |
| Mn               | 0.10 | 0.08 | 0.14 | 0.12 | 0.10 | 0.08 |
| Ca               | 1.44 | 1.57 | 1.30 | 1.37 | 1.54 | 1.15 |
| La               | 0.19 | 0.15 | 0.15 | 0.17 | 0.12 | 0.20 |
| Ce               | 0.26 | 0.19 | 0.30 | 0.29 | 0.21 | 0.48 |
| Nd               | 0.10 | 0.10 | 0.12 | 0.13 | 0.10 | 0.08 |
| Σ REE            | 0.55 | 0.44 | 0.57 | 0.59 | 0.43 | 0.76 |

**Примечания:** Ан. 1—5 соответствуют точкам анализа на рис. 5, с, d. Ан. 6 — алланит в апобазитовых гематит-серцитовых породах, обр. 7222.

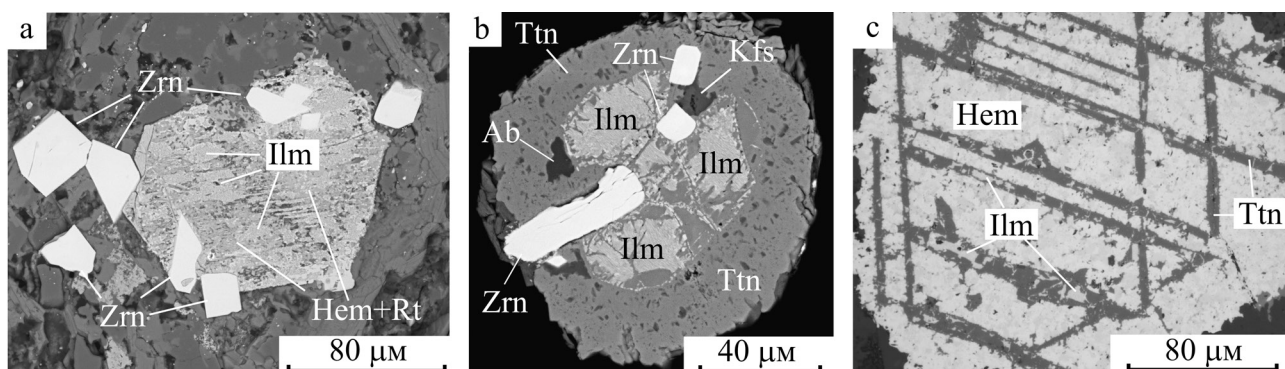
**Notes:** An. 1—5 correspond to the analysis points in Fig. 5, c, d. An. 6 — allanite in hematite-sericite apobasite rocks, sample 7222.

минералов группы кричтонита в риолитах не столь очевидны, их формирование целесообразно рассмотреть в контексте эволюции оксидных минералов в риолитах. Основными первичными оксидными минералами риолитов являлись ильменит и Ti-содержащий магнетит, которые в значительной степени или полностью были замещены другими минералами.

Ильменит встречается в основной массе риолитов в виде зерен таблитчатой формы размером 0.1—0.5 мм, в сростании с ним отмечаются кристаллики циркона. Зерна ильменита всегда в той или иной степени замещены агрегатами рутила, гематита и титанита (рис. 6, а). Нередко реликты ильменита присутствуют в центральной части сфероидальных образований титанитового состава (рис. 6, б).

Магнетита в метариолитах в настоящее время практически нет, о его былом наличии свидетельствуют субграфические сростания гематита и минералов титана, интерпретируемые как псевдоморфозы по магнетиту, содержащему закономерно ориентированные пластинки ильменита. В таких пластинках, сложенных рутилом или титанитом агрегатного строения, отмечаются реликты ильменита (рис. 6, с). Кроме того, Ti-содержащий магнетит обнаружен в виде включений в цирконе, где сохранился благодаря изоляции от внешней среды. Магнетит (рис. 7, а) содержит 20 мас. % TiO<sub>2</sub> и, что примечательно, около 1 мас. % ZnO. При большом увеличении в магнетите видна решетка распада твердого раствора, тонкие пластики представлены ильменитом или ульвошпинелью. В процесс замещения магнетита в основной массе риолитов иногда вовлекаются REE. Магнетит замещается гематитом, а ильменитовые пластинки — Nb-содержащим рутилом и монацитом.

Особый интерес представляет характер развития эшинита-(Y), сложного оксида Y-Ti-Nb-состава, который, как показано выше, ассоциирует с минералами группы кричтонита (рис. 2). Эшинит-(Y) присутству-


**Рис. 6.** Преобразования первичных Ti-Fe-оксидных минералов в риолитах:

а — ильменит замещается агрегатом рутила и гематита; б — реликты ильменита в сфероиде титанита; с — титанит-гематитовая псевдоморфоза по магнетиту с решеткой ильменита, от которого сохранились небольшие реликты среди титанита. Изображения в отраженных электронах (а, б) и отраженном свете (с). Полированные шлифы K185158 (а), 34\_50-62 (б), 710201 (с). Ilm — ильменит, Hem — гематит, Rt — рутил, Ttn — титанит, Zrn — циркон, Ab — альбит, Kfs — калиевый полевошпат

**Fig. 6.** Transformations of primary Ti-Fe oxide minerals in rhyolites:

а — ilmenite is replaced by an aggregate of rutile and hematite; б — ilmenite relics in a titanite spheroid; с — titanite-hematite pseudomorphosis after magnetite with an ilmenite lattice, of which small relics are preserved among titanite. BSE (a, b) and reflected light (c) images. Polished sections K185158 (a), 34\_50-62 (b), 710201 (c). Ilm — ilmenite, Hem — hematite, Rt — rutile, Ttn — titanite, Zrn — zircon, Ab — albite, Kfs — potassium feldspar





ет в кварц-полевошпатовой матрице метариолита, развивается в рутил-гематит-титанитовых агрегатах по первичным оксидам железа и титана. Минерал характеризуется высоким содержанием урана (9.0 мас. %  $\text{UO}_2$ ) и отсутствием Th (рис. 7, а; табл. 2, ан. 6). Отмечается совместное замещение первичного титанового минерала алланитом и эшинитом-(Y). Y-Ti-Nb-оксид в этом случае имеет относительно низкое содержание REE (табл. 2, ан. 7). Алланит, заместивший первичный титановый минерал, переполнен мельчайшими включениями рутила, поэтому в анализе фиксируется около 10 мас. %  $\text{TiO}_2$ , в других зернах алланита титан не обнаруживается (рис. 7, b). Эшинит-(Y) в виде компактных выделений развивается в серицитолитах в зоне разлома (рис. 7, с; табл. 2, ан. 8, 9), присутствует в струйчатых обособлениях серицита в метариолитах (табл. 2, ан. 10, 11). Присутствие эшинита-(Y) отмечено вблизи извилистого (видимо, деформированного) прожилка фуксита с золотом. Эшинит-(Y) (табл. 2, ан. 12) находится в кальците, ассоциирует с апатитом и кайсикхитом-(Y). Изредка отмечаются микропрожилки эшинита-(Y) в цирконе (рис. 7, d, мас. %):  $\text{Y}_2\text{O}_3$  — 16.5,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  — 6.8,  $\text{TiO}_2$  — 43.0,  $\text{ThO}_2$  — 3.1. Во всех случаях эшинит-(Y) не является первичным оксидным минералом риолитов, его образование связано с метаморфическими преобразованиями пород.

На удалении от месторождения эшинит-(Y) присутствует в риолитах этого же магматического комплекса, его образование связывается с постмагматической стадией преобразования риолитов (Гракова, Попвасев, 2024). Кроме того, эшинит-(Y) обнаружен в кислых разновидностях пород шатакского комплекса на Южном Урале. Основной этап редкоземельного минералообразования связывается с динамотермальным метаморфизмом пород (Ковалев и др., 2023).

Возвращаясь к минералам группы кричтонита, следует отметить, что их образование вполне отвечает общей картине метаморфических преобразований оксидных минералов в риолитах. Набор ассоциирую-

щих минералов (мусковит, гематит, рутил, циркон, эшинит-(Y), монацит-(Ce), алланит-(Ce) и характер сростаний (рис. 2, 3) свидетельствуют, что минералы группы кричтонита по способу образования являются метаморфогенными. Необходимо отметить, что в ряде случаев минералы группы кричтонита отчетливо ксеноморфны по отношению к мусковиту и монациту-(Ce), кроме того, в отличие от эшинита-(Y), они не развиваются по первичным Ti-Fe-оксидам. Обращает на себя внимание значительное сходство в условиях локализации альмейдаита на месторождении Чудное и на месте его открытия в преобразованных вулканитах кислого состава в Бразилии.

Минералы группы кричтонита на месторождении Чудное концентрируют в своем составе Pb и Zn. В первичном магнетите, заключенном в цирконе, обнаружено около 1 мас. % ZnO, но в основном Pb и Zn, видимо, были рассеяны в матрице породы. Следует отметить, что образование Pb-Zn-содержащих оксидных минералов возможно в среде с низкой активностью сульфид-иона, в противном случае более вероятно образование галенита и сфалерита. Некоторое количество серы в минералообразующем флюиде присутствовало, но не в сульфидной, а сульфатной форме, фиксирующейся в монаците (табл. 3).

Несколько иначе при метаморфическом преобразовании риолитов происходит миграция Nb. В первичных оксидных минералах Nb концентрируется в ильмените (до 1 мас. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ), в замещающих его минералах содержание  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  бывает выше: в титаните — до 2.7 мас. %, в рутиле — до 2.5, максимально — до 7.9 мас. %. Такое перераспределение Nb при метаморфизме в некоторых случаях (при наличии Y) приводит к образованию эшинита-(Y).

Золотофукситовые прожилки подвергались метаморфическим преобразованиям совместно с вмещающими их риолитами. В прожилках проявлены процессы деформации и перекристаллизации фуксита, специфическим метаморфическим минералом в них является цинкохромит.

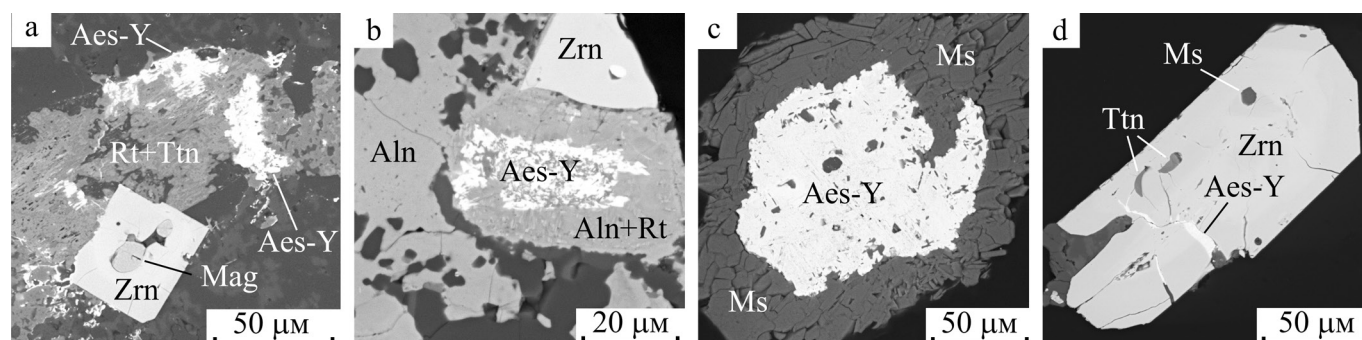


Рис. 7. Эшинит-(Y) в метариолитах:

а — эшинит-(Y) в рутил-титанитовом агрегате, в цирконе реликтовое включение Ti-содержащего магнетита; б — эшинит-(Y) в алланите, содержащем мельчайшие реликтовые частицы рутила; в — эшинит-(Y) в мусковите; д — прожилок эшинита-(Y) в цирконе. Изображения в отраженных электронах. Полированные шлифы K-185158 (а), 710201 (б), 33\_135-141 (с), 31\_222-227 (д). Aes-Y — эшинит-(Y), Rt — рутил, Ttn — титанит, Zrn — циркон, Aln — алланит, Ms — мусковит

Fig. 7. Aeschnite-(Y) in metarhyolites:

а — aeschnite-(Y) in rutile-titanite aggregate, relic inclusion of Ti-bearing magnetite in zircon; б — aeschnite-(Y) in allanite containing tiny relict particles of rutile; в — aeschnite-(Y) in muscovite; д — aeschnite-(Y) veinlet in zircon. BSE images. Polished sections K-185158 (а), 710201 (б), 33\_135-141 (с), 31\_222-227 (д). Aes-Y — aeschnite-(Y), Rt — rutile, Ttn — titanite, Zrn — zircon, Aln — allanite, Ms — muscovite



## Закключение

На Au-Pd-месторождении Чудное выявлены сложные Fe-Ti-оксиды группы кричтонита, минеральный вид которых определяется соотношениями между Pb и Sr, а также между Zn, Mn и Y. В метариолитах присутствуют альмейдаит, кричтонит, сенаит и минералы промежуточного состава. К альмейдаиту отнесены разности с преобладанием Pb над Sr и значительным содержанием Zn, к кричтониту — с преобладанием Sr над Pb и невысоким содержанием Zn, к сенаиту — с преобладанием Pb над Sr и значительным содержанием Mn. В апобазитовых гематит-серицитовых породах на контакте с метариолитами обнаружен грамаччиолиит-(Y), минерал с доминированием Pb среди крупных катионов и преобладанием Y над Mn.

Минералы группы кричтонита выявлены в контурах рудных зон с прожилковой золотофукситовой минерализацией, но локализованы они не в рудных прожилках, а в породной матрице. Образование минералов группы кричтонита соответствует общей картине метаморфических преобразований оксидных минералов в риолитах и контактирующих с ними породах основного состава.

Исследование проведено в рамках темы «Фундаментальные проблемы минералогии и минералообразования, минералы как индикаторы петро- и рудогенеза, минералогия рудных районов и месторождений Тимано-Североуральского региона и арктических территорий» (ГР № 122040600009-2).

## Литература / References

- Андреичев В. Л. Геохронология гранитоидного магматизма Приполярного Урала // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2010. № 11. С. 7—12.
- Andreichev V. L. Geochronology of granitoid magmatism of Subpolar Urals. Vestnik IG Komi SC UB RAS, 2010, No. 11, pp. 7—12. (in Russian)
- Барков А. Ю., Никифоров А. А. Редкоземельные, редкие и другие рудогенные элементы в минералах групп кричтонита и перовскита из фенитизированного мегаксенолита Хибинского комплекса, Кольский п-ов // Вестник ВГУ. Серия: геология. 2015. № 3. С. 50—58.
- Barkov A. Y., Nikiforov A. A. Rare earths, rare elements and other ore-forming components in members of the crichtonite and perovskite groups from a fenitized megaxenolith, Khibina complex, Cola peninsula. Vestnik of Voronezh State Univ., Ser. Geol. 2015, No. 3, pp. 50—58. (in Russian)
- Гракова О. В., Попвасев К. С. Редкоземельные минералы в докембрийских породах северной части Ляпинского антиклинория (Приполярный Урал) // Литосфера. 2024. № 4. С. 661—674. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-661-674>
- Grakova O. V., Popvasev K. S. Rare-earth minerals in pre-Cambrian rocks of the Lyapinskii anticlinorium (Subpolar Urals). Lithosphere (Russia), 2024, No. 4, pp. 661—674. (in Russian)
- Карпов С. М., Волошин А. В., Компанченко А. А., Савченко Е. Э., Базай А. В. Минералы группы кричтонита в колчеданных рудах и рудных метасоматитах протерозойских структур Кольского региона // Записки РМО. 2016. № 5. С. 39—56.
- Karpov S. M., Voloshin A. V., Kompanchenko A. A., Savchenko Ye. E., Bazay A. V. The crichtonite group minerals in the sulfide ores and ore-metasomatic rocks of Proterozoic structures of the Kola Region. Zapiski RMO (Proc. Russian Miner. Soc.), 2016, V. 145, No. 5, pp. 39—56. (in Russian)
- Карташов П. М., Тронева Н. В., Мохов А. В., Коваленко В. И., Царева Г. М. О дефектном цинксоодержащем сенаите из редкометалльных щелочных гранитов Халдзан-Бурэгтэга (Монгольский Алтай) // Докл. АН. 1993. Т. 332. № 6. С. 755—758.
- Kartashov P. M., Troneva N. V., Mokhov A. V., Kovalenko V. I., Tsaryeva G. M. On defect zinc-bearing senaitite from rare-metal alkaline granites at Khaldzan-Buregteg (Mongolian Altai). Doklady Earth Sciences, 1993, V. 332, No. 6, pp. 755—758. (in Russian)
- Козлов А. В., Корзников В. Д., Смоленский В. В., Кузнецов С. К., Савичев А. А., Иванов А. С., Васильев Е. А. Проблемы оценки возраста Au-Pd-минерализации месторождения Чудное (Приполярный Урал) // Записки РМО. 2024. Т. 153. № 3. С. 42—63. DOI: 10.31857/S0869605524030036
- Kozlov A. V., Korznikov V. D., Smolensky V. V., Kuznetsov S. K., Savichev A. A., Ivanov A. S., Vasiliev E. A. Problems of Dating the Au-Pd Mineralization of the Chudnoye Deposit (the Subpolar Urals). Zapiski RMO, 2024, V. 153, No. 3, pp. 42—63. (in Russian)
- Ковалев С. Г., Ковалев С. С., Шарипова А. А. Первые данные о редкоземельной минерализации в кислых разновидностях пород шатакского комплекса (Южный Урал) // Литосфера. 2023. № 5. С. 910—929. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-5-910-929>
- Kovalev S. G., Kovalev S. S., Sharipova A. A. First data on rare earth mineralization in acid rock varieties of the Shatak complex (Southern Urals). Lithosphere (Russia), 2023, No. 5, pp. 910—929. (in Russian)
- Козырева И. В., Юдович Я. Э., Швецова И. В., Кетрис М. П., Ефанова Л. И. Глиноземистые и железистые породы Приполярного Урала. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 101 с.
- Kozyreva I. V., Yudovich Ya. E., Shvetsova I. V., Ketris M. P., Efanova L. I. The aluminous and ferriferous rocks of the Near-Polar Urals. Yekaterinburg, 2003, 101 p. (in Russian)
- Козырева И. В., Швецова И. В. Грамаччиолиит-(Y): первая находка в России // Докл. АН. 2010. Т. 433. № 5. С. 675—677.
- Kozyreva I. V., Shvetsova I. V. Gramacciolite-(Y): The First find in Russia. Doklady Earth Sciences, 2010, V. 433, p. 2, pp. 1074—1076.
- Кузнецов С. К., Андреичев В. Л. Возраст золото-фукситовой минерализации в риолитах хребта Малдынырд // Золото, платина и алмазы Республики Коми и сопредельных регионов: Материалы Всерос. конф. Сыктывкар, 1998. С. 18—19.
- Kuznetsov S. K., Andreichev V. L. The age of gold-fuchsite mineralization in the rhyolites of the Maldynyrd ridge. Gold, platinum and diamonds of the Komi Republic and adjacent regions. Proceedings of the All-Russian Conf. Syktyvkar, 1998, pp. 18—19. (in Russian)
- Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В., Тарбаев М. Б., Пономарчук В. А. Первые  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -датировки слюд Au-Pd-P3Э-проявления Чудное (Приполярный Урал) // Докл. АН. 2005а. Т. 400. № 2. С. 243—246.





- Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Tarbaev M. B., Ponomarchuk V. A. The first  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ -dating of micas from the Chudnoe Au-Pd-REE occurrence, Near-Polar Urals. *Doklady Earth Sciences*, 2005a, V. 400, No. 2, pp. 109–112
- Моралев Г. В., Борисов А. В., Суренков С. В., Нагаева С. П., Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Онищенко С. А., Ефанова Л. И., Соболева А. А. Распределение и формы нахождения редкоземельных элементов на Au-Pd-REE-рудопоявлениях Чудное и Нестеровское (хребет Малдынырд, Приполярный Урал) // Геохимия. 2005б, № 11. С. 1175–1195.
- Moralev G. V., Borisov A. V., Surenkov S. V., Nagaeva S. P., Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Onishchenko S. A., Efanova L. I., Soboleva A. A. Distribution and modes of occurrence of REE at the Chudnoe and Nesterovskoe occurrences of Au-Pd-REE ore mineralization in the Maldynyrd Range, Nether-Polar Urals. *Geochem. Int.* 2005b, V. 43, No. 11, pp. 1078–1097.
- Озеров В. С. Метаморфизованные россыпи золота Приполярного Урала // Руды и металлы. 1996. № 4. С. 28–37.
- Ozerov V. S. Metamorphosed gold placers of the Subpolar Urals. *Rudy i Metally*, 1996, No. 4, pp. 28–37. (in Russian)
- Онищенко С. А., Кузнецов С. К. Палладий-золотосульфидная минерализация в андезитах на месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2019. № 6, С. 20–27. DOI: 10.19110/2221-1381-2019-6-20-27
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Palladium-gold-sulphide mineralization in andesites at Chudnoe deposit (Subpolar Urals). *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2019, No. 6, pp. 20–27. (in Russian)
- Онищенко С. А., Кузнецов С. К. Самородное золото Au-Pd-месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия) // Геология и геофизика. 2023. № 2. С. 233–254. <https://doi.org/10.15372/GiG2022122>
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Native Gold of the Chudnoe Gold-Palladium Deposit (Subpolar Urals, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2023, V. 64, No. 2, pp. 192–209. DOI: 10.2113/RGG20214452
- Онищенко С. А., Кузнецов С. К. Минералы палладия и платины в рудах Au-Pd-месторождения Чудное (Приполярный Урал, Россия) // Литосфера. 2024. № 3. С. 526–546. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-3-526-546>
- Onishchenko S. A., Kuznetsov S. K. Palladium and platinum minerals in Au-Pd ores of the Chudnoe deposit (Subpolar Urals, Russia). *Lithosphere (Russia)*, 2024, No. 3, pp. 526–546. (in Russian)
- Онищенко С. А., Сокина Н. В., Кузнецов С. К., Исаенко С. И., Тропников Е. М. Стадийность формирования кварц-альбит-алланит-фукситовых прожилков на Au-Pd-месторождении Чудное (Приполярный Урал) // Вестник геонаук. 2024. № 1. С. 4–15. DOI: 10.19110/geov.2024.1.1
- Onishchenko S. A., Sokierina N. V., Kuznetsov S. K., Isaenko S. I., Tropnikov E. M. Stages of formation of quartz-albite-allanite-fuchsite veins at the Chudnoe Au-Pd deposit (Subpolar Urals). *Vestnik of Geosciences*, 2024, No. 1, pp. 4–15. (in Russian)
- Расцветова Р. К., Аксенов С. М., Чуканов Н. В., Мenezes Л. А. Д. (L. A. D. Menezes) Кристаллическая структура альмейдаита — нового члена группы кричтонита // Докл. АН. 2014. Т. 455. № 4. С. 416–420.
- Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Chukanov N. V., Menezes Filho L. A. D. Crystal structure of almeidaite, a new mineral of the crichtonite group. *Doklady Chemistry*, 2014, No. 455(1-2), pp. 53–57.
- Расцветова Р. К. Кричтонит и его семейство: история открытия двух новых минералов // Природа. 2020. № 8. С. 39–47. DOI: 10.7868/S0032874X20080049
- Rastsvetaeva R. K. Crichtonite and its family: the story of the discovery of two new minerals. *Priroda*, 2020, No. 8, pp. 39–47. (in Russian)
- Тарбаев М. Б., Кузнецов С. К., Моралев Г. В., Соболева А. А., Лапутина И. П. Новый золото-палладиевый тип минерализации в Кожимском районе Приполярного Урала (Россия) // Геология рудн. месторождений. 1996. Т. 38. № 1. С. 15–30.
- Tarbaev M. B., Kuznetsov S. K., Moralev G. V., Soboleva A. A., Laputina I. P. A new gold-palladium type of mineralization in the Kozhim region of the Circumpolar Urals (Russia). *Geol. Ore Depos.*, 1996, V. 38, No. 1, pp. 11–25.
- Черников А. А. Сложные оксиды урана в урановых рудах // Новые данные о минералах. 2012. Вып. 47. С. 71–83.
- Chernikov A. A. Complex uranium oxides in uranium ores. *New Data on Minerals*, 2012, V. 47, pp. 71–83. (in Russian)
- Armbruster T., Bonazzi P., Akasaka M., Bermanec V., Chopin C., Giere R., Heuss-Assbisher S., Liebscher A., Menchetti S., Pan Y., Pasero M. Recommended nomenclature of epidote group minerals. *Eur. J. Mineral.* 2006. V. 18. P. 551–567. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0551
- Barkov A. Y. Sr-Na-REE titanates of the crichtonite group from a fenitized megaxenolith, Khibina alkaline complex, Kola Peninsula, Russia: first occurrence and implications. *Eur. J. Mineral.* 2006. V. 18. P. 493–502. DOI: 10.1127/0935-1221/2006/0018-0493
- Foord E. E., Sharp W. N., Adams J. W. Zinc and Y-group-bearing senaite from St Peters Dome, and new data on senaite from Dattas, Minas Gerais, Brazil. *Miner. Mag.*, 1984. V. 48. P. 97–106.
- Menezes Filho L. A. D., Chukanov N. V., Rastsvetaeva R. K., Aksenov S. M., Pekov I. V., Chaves M. L. S. C., Richards R. P., Atencio D., Brandão P. R. G., Scholz R., Krambrock K., Moreira R. L., Guimarães F. S., Romano A. W., Persiano A. C., de Oliveira L. C. A., Ardisson J. D. Almeidaite,  $\text{PbZn}_2(\text{Mn,Y})(\text{Ti,Fe}^{3+})_{18}\text{O}_{37}(\text{OH,O})$ , a new crichtonite-group mineral, from Novo Horizonte, Bahia, Brazil. *Miner. Mag.* 2015. V. 79. No. 2. P. 269–283.
- Orlandi P., Pasero M., Rotiroli N., Olmi F., Demartin F., Moelo Y. Gramaccioliite-(Y), a new mineral of the crichtonite group from Stura Valley, Piedmont, Italy. *Europ. J. Mineral.* 2004. V. 16. P. 171–175.
- Palyanova G., Murzin V., Borovikov A., Karmanov N., Kuznetsov S. Native Gold in the Chudnoe Au-Pd-REE Deposit (Subpolar Urals, Russia): Composition, minerals in intergrowth and genesis. *Minerals*. 2021. V. 11. 451. <https://doi.org/10.3390/min11050451>
- Theye T., Hatert F., Ockenga E., Bertoldi C., Latne C. Gramaccioliite-(Y): paragenesis chemistry, and structure in a new occurrence, Samos Island, Greece. *Eur. J. Mineral.* 2010. V. 22. P. 443–452. DOI: 10.1127/0935-1221/2010/0022-2020

Поступила в редакцию / Received 24.06.2025





## Динамика развития прибрежной котловины выдувания (Вислинская коса, Юго-Восточная Балтика)

А. Р. Данченков<sup>1,2</sup>, Е. Д. Питерниекс<sup>1,2</sup>, Н. С. Белов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия  
danchenkov.ar@atlantic.ocean.ru

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия, aldanchenkov@kantiana.ru

Представлены результаты 12-летнего исследования развития элемента дюнного комплекса на Вислинской косе Балтийского моря. Объект исследования представляет собой интенсивно развивающуюся в ходе антропогенного воздействия котловину выдувания. Оценка развития форм рельефа во времени осуществлялась посредством определения геоморфологических изменений при использовании ЦМР, которые были получены с помощью топографических измерений наземного лазерного сканирования (НЛС) либо аэротриангуляции с сетью опознавательных знаков, сопровождаемых GNSS RTK-измерениями. Выявлено, что скорость опустынивания зависит от структуры растительных сообществ и поддерживается за счет импульсного поступления песка по сети каналов. Наиболее активно ассимилируются травяные территории, обладая низкой шероховатостью, в то время как древесно-кустарниковая растительность, наоборот, разряжает ветропесчаный поток, наращивая перед собой аккумулятивную толщу. При соединении с пляжем котловина обладает наибольшей активностью, которая снижается по достижении ею критической ширины, когда эффект Вентури перестает быть действенным в условиях имеющегося ветрового климата.

**Ключевые слова:** приморская дюна, котловина выдувания, анализ ЦМР, эколого-геоморфологические опасности, вектор геоморфической трансформации рельефа

## Dynamics of evolution of coastal blowout (Vistula Spit, South-Eastern Baltic)

A. R. Danchenkov<sup>1,2</sup>, E. D. Piterniex<sup>1,2</sup>, N. S. Belov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

The findings of a 12-year study of dune complex element development on the Vistula Spit of the Baltic Sea are hereby presented. The focal point of this study is an intensively developing blowout basin in the context of anthropogenic impact. The assessment of landform development over time was conducted by determining geomorphologic changes using digital elevation models (DEMs). These DEMs were obtained by means of topographic terrestrial laserscanning (TLS) measurements or aerial triangulation with a ground control point, accompanied by GPS-RTK measurements. The findings indicated that the rate of desertification was contingent on the composition of plant communities and was sustained by pulse sand supply, facilitated by a network of channels. Grassy areas were the most actively assimilated, exhibiting low roughness, while tree and shrub vegetation, in contrast, exerted a force that directed the wind-sand flow, thereby accumulating a thickness in front of it. The activity of the basin was observed at its peak at the point of connection with the beach. A decline in activity was noted as the basin reached a critical width, at which point the Venturi effect ceased to be effective under the prevailing wind climate.

**Keywords:** coastal dune, blowout, DEM analysis, eco-geomorphological hazards, relief transformation vector

### Введение

Котловины выдувания представляют собой впадины, образующиеся на песчаных ландшафтах в результате дефляции неуплотненных отложений. Данное явление происходит под воздействием эоловых процессов вследствие изменений климата, антропогенного воздействия или сокращения растительного покрова до такой степени, что растительность больше не может развиваться и удерживать песок (Zhou et al., 2022, Du Pont et al., 2024). Представляя собой комплекс процессов эрозии и накопления осадков, котловины выдувания формируют сложную и изменчивую эколого-геоморфологическую систему (Flor and Martínez, 2023). Понимание закономерностей морфологической эволюции под действием подобных комплексных про-

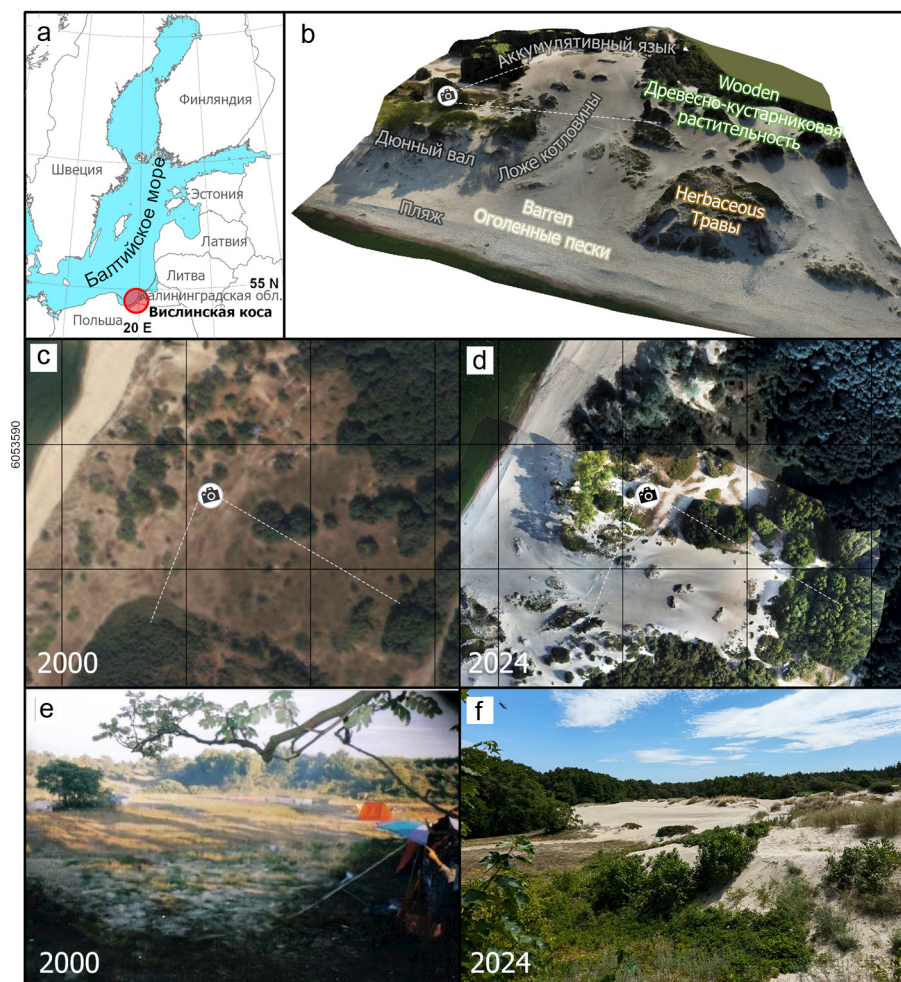
цессов, а также количественные оценки динамики котловин выдувания в различных климатических поясах приобретают все более актуальный характер в последние годы (Laporte-Fauret et al., 2022).

### Объект исследования

Объект мониторинга представляет собой элемент дюнного комплекса с интенсивно развивающейся котловиной выдувания, расположенный в северо-западной части Вислинской косы юго-восточной Балтики в районе г. Шведская (рис. 1). В рельефе участка в районе г. Шведская прослеживается зональная последовательность в направлении «море — залив»: пляж, защитный пляжевый дюнный вал (авандюна), примор-

**Для цитирования:** Данченков А. Р., Питерниекс Е. Д., Белов Н. С. Динамика развития прибрежной котловины выдувания (Вислинская коса, Юго-Восточная Балтика) // Вестник геонаук. 2025. 7(367). С. 16–27. DOI: 10.19110/geov.2025.7.2

**For citation:** Danchenkov A. R., Piterniex E. D., Belov N. S. Dynamics of evolution of coastal blowout (Vistula Spit, South-Eastern Baltic). Vestnik of Geosciences, 2025, 7(367), pp. 16–27, DOI: 10.19110/geov.2025.7.2



**Рис. 1.** Котловина выдувания: а — расположение объекта исследования; б — визуализация морфологии котловины выдувания по состоянию на конец 2024 г. с подписями характерных покрытий; смена покрытия и вид на ЮВ склона конуса выноса песчаного материала с обозначением точки фотографирования: с, е — в 2000 г., d, f — в 2024 г.

**Fig. 1.** Blowout: a — location of the study object; b — visualization of the blowout morphology at the end of 2024 with captions of typical coverages; change of coverage and view of the SE slope of the talus of sandy material with the marking of the photo point: c, e — in 2000, d, f — in 2024

ская дюнная гряда, имеющими разную устойчивость. Пляжевая зона характеризуется наличием несформированных почв с единичными галофитно-псаммофитными группировками; авантюна представлена несформированными почвами, полужакрепленными и закрепленными псаммофиторазно-травно-злаковой растительностью; приморская дюнная гряда и межгрядовая западина сформированы слабопрогумусированными песками, закрепленными псаммофиторазно-травно-лишайниковой растительностью с древесно-кустарниковыми группировками. Масштабный процесс развития котловины выдувания начался в 2000 г. и был обусловлен активизацией рекреационной деятельности в зоне приморского дюнного грядового комплекса (проведением фестиваля бардовской музыки). Угнетение надпочвенного покрова и реактивация песков к 2002 г. привела к образованию четырех пар блюдцеобразных котловин на наветренной и подветренной частях авантюны. Их развитие уже к 2007—2009 гг. привело к включению с морским пляжем в систему отдельных сквозных котловин. К 2012 г. постепенное поперечное расширение объединило отдельные каналы в котловину шириной 49 м, продолжающую свое развитие и к апрелю 2024 г. достигнувшую 160 м.

## Материалы и методы

### Топографические наблюдения

Исследование состояния котловины выдувания на модельном участке производилось в период 2012—

2024 гг. Для получения последовательных моделей состояния объекта исследования выполнялись топографические измерения НЛС, либо аэротриангуляция с сетью опознаков, сопровождаемые GNSS RTK-измерениями в зависимости от условий в год наблюдений. Наблюдения выполнялись ежегодно с 2012 по 2024 г. посредством сканера TOPCON GLS1500 и в отдельные годы сопровождалась фотосъемкой с квадрокоптера DJI Phantom 4 (камера Sony FC330) с высоты 50 м. Определение координат производилось с использованием спутникового геодезического оборудования TOPCON GR-5 в режиме RTK от сети базовых станций при фиксированном решении.

Постобработка результатов НЛС выполнялась в ПО TOPCON ScanMaster 2.5. Обработка материалов, подготовка цифровых моделей и аэротриангуляция выполнялась в ГИС Esri ArcGIS Pro в единой плановой и высотной системах координат. Для сглаживания модели поверхности и устранения малых шумов использовался метод локальных полиномов (Goodin et al., 1979). Построение регулярной цифровой модели рельефа осуществлялось с использованием метода Natural neighbor с ячейкой (с) 0.1 м (Sibson, 1981). Подробнее о методах и точности измерений в (Danchenkov and Belov, 2023). Исследуемый набор данных включает цифровые модели рельефа за период 2012—2024 гг. (всего 14 моделей разрешением 0.1 м/пиксель), фотопланы за период 2017—2024 гг. (8 мозаик разрешением 3 см/пиксель), спутниковые снимки за период 2012—2015 гг., 2021 г. (5 снимков разрешением 1 м/пиксель).



### Расчет морфологических изменений

Оценка развития котловины выдувания во времени осуществлялась при использовании цифровых моделей рельефа (ЦМР). Вычитание ЦМР, полученной в более ранний момент времени, из ЦМР, полученной позднее, по методу (Bannister et al., 1998) позволило получить карты разницы высотных отметок ( $\Delta h$  (dh/dt), м/период). Для количественной характеристики динамики рельефа под действием эоловых процессов было построено 13 карт разницы за период 2012–2024 гг.

Направление и интенсивность морфодинамики оценивались посредством дифференциального анализа растровых карт разницы высот (Danchenkov et al., 2019). Для каждой ячейки размером  $c = 0.1$  м были определены скорости морфологических изменений (вектор геометрической трансформации  $G$  (м<sup>3</sup>/м/период) по осям согласно формуле 1:

$$G_x = \frac{d\Delta h}{dx} = \frac{\Delta h_x - \Delta h_{x-1}}{c};$$
$$G_y = \frac{d\Delta h}{dy} = \frac{\Delta h_y - \Delta h_{y-1}}{c} \quad (1)$$

Путь (азимут  $G_{dir}$ ) и величина вектора геометрической трансформации  $G$  (м<sup>3</sup>/м/период) как следствия эолового переноса песка определялись согласно формулам 2, 3:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad (2)$$

$$G_{dir} = \arctan\left(\frac{G_x}{G_y}\right). \quad (3)$$

Вектор геометрической трансформации  $G$  количественно выражает объем материала, переместившийся между соседними ячейками. Эта векторная величина характеризует процесс переноса, раскрывая механику динамики рельефа через изменение его формы. Для котловин выдувания, в частности, указывает направление и интенсивность выноса, визуализируя в картах векторов транспортные коридоры, связывая зоны дефляции с участками аккумуляции.

### Расчет потенциала эолового переноса песка

Расчет потенциала ветропесчаного потока для поперечного сечения шириной 1 м проводился по уравнению Кавамюры, позволяющему учесть влажность песков, диаметр зерен песка и влияние шероховатости местности на перенос (Duarte-Campos et al., 2018) (формула 4):

$$q = C_k \frac{\rho_a}{g} (U_* - U_{*tm})(U_* + U_{*tm})^2, \quad (4)$$

где  $q$  — мощность ветропесчаного потока (м<sup>3</sup>/м/с);  $C_k = 2.78$  (экспериментальная безразмерная константа Кавамюры (Kawamura, 1951);  $\rho_a$  — плотность воздуха (1.225 кг/м<sup>3</sup>);  $U_{*tm}$  — критическая скорость сдвига (формула 6) (м/с);  $U_*$  — скорость сдвига (формула 5) (м/с).

Суммарный поток массы  $Q$  (м<sup>3</sup>/м/период) оценивался как сумма потоков  $q$  для каждого диаметра частицы  $D$  (мм), согласно усредненной гранулометрической кривой распределения, характерной для типов седиментологических обстановок. Скорость сдвига рассчитывалась на основе скорости ветра, приведенной к высоте 1 м с учетом шероховатости, по логарифми-

ческому закону (Manwell et. al., 2010), согласно формуле 5:

$$U_* \approx U_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}, \quad (5)$$

где  $U_{ref}$  — измеренная скорость (м/с) на высоте  $z_{ref}$  метеостанции;  $z_0$  — шероховатость (м).

Шероховатость открытой песчаной поверхности определялась по соотношению  $z_0 = 2 * D/30$  (Sherman, 1992). Коэффициент шероховатости  $z_0$  для участков, покрытых травами-псаммофитами, был принят 0.1 м, для участков с древесно-кустарниковой растительностью — 0.3 м (Данченков, 2020)<sup>1</sup>. Определение пороговой скорости сдвига песков  $U_{*tm}$  осуществлялось согласно выражению (формула 6):

$$U_{*tm} = A \sqrt{gD \frac{\rho_s}{\rho_a} (1 + C * [M + M_a])}, \quad (6)$$

где  $\rho_a$  — плотность воздуха (1.225 кг/м<sup>3</sup>);  $\rho_s$  — плотность песков (2650 кг/м<sup>3</sup>);  $A = 0.1$  (безразмерная эмпирическая константа Багнольда (Bagnold, 1941).

Влажность песка учитывается через константу  $C$ , зависящую от диаметра частицы  $D$  и влажности песков  $M$  (%) с учетом аномалии влажности  $M_a$  (%), выраженной в процентном влагосодержании. Использовалось следующее распределение значений коэффициентов с увеличением диаметра частицы:  $C = 1.66$  при  $D = 0.1$  мм,  $C = 1.59$  при  $D = 0.25$  мм,  $C = 1.87$  при  $D = 0.355$  мм,  $C = 2.15$  при  $D = 0.5$  мм и  $C = 2.15$  при  $D = 0.71$  мм (Dong et al., 2001).

Скорость и направление ветра на высоте 10 м дискретностью 1 час получены по результатам климатического реанализа ERA5 (Hersbach et al., 2020) в ближайшей проверенной по береговым метеостанциям ячейке (54.7N, 19.6E), расположенной в 5 км в Балтийском море (Капустина, Зимин, 2023).

### Седиментологические исследования

Отбор проб на гранулометрический состав и влажность песков проводился в период 2019–2024 гг., всего было отобрано 78 проб. Отборы проводились в летний и зимний сезоны, а также после штормового события осенью 2023 г. Отборы проводились по характеру подстилающего покрытия: на незакрепленных песках, в сообществах трав-псаммофитов и между сезонным опадом древесно-кустарниковой растительности. В пределах открытых активных песков опробовались участки, литологически однородные в момент опробования, а также участки устойчивых укрупнений и измельчений размерности.

Гранулометрический анализ выполнялся методом сухого ситового отсева на ситах 10, 4, 2, 1, 0.71, 0.5, 0.355, 0.25, 0.1 мм с использованием виброгрохота Fritch и лабораторных аналитических весов. Интеграция результатов в программу GRADISTAT (Blott & Pye, 2001) позволила выполнить расчеты медианного диаметра  $D_{50}$  (мм) и сортировки (мкм) по методу Folk & Ward

<sup>1</sup> Данченков А. Р. Геоэкологическая оценка морского берега с использованием морфодинамического подхода в условиях особо охраняемой природной территории (на примере Куршской косы): Автореф. дис. ... к. г. н. / БФУ им. И. Канта. 2020.





(1957) для литологического картирования и интерпретации седиментологических условий.

Определение влажности выполнялось с использованием лабораторных весов и сушильного шкафа. Определение аномалии влажности пробы выполнялось для каждой отдельной даты пробоотбора: осуществлялась выборка проб, характеризующих все оголенные инсолированные пески, и находилась их средняя влажность  $M_0$  (%). Далее для каждой пробы, отобранной в ту же дату, определялась аномалия влажности  $M_a$  относительно данного значения  $M_0$  в соответствующую дату отбора по формуле 7:

$$M_a = M_i - M_0, \quad (7)$$

где  $M_0$  — средняя влажность открытых инсолированных песков,  $M_i$  — влажность пробы.

Посредством интерполяции результатов были составлены растровые распределения основных показателей: аномалии влажности  $M_a$ , медианного диаметра  $D_{50}$ , сортировки.

По результатам анализов и полевых наблюдений была выполнена группировка проб в обстановки по положению в морфодинамической системе, подстилающему покрытию, гранулометрическому составу, аномалии влажности. Были выделены 3 основные обстановки: *открытые пески* — не закрепленные растительностью пески, *травы* — покрытие травами-псаммофитами, *древесно-кустарниковая растительность* — слои песка между поверхностями сезонного опада листвы на участках древесно-кустарниковой растительности. Среди *открытых песков* по устойчивым между съемками аномалиям крупности отложений бы-

ли выделены 4 обстановки: *морской пляж* — надводная берма до входа в котловину, *конвергентные зоны* — аномалии гранулометрического состава молодых аккумулятивных бугров, *линии тока* — трассы аномалий повышенной крупности между аккумулятивными формами, *дефляционное ложе* — область аномалии крупности в ложе котловины.

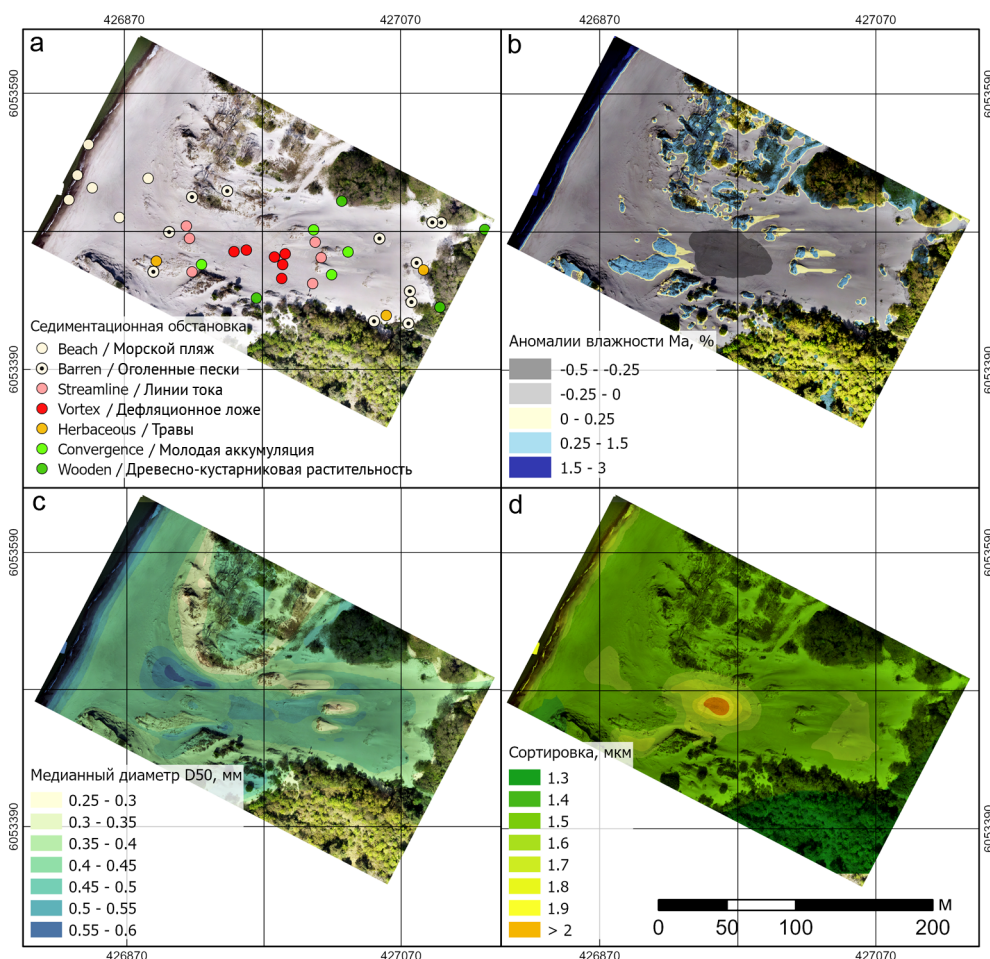
## Результаты

### Седиментологические характеристики котловины выдувания

На рис. 2 представлены результаты картографирования основных литологических показателей, а также аномалий влажности, дающих основное представление о характере распределения и ассоциации с происходящими морфодинамическими процессами. Среди аномалий влажности наблюдаются участки повышенной сухости ( $M_a$  до  $-0.5$  %), а также повышенной влажности ( $M_a$  до  $1.5$ – $2$  %), ассоциированные с участками характерных обстановок (табл. 1).

На участках, покрытых травами, выделяется наиболее высокая аномалия влажности — до  $1.2$  %, постепенно снижающаяся до  $0.19$  % к участкам с древесно-кустарниковой растительностью. В областях наиболее молодой эоловой аккумуляции это связано с уменьшением медианного диаметра и увеличением влагоемкости отложений.

Области повышенной сухости (отрицательной аномалии влажности) отмечаются в дефляционном ложе котловины (до  $-0.5$  %), в областях современных транзита — аккумуляции ( $-0.1$  ...  $-0.13$  %). Незначительные



**Рис. 2.** Литологические схемы: а — точек отбора и их категоризации, б — аномалий влажности  $M_a$ , с — медианного диаметра  $D_{50}$ , d — сортировки

**Fig. 2.** Lithology schemes: a — sampling points and their categorization, b — moisture anomaly  $M_a$ , c — median diameter  $D_{50}$ , d — sorting



**Таблица 1.** Литологическая композиция и аномалии влажности седиментологических обстановок  
**Table 1.** Lithological composition and moisture anomalies of sedimentation environment

| Седиментологическая обстановка<br>Sedimentation environment | Среднее содержание (%) по обстановке / стандартное отклонение по нижней границе диапазона диаметров (мм, размер ячейки сита)<br>Average content (%) by environment / standard deviation at the lower limit of the diameter range (mm, sieve mesh size) |         |         |         |         |          |           |          |          | Аномалия влажности, $M_a$ , %<br>Moisture anomaly, $M_a$ , % |
|---|--|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|----------|----------|--|
|   | 10   | 4       | 2       | 1       | 0.71    | 0.5      | 0.355     | 0.25     | 0.1      |  |
| Открытые пески<br>Barren                                    | 0/0  | 0.1/0.3 | 0.2/0.7 | 0.5/0.8 | 2.7/2.6 | 15.4/8.4 | 43.2/8.2  | 28.7/9.2 | 9.2/5.6  | –0.13  |
| Травы<br>Herbaceous   | 0/0  | 0/0     | 0/0.1   | 0.1/0.1 | 0.6/0.3 | 8.6/1.2  | 43.7/4.3  | 35.6/2.9 | 11.2/2.4 | 1.2  |
| Древесно-кустарниковая растительность<br>Wooden             | 0/0  | 0.1/0.1 | 0/0     | 0.3/0.2 | 1.2/1   | 10.3/5.1 | 42.4/5    | 34.2/6.2 | 11.5/4.7 | 0.19   |
| Морской пляж<br>Sea beach                                   | 0/0  | 0.3/0.4 | 1/1.2   | 1.2/1.1 | 4/2.3   | 24.6/6   | 53/8.7    | 14.2/2.9 | 1.8/0.8  | –0.1   |
| Конвергентные зоны<br>Convergent zones                      | 0/0  | 0/0     | 0/0     | 0/0     | 0.5/0.6 | 6.7/5.6  | 39.7/10.9 | 38.6/8.3 | 14.5/7.1 | 0.02   |
| Линии тока<br>Streamlines                                   | 0.4/0.8  | 0.1/0.1 | 0.3/0.3 | 7.3/7.2 | 11/6    | 24.1/7.3 | 34.2/6.5  | 17.5/4.3 | 5.1/1.8  | –0.02  |
| Дефляционное ложе<br>Deflation bed                          | 4.7/8.3  | 1.9/2.7 | 0.7/0.7 | 0.9/1.2 | 2.2/1.7 | 14/7.2   | 39.4/9.2  | 25.2/8.6 | 10.8/7.6 | –0.5   |

аномалии влажности характерны для открытых песков, причем укрупнение фракционного состава также ведет к уменьшению аномалии влажности (–0.02 %).

В характерном пространственном распределении медианного диаметра (рис. 2, с) трассируется конус выноса повышенной крупности с аномалией крупности отложений до 0.6 мм вдоль оси котловины, указывающая на общее направление миграции песка. Следует отметить градиентную зону крупности 0.3–0.6 мм на правом борту котловины, где может располагаться основной маршрут поступления наносов с пляжа.

Отмечается, что аномалии малого медианного диаметра (до 0.3 мм) характерны как для дефлируемого дюнного вала, так и для современных эоловых образований в областях современной эоловой аккумуляции, а также вдоль пояса растительности согласно принципу пофракционной седиментации в условиях снижения кинетической энергии.

В сортировке песков четко выделяется аномалия с величиной > 2 мкм в центре дефляционного ложа, что свидетельствует о нестабильной аккумуляции, подверженной турбулентности, при которых более мелкие частицы не отлагаются. Подобные аномалии, но более слабые, ~ 1.6 мкм, в тыльной части пляжа, у входа в котловину, а также в тыльной части конуса выноса свидетельствуют о современном транзите-аккумуляции в этих областях. Наилучшая сортировка < 1.4 мкм характерна для современных эоловых отложений лесопокровных территорий, куда проникновение песка наиболее затруднено.

#### *Морфологическая динамика котловины выдувания и потенциал развития ветропесчаного потока*

С использованием метеорологических данных ERA5 и коэффициентов шероховатости местности  $z_0$  был выполнен расчет потенциала эолового переноса

песка  $Q$  (суммарного потока массы) по грациям подстилающей поверхности и крупности песков для периодов наблюдений (табл. 2). Динамика изменения подстилающей поверхности исследуемого участка площадью 50 га по классам, включающим открытые пески, траву, древесную и кустарниковую растительность за исследуемый период, представлена на рис. 3.

По материалам спутниковых наблюдений и аэрофотоснимков, захватывающих период с июля 2012 г. по апрель 2024 г., были установлены характерные темпы изменения подстилающей поверхности по трем классам (рис. 3). По мере продвижения песчаных наносов вглубь приморского дюнного грядового комплекса и прироста объема песчаных масс происходит сокращение покрытия травами-псаммофитами с 60 до 7 % (табл. 2). Площадь, занимаемая древесно-кустарниковой растительностью, демонстрирует общий тренд к снижению с 30 до 26 %. Однако динамика напочвенного покрова нелинейна и, очевидно, отчасти соподчинена фазе жизненного цикла на дату измерений, обеспечивая некоторые межгодовые флуктуации. Наблюдается нелинейное приращение ширины котловины выдувания, после 2018 г. скачкообразно увеличивающееся за счет полной деградации останцов дюнного вала. К 2024 г. ширина котловины составила 160 м.

Комбинация силы ветра, влажности, гранулометрического состава, структуры растительного покрова была выражена в суммарном ветропесчаном потоке  $Q$  (суммарном потоке массы) за 12-летний период (табл. 2). Характерно прослеживается влияние шероховатости на потенциал транспорта различных фракционных составляющих ветропесчаного потока: поток массы снижается по достижении трав и древесно-кустарниковой растительности. Поток массы  $Q$  на закрепленных травянистой растительностью участках насыщен фракциями преимущественно 0.1–0.25 мм. В пределах территорий с древесно-кустарниковыми



**Таблица 2.** Потенциал эолового переноса песка (суммарного потока массы) по градациям шероховатости и крупности  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{м}$ ) и структура подстилающей поверхности за период 2000—2024 гг.

**Table 2.** Aeolian sand transport potential (total mass flux) by gradations of roughness and size  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{m}$ ) and structure of the underlying surface for the period from 2000 to 2024

| Дата<br>Date | Открытые пески<br>Barren                       |  | Покровие травами-<br>псаммофитами<br>Herbaceous |  | Древесно-кустарниковая<br>растительность<br>Wooden |  | Ширина<br>котловины<br>выдувания,<br>$W$ , м<br>Blowout<br>width, $W$ , m |
|--------------|--|--|---|--|--|--|---|
|              | площадь<br>поверхности,<br>coverage area,<br>% | $Q$ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>$Q$ , $\text{m}^3/\text{m}$ | площадь<br>поверхности,<br>coverage area,<br>%  | $Q$ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>$Q$ , $\text{m}^3/\text{m}$ | площадь<br>поверхности,<br>coverage area,<br>%     | $Q$ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>$Q$ , $\text{m}^3/\text{m}$ |   |
| 9/1/2000     | 10   | —  | 60  | —  | 30   | —  | 0   |
| 1/8/2012     | 49   | —  | 22  | —  | 29   | —  | 69  |
| 24/7/2013    | 43   | 59.4   | 22  | 0.015  | 34   | 0.003  | 72  |
| 15/7/2014    | 47   | 105.7  | 24  | 0.022  | 28   | 0.001  | 73  |
| 3/8/2015     | 52   | 100.3  | 24  | 0.024  | 24   | 0.002  | 74  |
| 9/8/2016     | 58   | 82.4   | 19  | < 0.001  | 24   | < 0.001  | 76  |
| 1/4/2017     | 62   | 80.6   | 14  | < 0.001  | 25   | < 0.001  | 80  |
| 29/8/2018    | 62   | 117.9  | 10  | 0.001  | 28   | < 0.001  | 89  |
| 21/8/2019    | 63   | 100.9  | 9   | 0.001  | 28   | < 0.001  | 97  |
| 23/9/2020    | 58   | 100.9  | 14  | 0.001  | 28   | < 0.001  | 148   |
| 3/11/2021    | 59   | 85.0   | 9   | < 0.001  | 31   | < 0.001  | 153   |
| 2/2/2022     | 72   | 72.7   | 4   | 0.005  | 24   | < 0.001  | 157   |
| 21/9/2023    | 63   | 104.5  | 13  | 0.003  | 24   | < 0.001  | 159   |
| 19/10/2023   | 66   | 24.2   | 16  | 0.001  | 18   | < 0.001  | 159   |
| 19/4/2024    | 68   | 84.0   | 7   | 0.001  | 26   | < 0.001  | 160   |

**Таблица 3.** Осредненные по площади морфодинамические характеристики котловины выдувания ( $\Delta h$  — разность высот,  $G_{\text{dir}}$  — азимут морфодинамических изменений (направление геометрической трансформации),  $|G|$  — интенсивность по типам подстилающей поверхности)

**Table 3.** Averaged over the area morphodynamic characteristics of the blowout ( $\Delta h$  — difference in heights,  $G_{\text{dir}}$  — azimuth of morphodynamic changes (direction of transformation),  $|G|$  — intensity by types of underlying surface)

| Дата<br>Date        | Открытые пески<br>Barren         |                  |  | Покровие травами-<br>псаммофитами<br>Herbaceous |                  |  | Древесно-кустарниковая<br>растительность<br>Wooden |                  |  |
|---------------------|----------------------------------|------------------|--|---|------------------|--|--|------------------|--|
|                     | $\Delta h$ , м<br>$\Delta h$ , m | $G_{\text{dir}}$ | $ G $ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>$ G $ , $\text{m}^3/\text{m}$ | $\Delta h$ , м<br>$\Delta h$ , m                | $G_{\text{dir}}$ | $ G $ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>$ G $ , $\text{m}^3/\text{m}$ | $\Delta h$ , м<br>$\Delta h$ , m                   | $G_{\text{dir}}$ | $ G $ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>$ G $ , $\text{m}^3/\text{m}$ |
| —                   | −0.04                            | 298              | 0.037  | −0.04   | 250              | 0.16   | −0.04  | 260              | 0.23   |
| 7/15/2014           | −0.25                            | 120              | 0.039  | −0.25   | 6                | 0.25   | −0.25  | 33               | 0.82   |
| 8/3/2015            | −0.37                            | 104              | 0.046  | −0.37   | 96               | 0.23   | −0.37  | 28               | 0.41   |
| 8/9/2016            | 0.10                             | 137              | 0.015  | 0.10  | 22               | 0.33   | 0.10   | 135              | 1.32   |
| 4/1/2017            | 0.02                             | 168              | 0.016  | 0.02  | 150              | 0.29   | 0.02   | 115              | 0.35   |
| 8/29/2018           | −0.09                            | 133              | 0.009  | −0.09   | 17               | 0.26   | −0.09  | 2                | 0.39   |
| 8/21/2019           | −0.06                            | 49               | 0.039  | −0.06   | 96               | 0.15   | −0.06  | 109              | 0.07   |
| 9/23/2020           | −0.04                            | 301              | 0.021  | −0.04   | 359              | 0.40   | −0.04  | 358              | 0.35   |
| 11/3/2021           | 0.04                             | 201              | 0.020  | 0.04  | 185              | 0.27   | 0.04   | 371              | 0.18   |
| 2/2/2022            | 0.03                             | 34               | 0.017  | 0.03  | 144              | 0.14   | 0.03   | 144              | 0.13   |
| 9/21/2023           | −0.18                            | 29               | 0.006  | −0.18   | 19               | 0.40   | −0.18  | 0                | 0.63   |
| 10/19/2023          | −0.20                            | 52               | 0.042  | −0.20   | 180              | 0.79   | −0.20  | 169              | 0.74   |
| 4/19/2024           | 0.12                             | 127              | 0.045  | 0.12  | 0                | 0.29   | 0.12   | 170              | 0.10   |
| <b>Среднее/Mean</b> | <b>−0.07</b>                     | <b>130</b>       | <b>0.005</b>   | <b>−0.07</b>                                    | <b>45</b>        | <b>0.07</b>  | <b>−0.07</b>                                       | <b>116</b>       | <b>0.08</b>  |



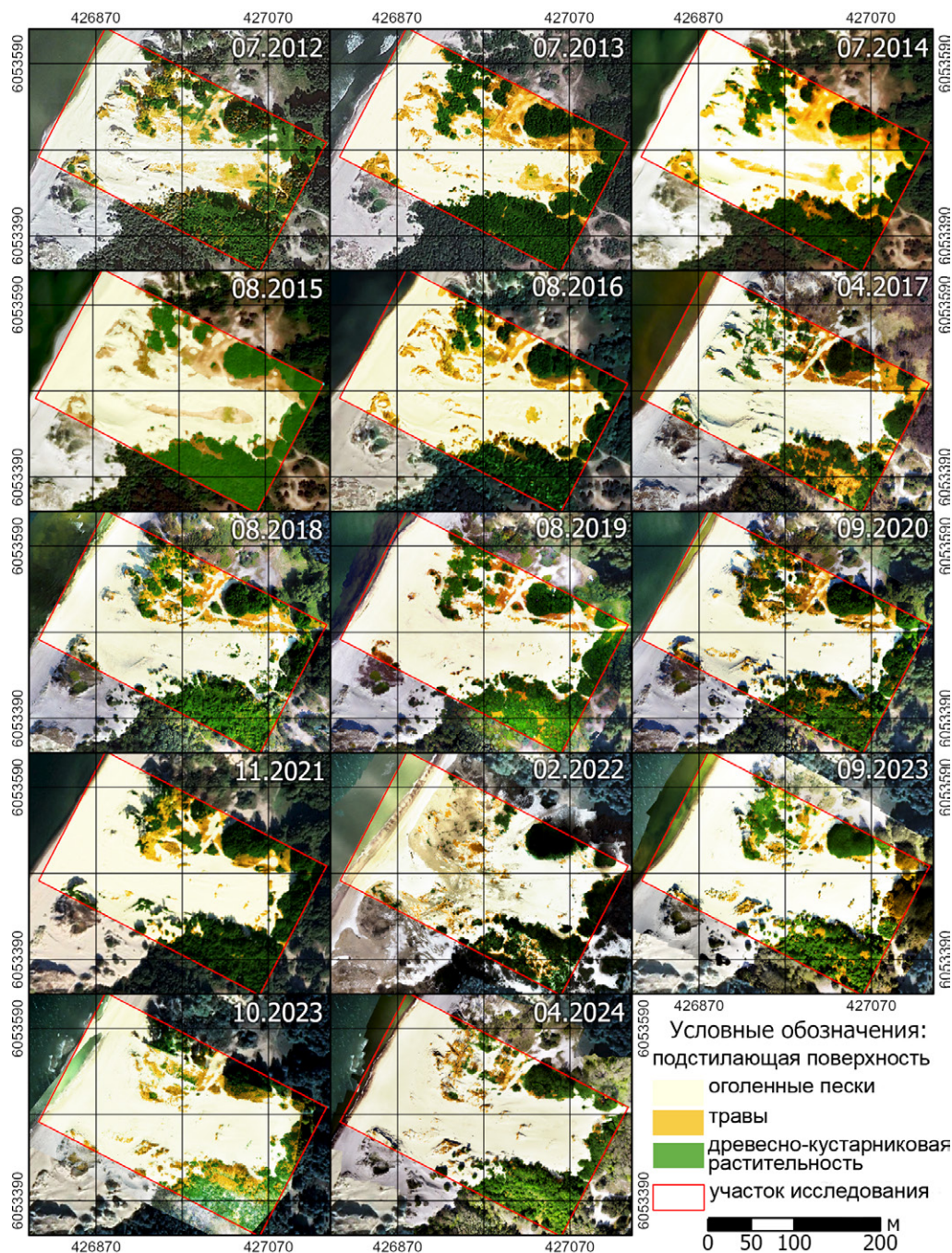


Рис. 3. Панно спутниковых изображений и аэрофотосъемок за период 2012—2024 гг.

Fig. 3. Panel of satellite images and aerial photographs from 2012 to 2024

группировками золотой потенциал ограничен фракцией 0.1 мм, демонстрируя наибольшую возможность для разрежения ветропесчаного потока. Морфодинамические показатели, полученные по результатам анализа ЦМР, приведены в табл. 3.

К 2012—2013 гг. в дюнном валу выработался устойчивый канал дефляционного ложа с конусом выноса песчаного материала (рис. 4), способствующий полноценному вовлечению пляжевых наносов в ветропесчаный поток (табл. 3). В этот период уже не наблюдалось высоких темпов приращения ширины котловины, которые на тот момент зависели от резистивных качеств останцов авантюны. В 2016—2021 гг. приращение ширины происходило скачкообразно, сопровождаясь умеренным эффективным потенциалом ветропесчаного потока, что способствовало аккумуляции

песчаных масс на языке выноса и ассимиляции лесных массивов.

К 2020 г. площадь открытых песков составляла 60 % территории, дефляции подверглись последние останцы авантюны, что отразилось в направлении перемещения песчаного материала, сохранявшего до этого времени восточную ориентацию. К началу 2022 г. в ходе серии последовательных штормовых событий (Belov et al., 2022; Kruglova et al., 2022; Stont et al., 2023a; Stont et al., 2023b) дефляционное ложе котловины многократно подвергалось волновому воздействию. Гидрогенное перемещение обломочного материала в ложе котловины привело к формированию обширной позитивной аномалии перепада высот, а также поля отложений морского мусора. Это позволило псаммофитам появиться в данной области уже





**Рис. 4.** Межгодовая морфодинамика котловины выдувания за период 2012–2024 гг.: цифровые модели разницы высот  $\Delta h$  и перемещения песчаного тела (вектор геометрической трансформации)  $G$ . Стрелки и их цвет указывают на преобладающее направление вектора  $G_{dir}$  и его интенсивность  $|G|$

**Fig. 4.** Interannual morphodynamics of the blowout for the period 2012–2024: DOD  $\Delta h$  and sand body displacement (vector of transformation)  $G$ . The arrows and their coloring indicate the prevailing direction of the vector  $G_{dir}$  and its intensity  $|G|$



к следующему вегетационному сезону, в 2023 г., что можно считать началом перехода в умеренную фазу развития, частично контролируемую пионерной растительностью. В последний штормовой период, в 2023–2024 гг., наблюдалось активное эоловое накопление в области растительных группировок (формирование закустовых бугров), сопровождаемое струйным перемещением песка по «руслам» между ними, способствовавшим поддержанию ассимиляции территорий конусом выноса песчаного материала.

## Обсуждение

*Особенности морфодинамических процессов в прибрежной котловине выдувания*

Наиболее существенной особенностью развития прибрежных котловин выдувания является их подчиненность штормовым событиям, формируемым в Юго-Восточной Балтике циклонической активностью, сопровождаемой осадками. Регулярные поступления атмосферных осадков поддерживают режим влажности и его пространственную неоднородность, что отражается в морфологии и динамике котловины выдувания.

Напрямую изменяя потенциал транспорта песка ветром, влажность снижает дефляционные потери на открытых песках. Для сухих песков достаточно незначительной полосы насыщения для формирования ветропесчаного потока, способствующего перераспределению масс (Delgado-Fernandez, 2010). Это свидетельствует о том, что пространственная неоднородность влажности песка будет иметь большее влияние при ветрах, направленных перпендикулярно котловине, чем при более сильных морских направлениях ветров вдоль оси котловины.

В табл. 4 приведен суммарный ветропесчаный поток  $Q$  (суммарный поток массы), обеспечивающий морфодинамический процесс в котловине выдувания за исследуемый период.

Седиментологическая обстановка связывает влажность песка с его литологическими свойствами, шеро-

ховатостью покрытия и характеризует особенность и неоднородность формирования суммарного ветропесчаного потока  $Q$  (суммарного потока массы). В результате в котловине выдувания формируются паттерны потока объема  $G$ , характеризующие морфодинамический процесс (рис. 5).

В ходе протекания морфодинамического процесса происходит адаптация рельефа под имеющиеся седиментологические условия. Новый рельеф вследствие связности влажных песков пребывает в рефлексивном состоянии, характеризуясь устойчивыми и крутыми склонами. Дальнейшая релаксация и перераспределение потенциальной энергии, накопленной при слоистой аккумуляции песка, изменяет форму эолового рельефа на диссипативную, формируя аккумулятивные языки.

По окончании эффективных ветровых событий при высыхании песка под действием гравитационных сил происходит выполаживание до угла естественного откоса. При этом поверхностное высыхание песка приводит к его осыпанию и формированию струек течений, сопровождающемуся оголением корневых систем растений. На активных осыпных склонах конусов выноса песчаного материала такое направление может иметь вектор, обратный направлению эффективных ветров (рис. 5, е, f). Резкое разрежение потока на границе такого элемента шероховатости создаст толстый рефлексивный слой с почти отвесными углами наклона, а аномалией влажности обеспечивается его устойчивость. При высыхании адгезионные связи ослабевают, существующие цепочки напряжений между песчинками разрушаются и толща осыпается.

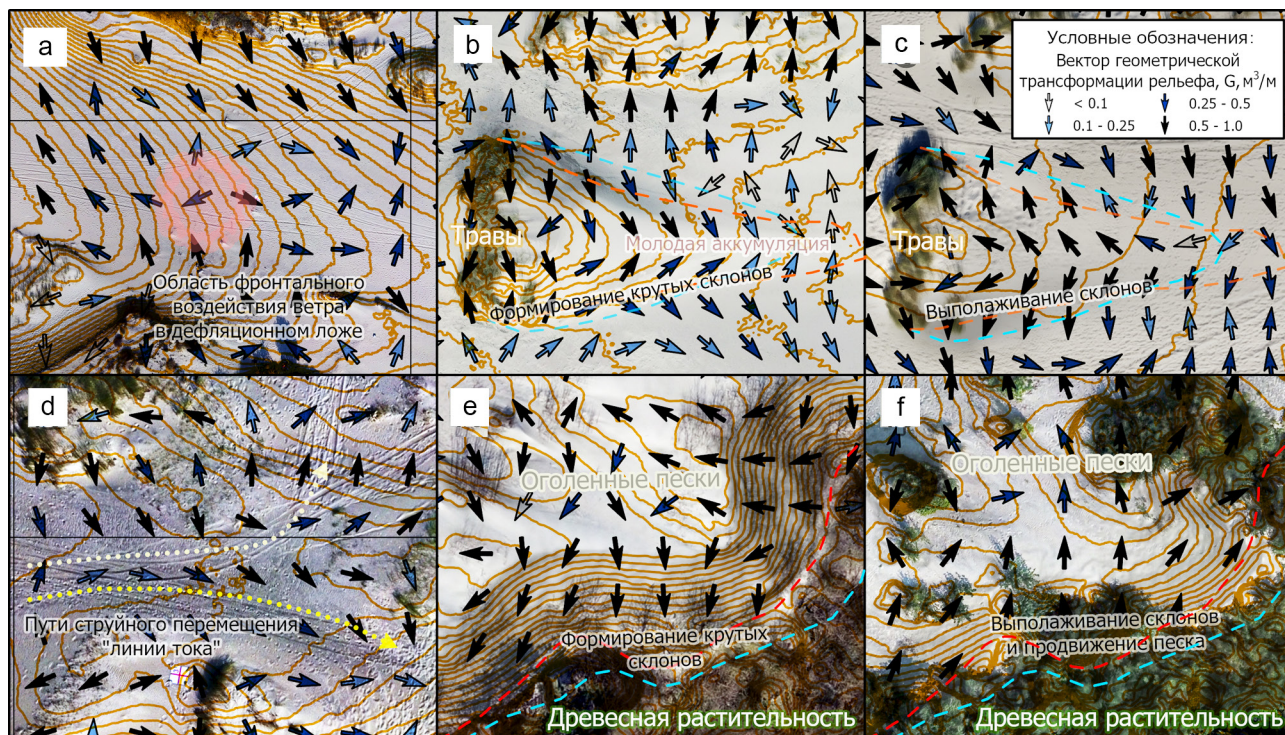
Определение количественных характеристик типичных морфодинамических процессов и их паттернов позволяет нормировать влияние внешних явлений на развитие рельефа. В котловинах выдувания нарушается поперечная зональность морфодинамических процессов, характерная для прибрежного эолового рельефа (Danchenkov et al., 2019).

**Табл. 4.** Ветропесчаный поток  $Q$  (поток массы) ( $\text{м}^3/\text{м}/12$  лет) для характерных седиментологических обстановок (потенциал эолового транспорта с учетом грансостава и влажности). Приведена сумма потока  $Q$  за 2012–2024 гг.

**Table 4.** Aeolian sand flux  $Q$  (mass flux) ( $\text{м}^3/\text{м}/\text{for } 12 \text{ years}$ ) for typical sedimentological environment (aeolian transport potential with consideration of grain composition and moisture). The sum of flux  $Q$  for 2012–2024

| Седиментологическая обстановка<br>Sedimentation environment | Диаметр частицы $D$ , мм / Grain diameter $D$ , mm |      |       |     |      | Суммарный ветропесчаный поток $Q$ , $\text{м}^3/\text{м}$<br>Total aeolian flux $Q$ , $\text{м}^3/\text{м}$ |
|---|--|------|-------|-----|------|---|
|   | 0.1  | 0.25 | 0.355 | 0.5 | 0.71 |   |
| Открытые пески / Barren                                     | 478  | 405  | 220   | 15  | 0    | 1118  |
| Травы / Herbaceous  | 0.07   | 0    | 0     | 0   | 0    | 0.07  |
| Древесно-кустарниковая растительность / Wooden              | 0.01   | 0    | 0     | 0   | 0    | 0.01  |
| Морской пляж / Sea beach                                    | 92   | 186  | 231   | 19  | 0    | 528   |
| Конвергентные зоны<br>Convergent zones                      | 675  | 351  | 99    | 2   | 0    | 1127  |
| Линии тока / Streamlines                                    | 245  | 180  | 103   | 10  | 0    | 538   |
| Дефляционное ложе<br>Deflation bed                          | 743  | 932  | 842   | 132 | 7    | 2656  |





**Рис. 5.** Характерные паттерны геометрической трансформации: а — морфодинамический «вихрь» в наветренной части дефляционного ложа; б — локальные каналы усиления транспорта — «линии тока», вызванные эффектом Вентури; с — конвергентные морфодинамические структуры в областях эоловой аккумуляции в рефлексивном состоянии после штормового события; д — те же структуры после релаксации от просушки и осыпания (диссипативное состояние); е — наращивание песчаного тела перед лесной и кустарниковой растительностью после штормового события в рефлексивном состоянии; ф — то же тело, ассимилировавшее новую площадь через 16 месяцев после релаксации

**Fig. 5.** Typical patterns of the relief transformation vector: а — morphodynamic «vortex» in the windward part of the deflationary bed; б — local amplification channels — «streamlines» caused by the Venturi effect; с — convergent morphodynamic structures in areas of aeolian accumulation in the reflective state after a storm event; д — same structures after relaxation after drying and shattering (dissipative state); е — sand body buildup in front of woody and shrubby vegetation in a reflective condition following a storm event; ф — same body, which assimilated a new area in 16 months after relaxation

#### Морфодинамика котловины выдувания и ее связь с ландшафтной структурой

Морфологическое развитие котловины выдувания в активной геоморфологической фазе зависит от структуры растительных сообществ дефляционно-аккумулятивной равнины и связано с шириной котловины. Мозаичность прибрежной растительности от древесно-кустарниковых группировок до разреженных сообществ псаммофитной растительности трансформирует эоловые потоки, выступая в качестве элементов аккумуляции, и поглощает часть импульса, переданного ветром. Такие локальные шероховатости приводят к уменьшению дефляции и способствуют аккумуляции. Изменение структуры растительного покрова вследствие динамических процессов, приводящих к погребению растительности на отдельных участках, создают новый фон для протекания эоловых процессов и дальнейшего развития котловины выдувания.

Степень трансформации воздушных потоков зависит от степени закрепления открытых участков растительностью и структуры надпочвенного покрова (для него характерны значения шероховатости  $z_0 \approx 0.07-0.30$ ); для контактных участков дюнной гряды — пальве (дефляционно-аккумулятивная равнина с подветренной стороны дюнного вала) с древесно-кустарниковой растительностью ( $z_0 \approx 0.07-1.30$ ). Аккумуляция

песчаного материала на этих площадях происходит на большей площади и более тонким слоем ( $\Delta h + 0.1 \text{ м/год}$ ). На участках с древесно-кустарниковой растительностью ( $z_0 \approx 0.3-2.0$ ) отмечается, что коррелированность убывания площади с шириной котловины проявляется заметно позже (через 12 лет после инициации), по мере наращивания толщи песка ( $\Delta h \approx +1-1.5 \text{ м/год}$ ) и формирования крутых наветренных склонов конусов выноса. Древесно-кустарниковая растительность вызывает разряжение ветропесчаного потока и формирование высоких, до 7—10 м, крутых (30—32°) подветренных склонов аккумулятивного языка (конуса выноса песчаного материала).

Наибольшая морфолитодинамическая активность наблюдается при переходе чашевидных котловин выдувания к сквозным котловинам, когда происходит объединение двух типов потоков: к потоку котловины добавляется поток пляжа, следующего через разрыв. На входе в котловину происходит сужение сечения потока, что приводит к увеличению скоростей движения (Gouramanis et al., 2024; Lamy et al., 2024) и формированию области пониженного давления, подсасывающей песок.

По мере развития аккумулятивных тел переход от активной фазы к умеренной происходит за счет развития растительных сообществ преимущественно на

открытых участках вследствие достижения пороговой ширины (150 м), уже не обеспечивающей достаточное локальное ускорение ветра.

На этом этапе начинает наиболее ярко проявляться закономерность, являющаяся формой эффекта Вентури: с ходом времени на поверхности песка развиваются связанные струи тока песчаного материала, обеспечивающие как постепенное движение песчаного тела, так и формирование на его поверхности «русел» для поддержания такого процесса. Согласно наблюдениям, на «старых» аккумулятивных образованиях, дюнных валах и авандюнах такие линии тока формировались в местах расположения бывших чашевидных котловин, а на поверхности аккумулятивного языка (конуса выноса) они соотносятся с междюнными понижениями со сформированным растительным покровом, представленным как участками с сохранившимися сообществами, так и новой генерацией псаммофитов.

Известно, что толщина слоя сальтации зависит от медианного диаметра и составляет на практике 0.05—0.11 м (Martin & Kok, 2017). Это позволяет предположить, что формирование локальных струй в штормовых условиях может продолжаться в течение достаточно длительного периода времени, что может быть одной из причин продолжительного перехода к этапу зарастания травами и формированию устойчивого покрова. Формирующиеся закустовые бугры способствуют сужению сечения потока, формируя канал сходящейся-конической формы, при этом струйный транспорт песка поддерживает процесс движения песчаного тела. Это может свидетельствовать о наличии механизма саморазвития, поддерживающего функционирование котловины при колонизации травами-пионерами, препятствуя полному зарастанию. Наблюдаемые нами тенденции не позволяют однозначно определить сроки деактивации котловины выдувания, поскольку такой механизм поддерживает движение песчаного материала и создает условия для реактивации стабилизированных участков.

В зависимости от характера растительности и геоморфологической структуры (наличие положительных форм рельефа на пути движения песка / осложнение форм рельефа) темпы продвижения аккумулятивных языков (конусов выноса песчаного материала) варьировались: на открытых участках — до 18 м/год, при касательном контакте — до 11 м/год, на участках с древесно-кустарниковыми группировками — до 8 м/год.

Переход дюн из стабильного в активное состояние (реактивация) через возникновение и развитие котловин выдувания является очевидной частью общих тенденций деградации прибрежных дюн. Развитие котловин выдувания приводит к увеличению площади открытых песков ввиду миграции и, как следствие, потере биоразнообразия, опасности для объектов инфраструктуры, увеличению эксплуатационных расходов.

При этом стабилизация конусов выноса песчаного материала растительностью способствует формированию дополнительных естественных барьеров от штормовых нагонов в условиях роста уровня моря и интенсификации береговой эрозии, поскольку мощность песчаной толщи может достигать отметок 10—12 м выше уровня моря, что соответствует высоте дюн-

ного вала. На ландшафтном уровне подобный механизм, вероятно, неоднократно проявлялся в ходе формирования Вислинской косы, постепенно генерируя палеодюны, которые по настоящее время наблюдаются в рельефе (Badyukova et al., 2011).

## Заключение

Развитие котловины выдувания на морском берегу как многокомпонентной системы соподчинено сложной климатической, экологической и геоморфологической связи. Соотношение количества эффективной ветровой энергии с мозаичным проявлением лимитирующих факторов (влажности, шероховатости, гранулометрической композиции), протекающих на фоне морфологически динамичной поверхности неконсолидированного осадка и модификаторов тока — различных растительных сообществ, определяет темп дефляционно-аккумулятивных процессов, а также проявление характерных морфодинамических паттернов и процессов, стимулирующих вовлечение новых площадей. Так, даже на этапе умеренной геоморфологической активности, после достижения пороговой ширины котловины струйный характер эоловых потоков за счет множественных, самоорганизующихся в пределах аномалий влажности или шероховатости сужений сечений создают локальные ускорения в пределах слоя сальтации за счет эффекта Вентури. Создаваемая струя в конически-расходящемся канале имеет более высокий литодинамический потенциал и может транспортировать как большие объемы мелкого, так и крупный материал дальше в направлении линий тока. На этапе активного формирования эрозионного коридора такой эффект формируется самой котловиной выдувания до момента достижения критического размера, зависящего от ветро-волновых процессов и объема поступающих наносов, а также присутствия аномалий: растительности, палеопочв, морского мусора, унаследованного рельефа. Наибольшей седиментационной эффективностью обладает древесно-кустарниковая растительность. При этом формируется особая обстановка миграции песка, эолового вертикального накопления влажных песков с последующей фазой пересыхания, осыпания и горизонтальной миграции в текучей форме. Травянистая растительность, обладающая умеренным седиментационным потенциалом, формирует крупные аномалии влажности и конвергентные морфодинамические паттерны, существенно разряжая эоловый поток от мелкой фракции, обладающей высокой влагоемкостью, что способствует реколонизации травами. При этом создаваемые резистивными формами рельефа поперечные сечения поддерживают эоловый поток. Развивающиеся котловины выдувания при морфологической адаптации ассимилируют новые территории в процессе опустынивания, что обуславливает необходимость проведения восстановительных мероприятий на наиболее ранних этапах.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-77-01039.*

## Литература / References

Бадюкова Е. Н., Жиндарев Л. А., Лукьянова С. А., Соловьева Г. Д. Геолого-геоморфологическое строение Балтий-





- ской (Вислинской) косы // Океанология. 2011. № 51(4). С. 675—682
- Badyukova E. N., Zhindarev L. A., Luk'yanova S. A., Solov'eva G. D. Geological and geomorphological structure of the Baltic (Vistula) Spit. *Oceanology*, 2011, No. 51(4), pp. 675—682. (in Russian)
- Белов Н. С., Шаплыгина Т. В., Данченков А. Р., Волкова И. И. Оценка воздействия штормов 2022 года на Балтийскую косу (1-й км) // Проблемы приграничья. Новые траектории международного сотрудничества. 2022. С. 134—138.
- Belov N. S., Shaplygina T. V., Danchenkov A. R., Volkova I. I. Impact assessment of 2022 storms on the Baltic Spit (1st km). *Border problems. New trajectories of international cooperation*, 2022, pp. 134—138. (in Russian)
- Капустина М. В., Зимин А. В. Изменчивость характеристик апвеллинга в юго-восточной части Балтийского моря в первые два десятилетия XXI века // Морской гидрофизический журнал. 2023. № 39(6(234)). С. 797—813.
- Kapustina M. V., Zimin A. V. Variability of Upwelling Characteristics in the Southeastern Baltic Sea in the First Two Decades of the 21st Century. *Marine Hydrophysical Journal*, 2023, No. 39(6(234)), pp. 797—813. (in Russian)
- Круглова Е. Е., Семилетова Д. Д., Борисов М. А., Данченков А. Р., Стонт Ж. И., Кречик В. А. Волнение и колебание уровня моря в январе 2022 г. у северного побережья Калининградской области // Морские исследования и образование (MARESEDU) — 2022. 2022. С. 162—166.
- Kruglova E. E., Semiletova D. D., Borisov M. A., Danchenkov A. R., Stont Z. I., Krechik V. A. Waves and sea level fluctuations in January 2022 off the northern coast of the Kaliningrad region. *Marine Research and Education (MARESEDU)* — 2022, 2022, pp. 162—166. (in Russian)
- Bannister A., Raymond S., Baker R. *Surveying*. Harlow. 1998.
- Blott S. J., Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments // *Earth surface processes and Landforms*. 2001. No. 26(11). P. 1237—1248. DOI: 10.1002/esp.261
- Danchenkov A. R., Belov N. S. Morphological changes in the beach-foredune system caused by a series of storms. Terrestrial laser scanning evaluation // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2019. No. 19(4). 4 p. DOI: 10.2205/2019ES000665
- Danchenkov A. R., Belov N. S. Comparative Analysis of the Unmanned Aerial Vehicles and Terrestrial Laser Scanning Application for Coastal Zone Monitoring // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. No. 23(4), 4008 p. DOI: 10.2205/2023es000854
- Delgado-Fernandez I. A review of the application of the fetch effect to modelling sand supply to coastal foredunes // *Aeolian Research*. 2010. No. 2(2—3). P. 61—70. DOI: 10.1016/j.aeolia.2010.04.001
- Dong Z., Gao S., Fryrear D. W. Drag coefficients, roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation // *Journal of Arid Environments*. 2001. No. 49(3). P. 485—505. DOI: 10.1006/jare.2001.0807
- Du Pont S. C., Rubin D. M., Narteau C., Lapôtre M. G., Day M., Claudin P., ... & Wiggs G. F. Complementary classifications of aeolian dunes based on morphology, dynamics, and fluid mechanics // *Earth-Science Reviews*. 2024. No. 255, 104772 p. DOI: 10.1016/j.earscirev.2024.104772
- Duarte-Campos L., Wijnberg K. M., Hulscher S. J. Estimating annual onshore aeolian sand supply from the intertidal beach using an aggregated-scale transport formula // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2018. No. 6(4). 127 p. DOI: 10.3390/jmse6040127
- Flor G. S., Martínez P. Saucer blowouts in the coast dune fields of NW Spain, Iberian Peninsula. 2023. DOI: 10.21203/rs.3.rs-3412700/v1
- Folk R. L., Ward W. C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters // *Journal of sedimentary research*. 1957. No. 27(1). P. 3—26. DOI: 10.1306/74D70646-2B21-11D7-8648000102C1865D
- Goodin W. R., McRa G. J., Seinfeld J. H. A comparison of interpolation methods for sparse data: Application to wind and concentration fields // *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. 1979. No. 18(6). P. 761—771. DOI: 10.1175/1520-0450(1979)018<0761:ACOIMF>2.0.CO;2
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., ... & Thépaut J. N. The ERA5 global reanalysis // *Quarterly journal of the royal meteorological society*. 2020. No. 146(730). P. 1999—2049. DOI: 10.1002/qj.3803
- Kawamura R. Study on sand movement by wind // *Report*. 1951. № 5(3), pp. 95—112.
- Laporte-Fauret Q., Castelle B., Marieu V., Nicolae-Lerma A., Rosebery D. Foredune blowout formation and subsequent evolution along a chronically eroding high-energy coast // *Geomorphology*. 2022. No. 414. 108398 p. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108398
- Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons. 2010.
- Martin R. L., Kok J. F. Distinct thresholds for the initiation and cessation of aeolian saltation from field measurements // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 2018. No. 123(7). P. 1546—1565. DOI: 10.1029/2017JF004416
- Sherman D. J. An equilibrium relationship for shear velocity and apparent roughness length in aeolian saltation // *Geomorphology*. 1992. No. 5(3—5). P. 419—431. DOI: 10.1016/0169-555X(92)90016-H
- Sibson R. A brief description of natural neighbour interpolation // *Interpreting multivariate data*. 1981. P. 21—36.
- Stont Z. I., Bobykina V. P., Ulyanova M. O. «Diving» cyclones and consequences of their impact on the coasts of the south-eastern Baltic Sea // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023a. No. 23(2). 2001 p. DOI: 10.2205/2023ES000827
- Stont Z. I., Esiukova E. E., Ulyanova M. O. Clusters of cyclones and their effect on coast abrasion in Kaliningrad region // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023b. No. 23(3). P. 1—13. DOI: 10.2205/2023ES000826
- Tsoar H. Bagnold, RA 1941: The physics of blown sand and desert dunes. London: Methuen // *Progress in physical geography*. 1994. No. 18(1). P. 91—96. DOI: 10.1177/030913339401800105
- Zhou Y., Hasi E., Wang Z., Qing D., Han X., Yin J., Wu Z. Dynamics of blowouts indicating the process of grassland desertification // *Land Degradation & Development*. 2022. No. 33(15). P. 2885—2897. DOI: 10.1002/ldr.4362

Поступила в редакцию / Received 21.05.2025





## Влияние пробоподготовки на точность определения состава флюида в кварце методом газовой хроматографии при термическом вскрытии включений

С. Н. Шанина<sup>1</sup>, М. А. Корекина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия, [shanina@geo.komisc.ru](mailto:shanina@geo.komisc.ru)

<sup>2</sup> Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН, тер. Ильменский заповедник, Миасс, Россия, [maria29878vba@mail.ru](mailto:maria29878vba@mail.ru)

Рассмотрено влияние пробоподготовки на точность определения углекислого газа и воды во флюидных включениях в кварце методом газовой хроматографии с применением нагревания как способа вскрытия включений. Установлено, что для получения корректных результатов необходим тщательный контроль кварцевой крупки на всех этапах пробоподготовки. Показано, что исключение предварительного отбора зерен кварца под бинокулярным микроскопом, даже при исследовании высокочистых прозрачных зерен кварца, может привести к существенным ошибкам в определении содержания углекислого газа и воды. В случаях, когда кварцевые зерна содержат сростки с включениями магнитных и слабомагнитных минералов и (или) покрыты пленками гидроокислов железа, стандартные процедуры пробоподготовки, включающие дробление кварца, отбор мономинеральной фракции, обработку нагретыми растворами кислот, тщательное промывание в бидистиллированной воде с последующей сушкой, оказываются недостаточными при использовании термической деструкции как способа вскрытия включений. Для соотнесения полученных данных с составом флюидных включений в подобных образцах рекомендуется вводить в схему пробоподготовки дополнительный этап – электромагнитную сепарацию.

**Ключевые слова:** газовая хроматография, кварц, флюидные включения

## Effect of sample preparation on the accuracy of determination of composition of fluid released from quartz by gas chromatography during thermal opening of inclusions

S. N. Shanina<sup>1</sup>, M. A. Korekina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS, Syktyvkar, Russia

<sup>2</sup> South Urals Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass, Russia

The effect of sample preparation on the accuracy of carbon dioxide and water determination in fluid inclusions contained in quartz by pyrolytic gas chromatography is considered. It is established that careful control of quartz at all stages of sample preparation is necessary to obtain correct results. It is shown that exclusion of the stage of preliminary selection of quartz grains under a binocular microscope, even in the case of studies of high-purity, transparent quartz, can lead to significant errors in determining the content of carbon dioxide and water. It is established that in cases when quartz grains contain intergrowths with inclusions of magnetic and weakly magnetic minerals and/or are covered with iron oxide films, standard sample preparation procedures including quartz crushing, selection of a monomineral fraction, treatment with heated acid solutions, thorough washing in bidistilled water with subsequent drying, are insufficient when using pyrolysis as a method for opening inclusions. In this connection, to correlate the obtained data with the composition of fluid inclusions in such samples, it is recommended to include an additional stage in sample preparation – the electromagnetic separation.

**Keywords:** gas chromatography, quartz, gas-liquid inclusions

### Введение

Пиролитическая газовая хроматография широко применяется для анализа состава газов во включениях в минералах и горных породах (Осоргин, 1990; Миронова, Салазкин, 1993; Крейсберг и др., 2007; Миронова, 2010 и др.). Метод позволяет определять состав газовой фазы, выделяющейся из породы при её нагревании в заданном температурном интервале. Результаты исследований дают информацию об условиях минералообразования, температуре и химическом составе природных растворов, а также имеют прикладное значение при оценке качества минерального сырья, установлении геохимических аномалий и т. д.

Источниками газовых компонентов при нагревании минералов и горных пород являются не только флюидные включения в минералах, но и присутствующие легкоразложимые микроминеральные включения, микропоры и структурные дефекты, включения органического вещества, а в ряде случаев и сам природный объект (Осоргин, 1990). Ещё одним источником газовых компонентов служат поверхности минералов, часто обладающие большой адсорбционной способностью (Ходаков, 1966; Barker, Torkelson, 1975; Куприн, Щербаков, 1996).

Подготовка образца к анализу в значительной мере зависит от задач исследования. При изучении газо-

**Для цитирования:** Шанина С. Н., Корекина М. А. Влияние пробоподготовки на точность определения состава флюида в кварце методом газовой хроматографии при термическом вскрытии включений // Вестник геонаук. 2025. 7(367). С. 28–34. DOI: 10.19110/geov.2025.7.3

**For citation:** Shanina S. N., Korekina M. A. Effect of sample preparation on the accuracy of determination of composition of fluid released from quartz by gas chromatography during thermal opening of inclusions. Vestnik of Geosciences, 2025, 7(367), pp. 28–34, DOI: 10.19110/geov.2025.7.3



вого состава флюидных включений методом пиролической газовой хроматографии образец должен соответствовать определенным требованиям по отсутствию разлагающихся минералов и загрязняющих примесей, а также размеру анализируемой фракции. Обычно для исследования состава флюидных включений методом термической деструкции размер анализируемой фракции должен превышать размер включений не менее чем в 10 раз (Миронова, Салазкин, 1993). Это позволяет снизить вклад термодесорбции с поверхности фракции. Таким образом часто удовлетворяет фракция 0.25–0.5 мм. Для очистки образца обычно необходим тщательный отбор материала под микроскопом и его последующая обработка разбавленными кислотами (Миронова, Салазкин, 1993; Осоргин, 1990). Согласно результатам исследований метод термической деструкции применим вплоть до содержаний  $2.6 \cdot 10^{-4}$  мас. % для  $\text{CO}_2$  и  $1 \cdot 10^{-3}$  мас. % для  $\text{H}_2\text{O}$ . Ниже этих значений интерпретация полученных результатов обусловлена только процессами их десорбции с образца и «гашением» самой хроматографической системы (Миронова, Салазкин, 1993).

В данной статье мы бы хотели ещё раз напомнить, какое значение может оказать пробоподготовка образца на достоверность получаемых результатов при изучении включений в минералах деструктивными методами анализа. Основная цель работы — оценка влияния пробоподготовки крупки из кварцевых агрегатов на выделение углекислого газа и воды в процессе нагревания образцов. Эти два компонента обычно преобладают в составе флюидных включений в кварце (Миронова, 2010). Их содержания являются одним из важнейших критериев при определении качества кварцевого сырья (Крейсберг и др., 2007). Соотношения этих компонентов друг с другом, а также с другими газами используют для установления степени окисленности летучих компонентов, а также как критерии при оценке золотоносности кварцевых жил (Долгов и др., 1990; Томиленко, Гибшер, 2001; Гибшер и др., 2011).

Вода в кварце может содержаться в газовой-жидких включениях, микропорах, минеральных включениях, находиться в кристаллической решетке в виде примесных водородных дефектов и адсорбироваться по трещинам в кристаллах (Миронова, Салазкин, 1993). Для удаления основной части воды, сорбированной поверхностью кварцевых зерен, обычно достаточно прогреть кварцевую крупку до  $100^\circ\text{C}$  непосредственно перед исследованием. Дальнейшее нагревание образца в температурном диапазоне до  $600^\circ\text{C}$  приводит к выделению воды из крупных включений, а при нагревании до  $1000^\circ\text{C}$  — из мелких включений и удалению молекулярно-дисперсной воды, растворенной в структуре кварца. Однако в кварцевых образцах нередко содержатся твердые минеральные примеси иногда микронных размеров, в том числе водосодержащие (магнетит, флогопит, гидрогетит, хлорит, мусковит, биотит и т. д.), которые не всегда удается полностью удалить в процессе отбора монофракции при небольших увеличениях бинокулярного микроскопа. Существенное снижение этих примесей возможно только при предварительном применении специальных методов пробоподготовки, приводящих к удалению магнитных техногенных частиц, магнитных и слабо-

магнитных минералов, а также находящихся с ними в сростках минералов. Основная часть углекислого газа, определяемого при нагревании кварцевых проб, связана с флюидными включениями. Но в случае нагревания образца его источником могут также оказаться микропримеси кальцита и органического вещества. Так, в работе Осоргина (1990) показано, что при разложении всего лишь 0.02 % мас. примеси кальцита из образца может выделиться 90 мкг/кг углекислого газа. Кроме того, углекислый газ хорошо адсорбируется и удерживается на поверхности многих минеральных зерен (Миронова, Салазкин, 1993; Barker, Torkelson, 1975). По данным Миронова, Салазкиной (1993), на поверхности кварца в состоянии хемосорбции может присутствовать до 30 мкг  $\text{CO}_2$  на 1 г кварца, что довольно существенно, особенно в случаях, когда образцы содержат мало включений. Согласно исследованиям (Ченцов, 2002\*; Рыжов, Бальчугов, 2010) воздействие электромагнитного поля может приводить к десорбции газов с поверхности материалов.

### Методы исследований и образцы

Отбор зерен кварцевой крупки осуществлялся в отраженном свете с помощью бинокулярного микроскопа МБС-10. Электронно-микроскопические исследования микропримесей в кварцевых зернах проводены с помощью микроскопа KY-KY EM-6900, оснащенного энергодисперсионным спектрометром X-MAX Oxford Instruments с программным обеспечением AZtec Advanced.

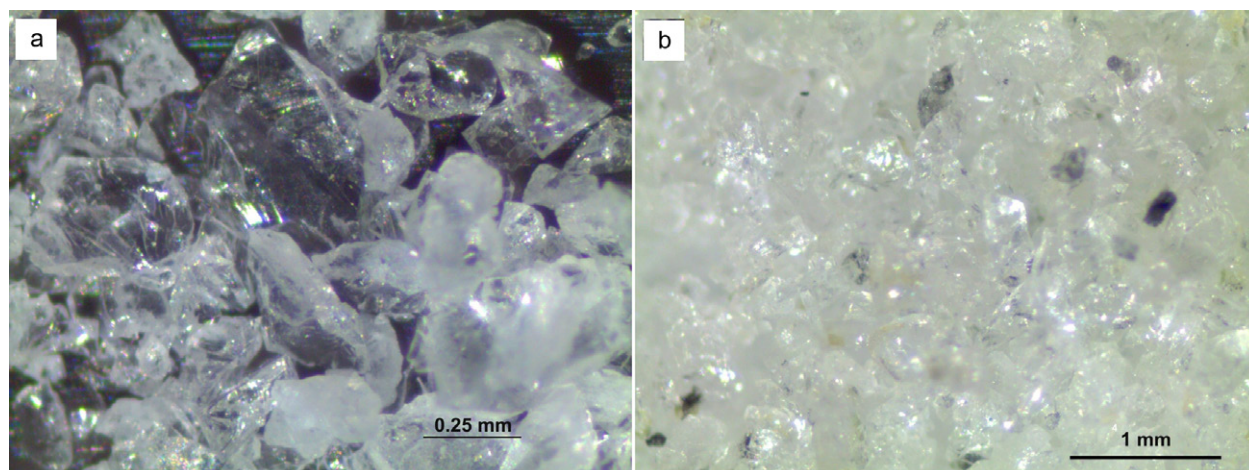
Исследования состава газов выполнялись на газовом хроматографе «Цвет-800», соединенном с пиролической приставкой для термического вскрытия включений. В работе использовались кварцевые навески массой 0.5 г, фракция 0.25–0.5 мм. Предварительно кварцевая крупка прогревалась до  $100^\circ\text{C}$  в течение 60 минут в токе гелия для удаления с поверхности адсорбированной воды и газов. Нагрев образцов проводился однократно или ступенчато до температуры  $1000^\circ\text{C}$  в кварцевом реакторе в атмосфере гелия в течение 3 минут. Выделяющиеся при этом газовые компоненты не оставались в реакторе, а накапливались на форколоне при температуре жидкого азота. Минимально определяемое содержание компонентов составляет 1.1 мкг/г для  $\text{H}_2\text{O}$  и  $8 \cdot 10^{-3}$  мкг/г — для  $\text{CO}_2$ . Более подробно методика описана в работе (Петровский и др., 2008).

Исследования проведены на примере молочно-белого кварца Ларинского и полупрозрачного кварца Вязовского месторождений (Южный Урал).

Образцы кварца Ларинского месторождения представляют несколько основных типов кварца (перекристаллизованный (гранулированный), блокованный, шестоватый крупно- и гигантозернистый), каждый из которых характеризуется специфическими структурно-текстурными особенностями (Корекина и др., 2024). Во всех типах кварца минеральные включения представлены единичными чешуйками мусковита, хлорита,

\* Ченцов М. С. Влияние электрофизических воздействий на сорбционно-десорбционные процессы в системе «твердое тело — газ»: Автореф. дис. ... к. т. н. (02.00.21). СПб., 2002. 20 с.





**Рис. 1.** Микрофотографии зерен кварца: а — крупка блокованного кварца (образец Л-4), б — крупка крупнозернистого шестоватого кварца, в которой зерна кварца содержат сростки с магнетитом (образец Л-11)

**Fig. 1.** Images of quartz grains: а — block quartz grains (sample L-4), б — coarse-grained columnar quartz grains in which the quartz grains contain intergrowths with magnetite (sample L-11)

зернами магнетита. В перекристаллизованном кварце подобные включения преобладают в межзерновом пространстве, в шестоватом кварце обычно диагностируются в сростках с зернами кварца и очень редко встречаются в блокованном кварце (рис. 1). Кроме того, в ряде образцов крупно- и гигантозернистого кварца (Л-6, Л-8, Л-10-1, Л-13-3, Л-15-4) на поверхности кварцевых зерен установлено присутствие тонких пленок окисления.

Образцы кварца Ларинского месторождения готовились для анализа как по стандартной методике (дробление, отбор мономинеральной фракции, обработка разбавленной азотной кислотой (1:1), промывание бидистиллированной водой), так и с предварительным обогащением электромагнитной сепарацией (дробление, электромагнитная сепарация, отбор мономинеральной фракции, обработка разбавленной азотной кислотой (1:1) с последующей отмывкой бидистиллированной водой). Кварцевые зерна большинства подготовленных проб визуально имели белую или прозрачную окраску. Цвет крупки образца Л-13-3, подготовленной по стандартной методике, несмотря на отбор зёрен под бинокулярным микроскопом и дальнейшую обработку разбавленной азотной кислотой, имел желтоватый оттенок. Изначально данный образец отличался от других значительным содержанием пленок железосодержащих минералов на поверхности кварцевых зерен.

Образцы Вязовского месторождения представлены гранулированным кварцем. В связи с его высокой прозрачностью и чистотой было изучено влияние исключения из пробоподготовки кварцевой крупки этапы отбора мономинеральной фракции.

### Результаты и обсуждение

Данные по содержанию воды и углекислого газа в изученных пробах Ларинского месторождения приведены в таблице 1. Во многих образцах, подготовленных по стандартной методике, содержания воды и углекислого газа оказались существенно выше, чем в образцах, обогащенных методом электромагнитной сепарации. Причём это характерно для всех типов

изученного кварца: крупно- и гигантозернистого, блокованного и перекристаллизованного. Особенно заметна разница в содержаниях воды и углекислого газа для образцов шестоватого крупно- и гигантозернистого кварца с присутствием плёнок окисления на поверхности кварцевых зерен. Так, в образце Л-13-3 содержание воды при использовании метода электромагнитной сепарации уменьшилось более чем в три раза, а углекислого газа в 4.6 раз.

Результаты электронно-микроскопических исследований микропримесей в шестоватом кварце Ларинского месторождения показали, что даже после отбора кварца вручную при небольших увеличениях бинокулярного микроскопа на поверхности его зёрен или в сростках с ними могут оставаться посторонние минеральные примеси, в том числе содержащие гидроксильные группы. Так, например, на поверхности зёрен гигантозернистого кварца (обр. Л-6) обнаружены пленки гидроокислов железа, а в сростках с кварцевыми зернами идентифицированы водосодержащие минералы хлорит и мусковит (рис. 2). В процессе нагревания из подобных примесей будет выделяться вода, причем температурные интервалы ее выделения обычно совпадают с интервалами вскрытия газожидких включений в кварце. Так, в области 400–600 °С выделяется вода, связанная с разложением хлоритов (Иванова, 1949), а удаление ОН-групп из гидрогетита происходит в интервале 240–370 °С. Причём из гетита может выделяться до 10 мас. % воды (Грибов, Долотов, 2012), что, конечно же, будет вносить существенный вклад в состав определяемых летучих компонентов. Похожим образом ведёт себя и углекислый газ: в большинстве образцов после проведения электромагнитной сепарации происходит уменьшение его содержания. Это связано с удалением из кварцевой крупки магнитных включений (Barker, Torkelson, 1975) и, вероятно, десорбцией CO<sub>2</sub> с поверхности кварцевых зерен под воздействием электромагнитного поля (Ченцов М.С., 2002). Влияние разложения карбонатных минералов для данных образцов мы практически исключаем, поскольку по результатам электронно-микроскопических исследований подобные микропримеси в кварце Ларинского месторождения не были обнаружены.





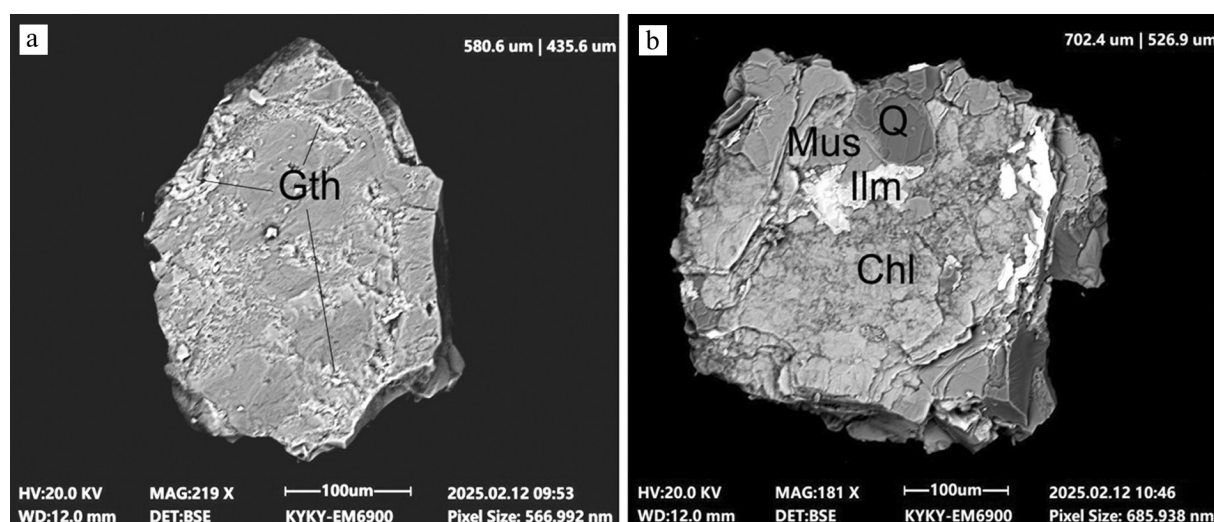
**Таблица 1.** Содержания углекислого газа и воды, выделяющихся при термической деструкции (1000 °C) образцов кварца Ларинского месторождения, мкг/г

**Table 1.** Contents of carbon dioxide and water released during thermal destruction (1000 °C) of quartz samples from the Larinskoye deposit, µg/g

| Номер образца<br>Sample No.  | CO <sub>2</sub> |       |         | H <sub>2</sub> O |       |         |
|--|-----------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
|  | ИСХ             | ЭМС   | ИСХ/ЭМС | ИСХ              | ЭМС   | ИСХ/ЭМС |
| Перекристаллизованный (гранулированный) кварц / Recrystallized (granulated) quartz   |                 |       |         |                  |       |         |
| Л-1  | 54.1            | 27.2  | 1.98    | 69.2             | 57.6  | 1.20    |
| Л-2  | 39.2            | 26.2  | 1.47    | 51.6             | 49.8  | 1.04    |
| Л-3  | 20.3            | 14.4  | 1.41    | 48.1             | 52.0  | 0.92    |
| Л-7-1  | 24.0            | 19.1  | 1.26    | 44.3             | 47.2  | 0.94    |
| Блокованный кварц / Blocked quartz   |                 |       |         |                  |       |         |
| Л-4  | 30.6            | 30.2  | 1.01    | 61.8             | 57.1  | 1.08    |
| Л-5  | 81.6            | 72.1  | 1.13    | 39.8             | 48.1  | 0.83    |
| Л-13   | 86.0            | 74.0  | 1.16    | 129.9            | 52.6  | 2.47    |
| Шестоватый крупно- и гигантозернистый кварц / Columnar large to giant-grained quartz |                 |       |         |                  |       |         |
| Л-6  | 40.9            | 18.9  | 2.16    | 250.4            | 217.1 | 1.15    |
| Л-8  | 177.9           | 88.1  | 2.02    | 221.5            | 115.5 | 1.92    |
| Л-9  | 24.8            | 33.0  | 0.75    | 197.8            | 253.9 | 0.78    |
| Л-10   | 221.5           | 223.2 | 0.99    | 476.2            | 459.1 | 1.04    |
| Л-10-1   | 141.1           | 103.3 | 1.36    | 329.3            | 163.9 | 2.01    |
| Л-11   | 139.2           | 123.1 | 1.13    | 213.8            | 263.9 | 0.81    |
| Л-13-3   | 152.0           | 32.6  | 4.66    | 422.9            | 129.4 | 3.26    |
| Л-14   | 100.1           | 84.5  | 1.18    | 84.7             | 104.2 | 0.81    |
| Л-15-4   | 276.0           | 117.8 | 2.34    | 467.3            | 155.4 | 3.01    |

Примечания: ЭМС и ИСХ — образцы, подготовленные с применением и без применения метода электромагнитной сепарации.

Notes: ЭМС и ИСХ — samples prepared by the electromagnetic separation method and without the use of electromagnetic separation.



**Рис. 2.** BSE-изображения (образец Л-6): а — зерно кварца с примесями окислов железа; б — сростки кварца с другими минералами. Q — кварц, Gth — гётит, Mus — слюда, Ilm — ильменит, Chl — хлорит. Зерна взяты из отобранной под бинокляром монофракции кварца

**Fig. 2.** BSE images (sample L-6): a — quartz grain with goethite impurities; b — quartz intergrowths with other minerals. Q — quartz, Gth — goethite, Mus — mica, Ilm — ilmenite, Chl — chlorite. The grains were taken from a quartz monofraction selected under a binocular microscope

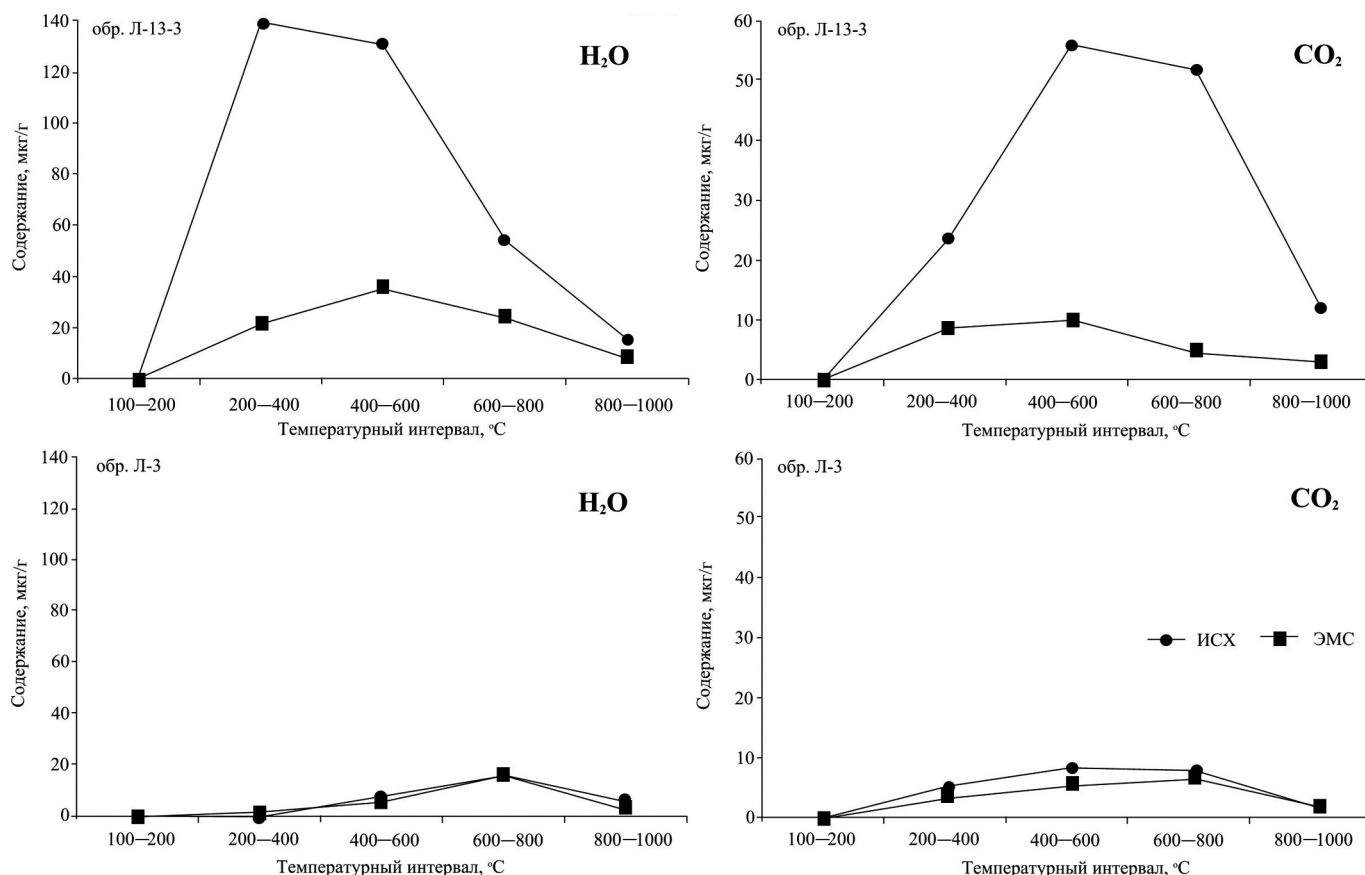


Рис. 3. Динамика выделения углекислого газа и воды в ходе ступенчатого пиролиза

Fig. 3. Dynamics of carbon dioxide and water release during stepwise pyrolysis

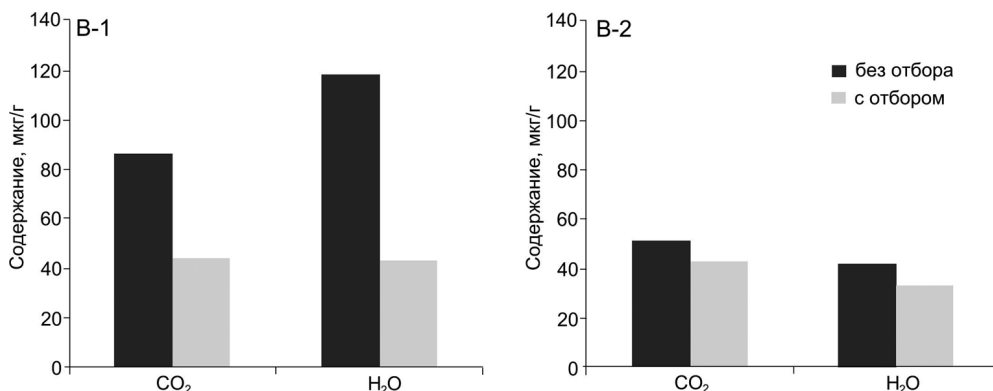
На рисунке 3 приведена динамика выделения воды и углекислого газа при ступенчатом нагреве образцов гранулированного кварца (обр. Л-3) и гигантозернистого кварца с (обр. Л-13-3), подготовленных для анализа обычным способом, и с включением этапа электромагнитной сепарации. В визуально чистом гранулированном кварце температурные интервалы максимального выделения H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub> практически не зависят от условий пробоподготовки, тогда как в гигантозернистом кварце с присутствием плёнок окисления на поверхности зёрен помимо изменения содержаний данных компонентов наблюдается также смещение максимумов выделения воды и углекислого газа в зависимости от условий пробоподготовки образца. То есть нагрев образцов кварца с присутствием сростков кварцевых зёрен с магнитными минералами и плёнок окисления на поверхности зёрен кварца, подготовленных к анализу по стандартной методике, может привести к выделению воды и углекислого газа, не связанных с флюидными включениями. В связи с этим получаемые результаты будут некорректно соотносить с составом флюидных включений. Для определения данных компонентов в подобных образцах можно предложить проводить дополнительную очистку кварцевых проб, например методом электромагнитной сепарации.

Ещё одной из причин искажения состава газов, выделяющихся при нагревании кварца, может оказаться исключение из пробоподготовки предварительного просмотра образца под бинокулярным микроскопом даже в случае исследований высокочистых прозрачных зёрен кварца. С этой целью были изучены два

образца гранулированного кварца Вязовского месторождения (В-1, В-2), крупка которых визуально была полностью прозрачной. В первой серии опытов первоначальная пробоподготовка образцов проводилась по следующей схеме: дробление, электромагнитная сепарация, обработка разбавленной азотной кислотой с дальнейшей отмывкой бидистиллированной водой и сушка. После этого образцы анализировались методом пиролитической газовой хроматографии. Во второй серии опытов к данной пробоподготовке добавлялся предварительный просмотр образцов под бинокулярным микроскопом с целью выявления и удаления посторонних примесей.

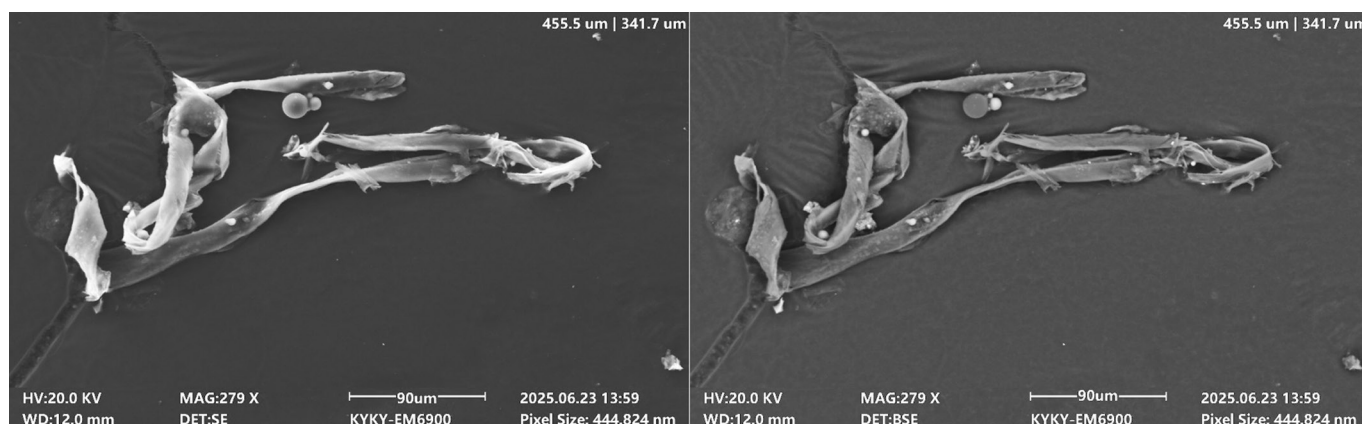
В образце В-2 при просмотре кварцевых зёрен под бинокулярным микроскопом такие примеси не были установлены, было удалено лишь несколько зёрен кварца, имевших молочно-белую окраску. Полученные значения содержаний H<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, выделившихся при нагревании до 1000 °C из кварцевой крупки, подготовленной с просмотром и без просмотра образца В-2 под бинокулярным микроскопом, оказались схожими (рис. 4).

В крупке образца В-1 кроме самих кварцевых зёрен присутствовало значительное количество примесей неидентифицированных прозрачных нитевидных образований (рис. 5). По данным микронзондового анализа, эти образования являются органическими и содержат около 87.8 % ат. углерода, 2.7 % ат. азота, 9.4 % ат. кислорода и 0.1 % ат. серы. Данные нитевидные образования оказались настолько стойкими, что не разрушились даже в ходе предваритель-



**Рис. 4.** Изменение содержаний углекислого газа и воды в образцах кварца Вязовского месторождения

**Fig. 4.** Changes in the content of carbon dioxide and water in quartz samples from the Vyazovskoye deposit



**Рис. 5.** Электронно-микроскопические изображения нитевидного образования в образце В-1 в SE- и BSE-детекторах

**Fig. 5.** Electron microscopic images of a filamentous formation in the B-1 sample in SE and BSE detectors

ной обработки кварцевых проб разбавленной азотной кислотой.

Содержания углекислого газа и воды в образце В-1, проанализированном без предварительного отбора под бинокулярным микроскопом, оказались существенно выше, чем в пробе, из которой примеси были удалены (рис. 4). Это связано с тем, что при пиролизе с повышением температуры данные нитевидные образования, как и любое другое органическое вещество (Бушнев и др., 2024), начинают разлагаться с выделением углекислого газа и воды.

### Заключение

Проведённые исследования показали, что применение термической деструкции как способа вскрытия флюидных включений при изучении состава летучих компонентов методом газовой хроматографии в кварце, требует тщательной подготовки проб к анализу.

Для получения корректных результатов, позволяющих соотносить выделяющиеся углекислый газ и воду из кварцевых проб с составом флюидных включений, необходим обязательный отбор кварцевой крупки под бинокулярным микроскопом, обработка зёрен кварца разбавленными кислотами (для удаления карбонатов и органического вещества) и дальнейшая отмывка образца бидистиллированной водой с последующей сушкой. В случае присутствия в кварце микропримесей магнитных минералов и плёнок окисления

на поверхности кварцевых зёрен рекомендуется включать в пробоподготовку дополнительный этап — электромагнитную сепарацию.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН № 122040600009-2 и государственного задания ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН № 125013101191-9.

### Литература / References

- Бушнев Д. А., Якимов М. В., Бурдельная Н. С. Изменения структуры керогена доманика в ходе гидротермального воздействия, по данным ИК-спектроскопии и пиролизической газовой хроматографии // Структура, вещество, история литосферы Тимано-Северорурского сегмента: Материалы 33-й научной конференции. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН. 2024. С. 3—6.
- Bushnev D. A., Yakimov M. V., Burdelnaya N. S. Changes in the structure of domanik kerogen during hydrothermal exposure according to IR spectroscopy and pyrolytic gas chromatography. Structure, substance, history of lithosphere of the Timan-Northern Ural segment: Proceedings of the 33<sup>rd</sup> scientific conference. Syktyvkar: IG Komi SC UB RAS, 2024, pp. 3—6. (in Russian)
- Гибшер Н. А., Томиленко А. А., Сазонов А. М., Рябуха М. А., Тимкина А. Л. Золоторудное месторождение Герфед: характеристика флюидов и РТ-условия образования кварцевых жил (Енисейский кряж, Россия) // Геология и геофизика. 2011. т. 52. № 11. С. 1851—1867.





- Gibsher N. A., Tomilenko A. A., Ryabukha M. A., Timkina A. L., Sazonov A. M. The Gerfed gold deposit: fluids and PT-conditions for quartz vein formation (Yenisei Ridge, Russia). *Russian Geology and Geophysics*, 2011, V. 52, No 11, pp. 1461–1473. DOI: 10.1016/j.rgg.2011.10.014
- Грибов С. К., Долотов А. В. Экспериментальное исследование кинетики изотермического дегидроксилирования природного гетита // Вестник ОНЗ РАН. 2012. Т. 4. NZ9001. DOI: 10.2205/2012NZ\_ASEMPG, 2012.
- Gribov S. K., Dolotov A. V. Experimental study of the kinetics of isothermal dehydroxylation of natural goethite. *Bulletin of the Earth Sciences Department of the Russian Academy of Sciences*, 2012, V. 4, NZ9001. (in Russian)
- Долгов Ю. А., Томиленко А. А., Гибшер Н. А. Флюидный режим формирования и термобарогеохимические критерии золотоносности кварцевых жил в метаморфических породах // Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Вып. I. Общие вопросы. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР. 1990. С. 7–19.
- Dolgov Yu. A., Tomilenko A. A., Gibsher N. A. Fluid regime of formation and thermobarogeochemical criteria of gold-bearing quartz veins in metamorphic rocks. *Thermobarogeochemistry of mineral-forming processes. 1st issue. General problems*. Novosibirsk: Publishing House of IGG SO AN SSSR, 1990, pp. 7–19. (in Russian)
- Иванова В. П. Хлориты // Труды Института геологических наук. Петрографическая серия. М.: Академия наук СССР, 1949. № 35. С. 56–85.
- Ivanova V. P. Chlorites. *Proceedings of the Institute of Geological Sciences. Petrographic series*. M.: Academy of Sciences of the USSR, 1949, No. 35, pp. 56–85. (in Russian)
- Корекина М. А., Шанина С. Н., Савичев А. Н., Панкрушина Е. А., Штенберг М. В., Морозов Р. С., Артемьев Д. А. Водосодержащие дефекты в разной степени деформированном жильном молочно-белом кварце Ларинского месторождения (Южный Урал) // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 8. С. 1047–1059, doi: 10.15372/GiG2023201
- Korekina M. A., Shanina S. N., Savicheva A. N., Pankrushina E. A., Shtenberg M. V., Morozov P. S., Artemiev D. A. Water-containing defects in variously deformed milky-white vein quartz of the Larino deposit (South Urals). *Russian Geology and Geophysics*, 2024, Vol. 65, No. 8, pp. 899–909. doi: 10.2113/RGG20234664
- Крейсберг В. А., Ракчев В. П., Серых Н. М., Борисов Л. А. Диагностика газовой-жидкой примесей в кварце масс-спектрометрическим методом // Разведка и охрана недр. 2007. № 10. С. 12–18.
- Kreysberg V. A., Rakcheev V. P., Serykh N. M., Borisov L. A. Diagnostics of gas-liquid impurities in quartz by mass spectrometric method. *Exploration and protection of mineral resources*, 2007, No. 10, pp. 12–18. (in Russian)
- Куприн В. П., Щербakov А. Б. Адсорбция органических соединений на твердой поверхности. Киев: Наукова думка, 1996. 160 с.
- Kuprin V. P., Shcherbakov A. B. Adsorption of organic compounds on a solid surface. *Kyiv: Naukova dumka*, 1996, 160 p. (in Russian)
- Миронова О. Ф. Летучие компоненты природных флюидов по данным изучения включений в минералах: методы и результаты // Геохимия. 2010. № 1. С. 89–97.
- Mironova O. F. Volatile components of natural fluids: evidence from inclusions in minerals: methods and results. *Geochemistry International*, 2010, Vol. 48, No. 1, pp. 83–90. DOI: 10.1134/S0016702910010052
- Миронова О. Ф., Салазкин А. Н. Источники ошибок при деструктивном газовом анализе флюидных включений и пути их преодоления // Геохимия. 1993. № 5. С. 697–708.
- Mironova O. F., Salazkin A. N. Sources of errors during destructive gas analysis of fluid inclusions and ways of their overcoming. *Geokhimiya*, 1993, No. 5, pp. 697–708. (in Russian)
- Осоргин Н. Ю. Источники ошибок определения состава летучих при термическом методе дегазации образцов // Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Вып. I. Общие вопросы. Новосибирск: Изд. ИГиГ СО АН СССР. 1990. С. 120–129.
- Osorgin N. Yu. Sources of errors in determining the composition of volatiles using the thermal method of degassing samples. *Thermobarogeochemistry of mineral formation processes. 1st issue. General problems*. Novosibirsk: Publishing House of IGG SB USSR AS, 1990, pp. 120–129. (in Russian)
- Петровский В. А., Силаев В. И., Сухарев А. Е., Шанина С. Н., Мартинс М., Карфункель И. Флюидные фазы в карбонадо и их генетическая информативность // Геохимия. 2008. № 7. С. 748–756.
- Petrovsky V. A., Silaev V. I., Sukharev A. E., Shanina S. N., Martins M., Karfunkel J. Fluid phases in carbonado and their genetic significance. *Geochemistry International*, 2008, No. 7, pp. 693–710. DOI: 10.1134/S0016702908070045
- Рыжов С. О., Бальчугов А. В. Разработка технологии процесса десорбции газа из жидкости на насадке в электромагнитном поле // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2010. № 3. С. 120–124.
- Ryzhov S. O., Balchugov A. V. Development of technology for the process of gas desorption from liquid on packing in an electromagnetic field. *Modern technologies, Systems analysis. Modeling*, 2010, No. 3, pp. 120–124. (in Russian)
- Томиленко А. А., Гибшер Н. А. Особенности состава флюида в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия. 2001. № 2. С. 167–177.
- Tomilenko A. A., Gibsher N. A. Peculiarities of fluid composition in the mineralized and barren zones of the Sovetskoe quartz-gold deposit, Yenisei mountain range based on fluid inclusion study. *Geochemistry International*, 2001, No. 2, pp. 142–152.
- Ходаков Г. С. Активированная адсорбция инертных газов в обычных условиях на свежееобразованных при измельчении поверхностях твердых тел // Докл. АН СССР. 1966. Т. 168. № 1. С. 158–160.
- Khodakov G. S. Activated adsorption of inert gases under normal conditions on freshly formed surfaces of solids during grinding. *Reports of the USSR Academy of Sciences*, 1966, Vol. 168, No. 1, pp. 158–160. (in Russian)
- Barker C. G., Torkelson B. E. Gas adsorption on crushed quartz and basalt // *Geochim. et cosmochim. Acta*. 1975. V. 39. No. 2. P. 212–218.



## Динамика изменения состава карьерных вод на примере месторождения гипса в Архангельской области

В. А. Наход

Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики  
им. Н. П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, Россия  
Nakhod.Vitaliy@knauf.ru

В статье представлены результаты двухлетнего исследования состава карьерных вод на месторождении гипса, расположенного в Холмогорском районе Архангельской области. Систематический мониторинг включал определение физико-химических показателей в ключевых технологических зонах: водосборнике карьера (зумпфе) и пруде-отстойнике очистных сооружений. Для получения аналитической базы применялись стандартные методы: ГОСТ 31957-2012, ПНДФ 14.1:2:4.157-99 и прочие. Установлено, что показатель сухого остатка вод варьирует в диапазоне 1190–6700 мг/дм<sup>3</sup> с выраженной сезонной динамикой: максимум в весенний период (март) и минимум летом (июнь). Доминирующим компонентом является сульфат-ион (до 3700 мг/дм<sup>3</sup>), что характерно для месторождений гипса. Выявлены превышения ПДК для речных вод, используемых в рыбохозяйственных и (или) питьевых целях, по содержанию сульфатов и стронция, а также эпизодически – по магнию, железу, цинку, меди, кадмию и алюминию. Показана эффективность очистных сооружений, обеспечивающих снижение концентраций взвешенных веществ до 29 %. Результаты согласуются с данными других исследователей, но демонстрируют специфику рассматриваемой территории – повышенное содержание сульфатов и стронция и замедленную седиментацию взвешенных веществ. Полученные данные представляют интерес для горнодобывающих предприятий, природоохранных организаций и научных учреждений, занимающихся проблемами экологии горного производства.

**Ключевые слова:** гипсовый карьер, карьерные воды, сульфаты, стронций, экологический мониторинг, очистные сооружения

## Dynamics of changes in the composition of quarry waters as exemplified by the gypsum deposit at the Arkhangelsk region

V. A. Nakhod

N. P. Laverov Federal Research Center for complex study of the Arctic UB RAS, Arkhangelsk, Russia

The article presents the results of a two-year study of the composition of quarry waters at a gypsum deposit located in the Kholmogory District of the Arkhangelsk Region. Systematic monitoring included determining the physicochemical parameters in key process zones: the quarry water collector (sump) and the settling pond of the treatment facilities. To obtain the analytical base, standard methods were used: GOST 31957-2012, PNDP 14.1:2:4.157-99, and others. It was found that the dry residue indicator of water varies in the range of 1190–6700 mg/dm<sup>3</sup> with pronounced seasonal dynamics: maximum in spring (March) and minimum in summer (June). The dominant component is sulfate ion (up to 3700 mg/dm<sup>3</sup>), which is typical for gypsum deposits. Exceedances of the maximum permissible concentrations for river waters used for fishery and/or drinking purposes were revealed for the content of sulfates and strontium, and occasionally for magnesium, iron, zinc, copper, cadmium and aluminum. Efficiency of treatment facilities was demonstrated, ensuring a reduction in pollutant concentrations to 29 %. The results are consistent with the data of other researchers, but demonstrate the specificity of the territory under consideration – increased content of sulfates and strontium and slow sedimentation of suspended matter. The obtained data are of interest to mining enterprises, environmental organizations and scientific institutions dealing with the problems of ecology of mining production.

**Keywords:** gypsum quarry, quarry water, sulphates, strontium, environmental monitoring, treatment facilities

### Введение

Карьерные воды, формирующиеся при разработке месторождений полезных ископаемых, являются одним из основных объектов, оказывающих возможное негативное влияние на компоненты окружающей среды. По этой причине предприятие по добыче гипсового камня в Архангельской области ведет постоянный мониторинг состава карьерных вод. Согласно утвержденному проекту на разработку месторождения гипса, недропользователь обязан контролировать только количество нефтепродуктов и взвешенных веществ. В случае же гипсовых месторождений на северных территориях особую значимость приобретает контроль содержания сульфатов, стронция, а также тяжелых ме-

таллов и взвешенных веществ, поскольку их повышенные концентрации могут оказывать негативное влияние на жизнедеятельность гидробионтов и качество поверхностных вод, используемых населением для хозяйственно-питьевых нужд (Сидкина, 2023). Целью данного исследования являлся анализ изменения состава карьерных вод на гипсовом месторождении за период с декабря 2022 по декабрь 2024 года. Основными задачами были следующие: сравнение качества карьерных вод до и после очистных сооружений, оценка сезонных колебаний основных компонентов состава воды, выявление влияния технологических процессов добычи гипса на состав воды, определение эффективности работы очистных сооружений. Актуальность

**Для цитирования:** Наход В. А. Динамика изменения состава карьерных вод на примере месторождения гипса в Архангельской области // Вестник геонаук. 2025. 7(367). С. 35–48. DOI: 10.19110/geov.2025.7.4

**For citation:** Nakhod V. A. Dynamics of changes in the composition of quarry waters as exemplified by the gypsum deposit at the Arkhangelsk region. Vestnik of Geosciences, 2025, 7(367), pp. 35–48, DOI: 10.19110/geov.2025.7.4





исследования согласуется с результатами исследований последних лет (Caselle, 2022; Caselle, 2020; Al-Harathi, 2001), где отмечается необходимость разработки региональных нормативов для водных объектов. В частности, в методических работах ИМПГЭ 70-х годов XX века и в современных работах (Торосян, 2012) обоснована важность учета геохимических особенностей водных объектов промышленных районов.

### Объект и методы исследования

Месторождение гипса расположено в Холмогорском районе Архангельской области и представляет собой типичное пластовое месторождение осадочных горных пород с горизонтальной залежью мощностью до 20 метров. Разработка карьера начата в 2008 году. Карьер включает один добычной и один вскрышной уступы, средней мощностью 7 метров. Химический (микроэлементный) состав полезного ископаемого представлен в таблице 1.

Гидрогеологические условия месторождения характеризуются приуроченностью к северо-западной части Северо-Двинского артезианского бассейна. Основными реками, расположенными рядом с участком исследования, являются Чуга и Позера — притоки нерестовой реки Пинега. Основными водоносными горизонтами и комплексами в районе работ являются: слабоводоносный верхнечетвертичный-современный комплекс; слабоводоносный уфимско-нижекамский водоносный терригенный комплекс; водоносная ассельско-сакмарская сульфатно-карбонатная серия; водоносная средне-верхнекаменноугольная карбонатная серия. Непосредственно в карьере существенную роль играют грунтовые воды четвертичных песчано-глинистых отложений и карстовые воды, приуроченные к карстовым пустотам и трещинам в толще гипсовых пород. Единый устойчивый водоносный горизонт, связанный с базисом разгрузки, лежит ниже подошвы гипсовой толщи (ниже абс. отм. +40 м). Встречающиеся на различных гипсометрических уровнях подземные воды связаны с локальными водоносными горизонтами, приуроченными к локальным системам трещин и карстовых полостей. Река Позера не является базисом разгрузки подземных вод. Базис разгрузки подземных вод связан с подземной рекой, проявлением которой на поверхности является расположенная в пределах участка работ карстовая долина. Монолитные гипсы имеют крайне низкую водопроницаемость (коэффициент фильтрации составляет тысячные доли метра в сутки). Геолого-гидрологический разрез представлен на рисунке 1.

Отбор проб осуществлялся во второй секции пруда-отстойника и в водосборнике карьера (зумпфе), расположенном на абсолютной отметке +52 метра. Глубина отстойника составляет около 4 метров, зумпфа — 2.5 метра. В зумпфе карьерные воды отстаивались и далее по системе карьерного водоотлива транспортировались в пруд-отстойник, состоящий из двух секций с площадью 600 и 1800 м<sup>2</sup> (рис. 2). Очистные сооружения предназначены для очистки карьерных вод, загрязненных только нефтепродуктами и взвешенными веществами, методом отстаивания и фильтрации. Отстойник работает по принципу разделения веществ за счет разности удельного веса воды и нефтепродук-

**Таблица 1.** Химический состав гипсового камня карьера «Глубокое» Архангельской области (%)

**Table 1.** Chemical composition of gypsum stone quarry «Glubokoye», Arkhangelsk region

| Параметр / Parameter  | Значение / Value |
|---|------------------|
| CaSO <sub>4</sub> *2H <sub>2</sub> O  | 88.7             |
| SrSO <sub>4</sub>   | 0.21             |
| CaCO <sub>3</sub>   | 3.51             |
| MgCO <sub>3</sub>   | 1.84             |
| Органические вещества<br>Organic substances   | 2.8              |
| Na <sub>2</sub> O   | 0.0482           |
| K <sub>2</sub> O  | 0.083            |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0.1255           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0.28             |
| Бентонитовые глины / Bentonite<br>clays (Si <sub>8</sub> Al <sub>14</sub> O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub> *nH <sub>2</sub> O) | 0.1              |
| Кварцевый песок (SiO <sub>2</sub> )<br>Quartz sand (SiO <sub>2</sub> )  | 2.3              |

тов и малых скоростей движения. При этом частицы веществ тяжелее воды выпадают в осадок, а нефтепродукты всплывают на поверхность воды. Количество точек и параметры отбора проб (одна точка приповерхностных вод) приняты согласно проекту разработки месторождения гипса. Продолжительность эксперимента — с декабря 2022 по декабрь 2024 года, ранее работы за контролем качества карьерных вод осуществлялись только по двум показателям (нефтепродукты и взвешенные) в рамках программы горно-экологического мониторинга промышленного предприятия. Данные по составу карьерных вод в начальный период разработки отсутствуют. Анализ проб карьерных вод проводился в аккредитованной лаборатории ФГБУ «ЦЛАТИ по СЗФО» «ЦЛАТИ по Архангельской области» с использованием следующих методов (табл. 2).

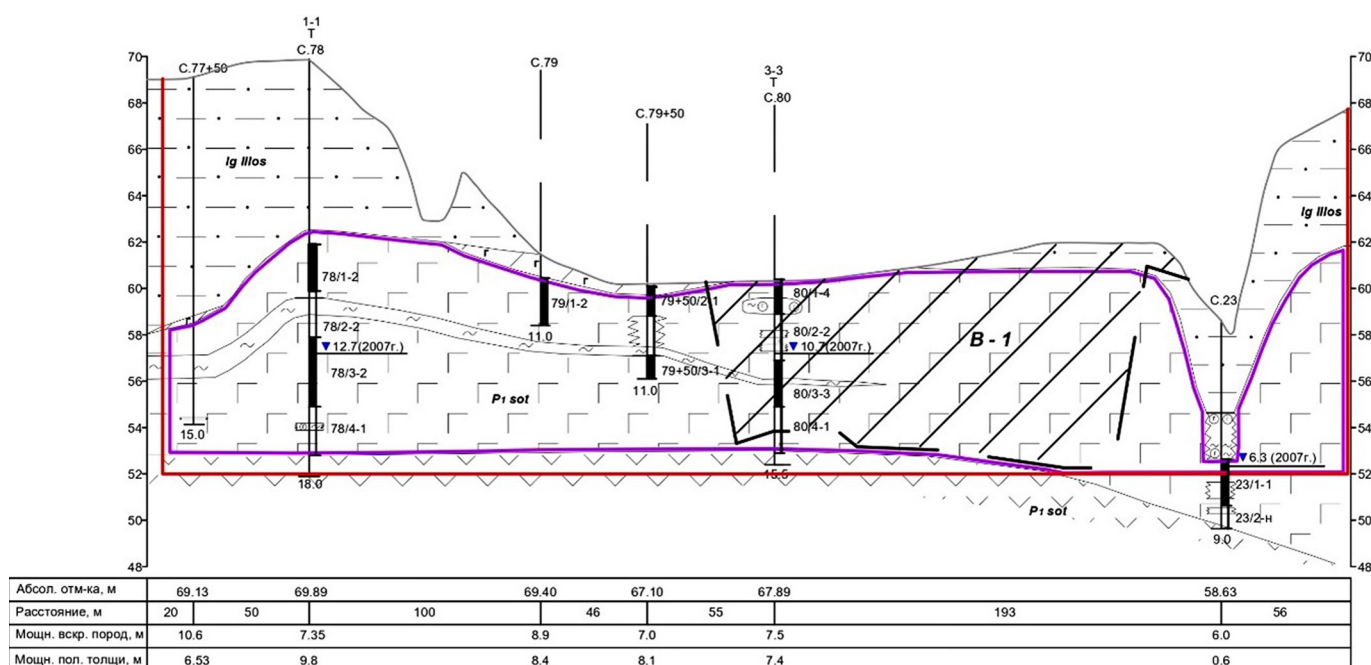
Отбор проб проводился с соблюдением следующих требований. Перед подготовкой к отбору проб открытый пробоотборник из нержавеющей стали ополаскивался анализируемой водой не менее трех раз, для хранения воды использовалась химически инертная посуда из полипропилена. Пробы на определение катионов подкислялись HNO<sub>3</sub> до показателя pH менее двух. Для отбора использовалась поверхностная вода с глубиной забора 0.3—0.5 метров. Для транспортировки использовался переносной холодильный агрегат, позволяющий поддерживать температуру в режиме +4 °C.

Оценка качества карьерных вод выполнялась с использованием Приказа Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 13.06.2024) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (табл. 3). Согласно имеющимся исследованиям А. И. Малова (Malov, 2025) водотоки района по условиям формирования состава воды подразделяются на гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевые типа (Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>) с минимальной минерализацией (М ~0.1 г/л) — моренные озера (Сенное и Карасиное) и водотоки, имеющие сульфатно-кальциевый состав



**Таблица 2.** Методы измерения макро- и микроэлементов  
**Table 2.** Methods for measuring macro- and micronutrients

| НД на метод измерений      | Определяемый показатель / Determined indicator  |
|----------------------------|---|
| ПНД Ф 14.1:2:3:4.114-2023  | сухой остаток / dry residue   |
| ПНД Ф 14.1:2:4.157-99      | сульфат-ион, хлорид-ион / sulfate ion, chloride ion   |
| ПНД Ф 14.1:2:4.167-2000    | кальций, магний, натрий, стронций, калий<br>calcium, magnesium, sodium, strontium, potassium  |
| ГОСТ 31957-2012, метод А.1 | гидрокарбонат-ион / hydrocarbonate ion  |
| ПНД Ф 14.1:2:4.254-2009    | взвешенные вещества / suspended solids  |
| ПНД Ф 14.1:2:4.181-02      | алюминий / aluminum   |
| ПНД Ф 14.1:2:4.214-06      | железо общее, медь, марганец, цинк, кобальт, кадмий, никель, свинец, хром<br>total iron, copper, manganese, zinc, cobalt, cadmium, nickel, lead, chromium |
| ПНД Ф 14.1.272-2012        | нефтепродукты / oil products  |
| ПНД Ф 14.1:2.49-96         | мышьяк / arsenic  |



Условные обозначения:

четвертичные отложения  
(Ig Illos)



суглинки



супесь



суглинок валунный

С.43 скважина и ее номер



8.1(2007г.)  
уровень грунтовых вод  
его глубина, год замера

12.0

пермские отложения  
соткинская свита (P1sot)



кора выветривания



гипс



ангидрит



доломит



песок



глина

карст



незаполненный



с глиной и обломками  
гипса



с обломками гипса



с обломками гипса и песка



С.А2 номер выработки  
А2/1-н номер пробы -  
некондиционная проба



А2/2-2 номер пробы -  
сорт гипса



18.0 глубина выработки, м



контур подсчета запасов  
сырья по категории В



контур подсчета запасов  
сырья по категории С1



контур подсчета запасов  
сырья по категории С2



контур карьера



4-4 точка пересечения разрезов

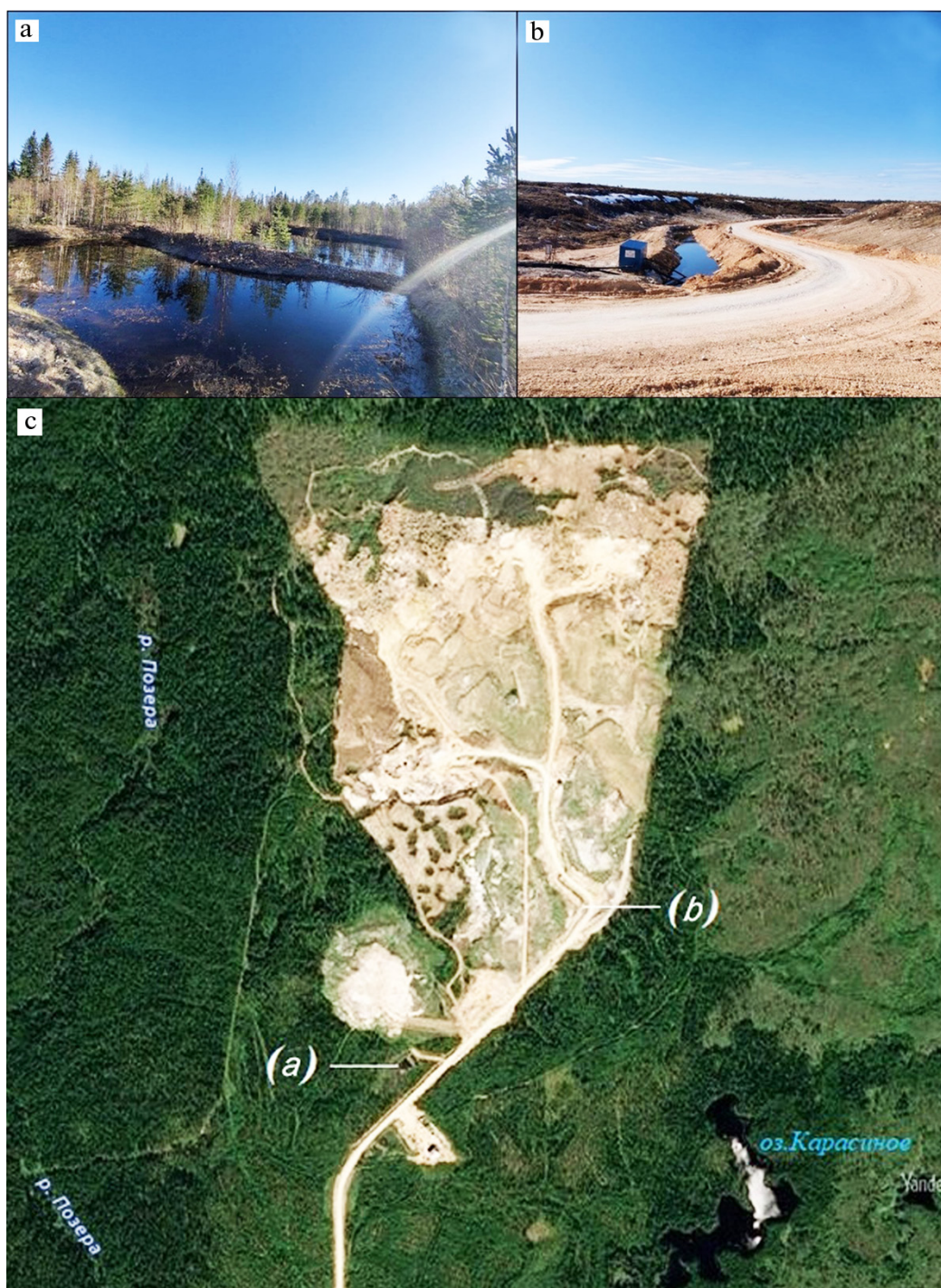
**Рис. 1.** Геолого-гидрологический разрез карьера  
**Fig. 1.** Geological and hydrological section of the quarry



**Таблица 3.** Предельно допустимые концентрации химических компонентов в поверхностных водах, используемых в рыбохозяйственных целях

**Table 3.** Maximum permissible concentrations of chemical components in surface waters used for fishery purposes

| Элементы/Elements               | Mg                                      | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Mn  | Co | Ni | Cu | Zn | Cd | Sr  | Pb | Al | Fe  |
|---------------------------------|---|-------------------------------|---|----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|
|                                 | мг/дм <sup>3</sup> / mg/dm <sup>3</sup> |                               | мкг/дм <sup>3</sup> / mcg/dm <sup>3</sup> |    |    |    |    |    |     |    |    |     |
| Концентрации<br>Concentrations  | 40                                      | 100                           | 10  | 10 | 10 | 1  | 10 | 5  | 400 | 6  | 40 | 100 |
| Класс опасности<br>Hazard class | 4                                       | —                             | 4   | 3  | 3  | 3  | 3  | 2  | 3   | 2  | 4  | 4   |



**Рис. 2.** Точки отбора проб карьерных вод: а — пруд-отстойник очистных сооружений, б — водосборник карьера (зумпф), с — общий вид карьера гипса «Глубокое»

**Fig. 2.** Sampling points of quarry water: а — settling pond of treatment facilities, б — quarry catchment (sump), с — general view of the «Glubokoe» gypsum quarry



(Ca-SO<sub>4</sub>) и промежуточную минерализацию (М 0.8—2.3 г/л) — карстовые озера и реки Позера и Чуга.

Динамика изменения состава карьерных вод за период 2023—2024 годы требовала анализа климатических характеристик (табл. 4).

Большое влияние на состав карьерных вод имеет также площадь атмосферического ореола загрязнения вокруг карьера. Согласно тому № 4 «Охрана окружающей среды» Проекта строительства карьера гипса на месторождении «Глубокое» в Холмогорском

**Таблица 4.** Климатические характеристики 2023, 2024 годов на основании данных по метеостанции № 22550 (г. Архангельск)

**Table 4.** Climate characteristics for 2023, 2024, based on data from weather station No. 22550 (Arkhangelsk)

| Характеристики<br>Characteristics                       | 2023 год / year   |                     |               |                 |            |              |              |                  |                       |                    |                    |                     |
|---|-------------------|---------------------|---------------|-----------------|------------|--------------|--------------|------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
|   | январь<br>January | февраль<br>February | март<br>March | апрель<br>April | май<br>May | июнь<br>June | июль<br>July | август<br>August | сентябрь<br>September | октябрь<br>October | ноябрь<br>November | декабрь<br>December |
| температура<br>(день), °C<br>temperature<br>(day), °C   | –7                | –6                  | –3            | 5               | 15         | 16           | 20           | 20               | 16                    | 3                  | –5                 | –11                 |
| температура<br>(ночь), °C<br>temperature<br>(night), °C | –8                | –9                  | –9            | –4              | 5          | 7            | 13           | 13               | 10                    | 1                  | –6                 | –11                 |
| давление,<br>мм рт.ст.<br>pressure,<br>mm Hg            | 758               | 757                 | 751           | 767             | 763        | 760          | 753          | 761              | 760                   | 751                | 756                | 757                 |
| ветер, м/с<br>wind, m/s                                 | 3.1               | 2.6                 | 2.3           | 1.9             | 2.2        | 2            | 1.8          | 1.7              | 2.1                   | 2.2                | 2.1                | 2.1                 |
| влажность, %<br>humidity, %                             | 82                | 83                  | 77            | 72              | 65         | 68           | 76           | 79               | 82                    | 83                 | 88                 | 85                  |
| осадки,<br>дни/мм<br>precipitation,<br>days/mm          | 14/4              | 7/21                | 8/39          | 3/13            | 6/19       | 8/60         | 17/99        | 10/33            | 12/82                 | 18/73              | 13/55              | 14/50               |
|   | 2024 год / year   |                     |               |                 |            |              |              |                  |                       |                    |                    |                     |
|   | январь<br>January | февраль<br>February | март<br>March | апрель<br>April | май<br>May | июнь<br>June | июль<br>July | август<br>August | сентябрь<br>September | октябрь<br>October | ноябрь<br>November | декабрь<br>December |
| температура<br>(день), °C<br>temperature<br>(day), °C   | –11               | –8                  | 0             | 1               | 9          | 20           | 22           | 20               | 18                    | 6                  | 0                  | –6                  |
| температура<br>(ночь), °C<br>temperature<br>(night), °C | –12               | –10                 | –4            | –3              | 2          | 11           | 13           | 12               | 12                    | 3                  | 0                  | –6                  |
| давление,<br>мм рт.ст.<br>pressure,<br>mm Hg            | 755               | 757                 | 759           | 758             | 762        | 756          | 758          | 758              | 763                   | 759                | 752                | 754                 |
| ветер, м/с<br>wind, m/s                                 | 2.4               | 2.5                 | 2.7           | 2.9             | 3.1        | 2.3          | 2            | 2.2              | 2.7                   | 2.8                | 3.2                | 2.6                 |
| влажность, %<br>humidity, %                             | 83                | 82                  | 81            | 77              | 62         | 74           | 73           | 75               | 77                    | 93                 | 95                 | 93                  |
| осадки,<br>дни/мм<br>precipitation,<br>days/mm          | 8/28              | 6/24                | 10/28         | 19/109          | 9/36       | 10/84        | 12/107       | 7/23             | 7/27                  | 15/77              | 18/86              | 17/62               |

Роза ветров на основании многолетних наблюдений  
Wind rose based on long-term observations

| Направление<br>ветра<br>Wind direction          | С<br>N | С-В<br>NE | В<br>E | Ю-В<br>SE | Ю<br>S | Ю-З<br>SW | З<br>W | С-З<br>NW |
|---|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|--------|-----------|
| Доля<br>от годового, %<br>Value<br>of annual, % | 11.90  | 5.90      | 6.80   | 15.10     | 18.80  | 12.50     | 14.20  | 14.80     |





Таблица 5. Максимальные приземные концентрации на границе нормативных СЗЗ предприятия

Table 5. Maximum ground-level concentrations at the boundary of the enterprise's regulatory sanitary protection zones

| Вещество / Substance   | Фон, доли ПДК Background, shares of MAC | Концентрация, доли ПДК <sup>1</sup> Concentration, shares of MAC <sup>1</sup> |
|--|---|---|
| Азота диоксид / Nitrogen dioxide   | 0.25                                    | 0.76  |
| Азота оксид / Nitrogen oxide   | н.о.                                    | 0.06  |
| Серы диоксид / Sulfur dioxide  | 0.03                                    | 0.04  |
| Углерода оксид / Carbon oxide  | 0.3                                     | 0.04  |
| Формальдегид / Formaldehyde  | н.о.                                    | 0.06  |
| Керосин / Kerosene   | н.о.                                    | 0.09  |
| Пыль с содержанием Si <sub>2</sub> O 20–70%<br>Dust with Si <sub>2</sub> O content 20–70%      | н.о.                                    | 0.11  |
| Пыль с содержанием Si <sub>2</sub> O до 20 %<br>Dust with Si <sub>2</sub> O content up to 20 % | н.о.                                    | 0.14  |

Примечания: <sup>1</sup> — в таблице не приведены данные по веществам, концентрации которых на границе СЗЗ составляют менее 0.04 ПДК; н.о. — не определено.

Notes: <sup>1</sup> — the table does not provide data on substances, which concentrations at the boundary of the sanitary protection zone are less than 0.04 MAC; н.о. — not determined.

районе Архангельской области, максимальные концентрации загрязняющих веществ на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия, расположенной в 500 м от границы горного отвода, приведены в таблице 5.

Согласно представленным данным, выбросы предприятия не оказывают влияние на состояние атмосферы территорий за границами СЗЗ. Максимальные концентрации загрязняющих веществ на границе нормативных СЗЗ предприятия определяются выбросами диоксида азота, которые составляют 0.76 ПДК и выбросами пыли неорганической 0.25 ПДК.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерения концентраций анализируемых макро- и микроэлементов в течение 2023–2024 годов показывают значительное превышение концентраций большинства элементов в 2023 году. Это обусловлено более высокими показателями производительности горных работ в 2023 году. Общий объем добытого гипсового камня в 2023 году на 7 % больше, чем в 2024; объем взорванной горной массы на 8 % выше в 2023 году. Данный факт подтверждает частичное техногенное воздействие на загрязнение карьерных вод. Естественной же причиной более высоких концентраций элементов в 2023 году является минимальный объем поступления вод в карьер, объем откачки в 2023 году на 19 % ниже, чем в 2024 году (121188 м<sup>3</sup> — 2023, 144442 м<sup>3</sup> — 2024). Исключением выступают взвешенные вещества, которые показывают противоположную динамику, обусловленную следующими причинами: меньший объем откачки вод означает снижение гидродинамической активности в карьере, что уменьшает эрозию пород и взмучивание донных отложений, тем самым снижает концентрацию ВВ; вторая причина — интенсивные осадки. Летние осадки в 2024 году были значительно выше (июнь: 84 мм, июль: 107 мм), чем в 2023 (июнь: 60 мм, июль: 99 мм).

Увеличение осадков усилило поверхностный сток, что привело к большей эрозии почв и выносу взвешенных частиц в карьерные воды.

### Основные компоненты состава карьерных вод

#### Взвешенные вещества

При анализе загрязнения сточных вод карьера взвешенными веществами отмечены зимние максимальные значения в декабре 2024 года как в зумпфе карьера (33.0 мг/дм<sup>3</sup>), так и в очистных сооружениях (24.9 мг/дм<sup>3</sup>). Минимальные же значения выявлены в летний период и колеблются в пределах 10 мг/дм<sup>3</sup> в водосборнике карьера и 5.8–6 мг/дм<sup>3</sup> в очистных сооружениях (рис. 3). Для сточных вод допустимая концентрация взвешенных веществ в соответствии с Приказом Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 13.06.2024) составляет 10 мг/дм<sup>3</sup>, при этом средняя концентрация взвешенных веществ на участке реки Северная Двина у с. Усть-Пинега составляет 5.3 мг/дм<sup>3</sup> с максимумом в 23 мг/дм<sup>3</sup> (Отчет о гидрохимических и экологических исследованиях, включая исследования на содержание микропластика, в устьевых участках рек Северная Двина и Онега и прибрежной территории Двинского залива Белого моря, проведенных в рамках проекта «Климатическая экспедиция», 2021\*). Эффективность очистки в среднем варьируется около 29 %, что является низким показателем. Согласно проекту на разработку карьера, эффективность очистки от взвешенных веществ должна составлять около 90–95 %. Низкий показатель, полученный в рамках исследовательской работы, обусловлен изначально невысокими показателями взвешенных веществ в зумпфе (среднее — 16.3 мг/дм<sup>3</sup>, проектные значения — 100 мг/дм<sup>3</sup>).

\* <https://www.ecosociety.ru/wp-content/uploads/2021/12/Otchet-po-issledovaniyam-rek.pdf>



### Сухой остаток (минерализация)

Проведенные исследования выявили значительные колебания минерализации карьерных вод в течение двухлетнего периода наблюдений (табл. 6). Максимальные значения были зафиксированы в конце марта 2023 года в пруду-отстойнике ( $4600 \text{ мг/дм}^3$ ) и в водосборнике карьера ( $6700 \text{ мг/дм}^3$ ). Такие высокие показатели связаны в основном с минимальным поверхностным стоком (мерзлые грунты, снежный покров) и преимущественным поступлением подземных вод.

### Сульфат-ион ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

Концентрация сульфатов как основного компонента растворяющихся пород также была максимальной в карьерных водах в «особый» период конца марта 2023 года (рис. 3). Она достигала  $3700 \text{ мг/дм}^3$ , что значительно превышает предел растворимости сульфатов в пресной воде. Поэтому в отстойнике произо-

шло быстрое их осаждение с образованием труднорастворимых соединений кальция. В растворенном же состоянии осталось  $1430 \text{ мг/дм}^3$ , что соответствует их равновесному содержанию. Эта концентрация является также средней концентрацией сульфатов в карьерных водах за весь период наблюдений. При этом нижний диапазон колебаний достигал  $75 \text{ мг/дм}^3$  также в «особый» период апреля 2024 года, когда за месяц выпало  $103 \text{ мм}$  атмосферных осадков и произошло интенсивное разбавление карьерных вод. По содержанию сульфатов карьерные воды превышают ПДК ( $100 \text{ мг/дм}^3$ ), однако это связано с природными условиями района месторождения, к которым адаптирована биота, а население минерализованную до  $1.5\text{—}3 \text{ г/дм}^3$  речную воду не использует для питья. Согласно ранее проведенным исследованиям по влиянию разработки месторождения гипса на состав природных вод, фоновая концентрация сульфат-иона в ближайших реках и озерах колеблется в пределах от 30 до  $1430 \text{ мг/дм}^3$  (Наход, 2024).

**Таблица 6.** Результаты измерения макро- и микроэлементов карьерных вод в 2023—2024 гг. ( $\text{мг/дм}^3$ )

**Table 6.** Results for measuring macro- and micronutrients of quarry waters in 2023—2024 ( $\text{mg/dm}^3$ )

| Показатель<br>Index                        | Точка отбора<br>Sampling point | 05.12.<br>2022 | 27.03.<br>2023 | 14.07.<br>2023 | 10.08.<br>2023 | 01.09.<br>2023 | 03.04.<br>2024 | 24.06.<br>2024 | 23.10.<br>2024 | 12.12.<br>2024 |
|--|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| взвешенные<br>вещества<br>suspended solids | №1                             | 7.8            | 7.2            | 6.0            | -              | 17.6           | 9.8            | 5.8            | 7.6            | 24.9           |
|  | №2                             | 10.2           | 9.8            | 10.0           | -              | 16.4           | 10.4           | 10.0           | 32.0           | 33.0           |
| сухой остаток<br>dry residue               | №1                             | 2820           | 4600           | 3260           | -              | 3140           | 3200           | 1190           | 1980           | 2170           |
|  | №2                             | 3280           | 6700           | 2980           | -              | 3100           | 3200           | 1490           | 2570           | 2120           |
| сульфат-ион<br>sulfate ion                 | №1                             | 1500           | 1430           | 1420           | 1540           | 1510           | 75             | 640            | 1160           | 1180           |
|  | №2                             | 1520           | 3700           | 1400           | 1430           | 1540           | 85             | 730            | 1460           | 1120           |
| кальций<br>calcium                         | №1                             | 770            | 790            | 630            | 730            | 680            | 670            | < 50           | 530            | 700            |
|  | №2                             | 680            | 630            | 520            | 670            | 710            | 890            | < 50           | 650            | 670            |
| магний<br>magnesium                        | №1                             | 53.0           | 46.0           | 37.0           | 39.4           | 38.0           | 48.0           | 27.3           | 31.0           | 48.0           |
|  | №2                             | 51.0           | 45.0           | 29.8           | 25.2           | 36.0           | 48.0           | 9.9            | 32.0           | 29.6           |
| стронций<br>strontium                      | №1                             | 8.0            | 7.6            | 2.7            | 6.4            | н.о.           | 0.9            | 1.1            | 3.3            | 4.7            |
|  | №2                             | 7.4            | 7.1            | 3.2            | 5.0            | н.о.           | 1.6            | 1.6            | 6.0            | 5.2            |
| алюминий<br>aluminum                       | №1                             | 0.670          | 0.052          | н.о.           | н.о.           | 0.106          | 0.011          | н.о.           | 0.051          | 0.028          |
|  | №2                             | 0.680          | 0.056          | 0.095          | н.о.           | 0.012          | н.о.           | н.о.           | 0.077          | н.о.           |
| железо общее<br>total iron                 | №1                             | 0.127          | 0.016          | 0.410          | 0.026          | 0.090          | 0.072          | 0.043          | 0.014          | 0.021          |
|  | №2                             | 0.094          | 0.030          | 0.065          | 0.063          | 0.044          | 0.039          | 0.330          | 0.017          | 0.022          |
| медь<br>copper                             | №1                             | 0.071          | 0.007          | 0.013          | 0.003          | 0.007          | 0.006          | 0.002          | 0.001          | 0.002          |
|  | №2                             | 0.031          | 0.009          | 0.006          | 0.001          | 0.006          | 0.006          | 0.008          | 0.003          | 0.003          |
| цинк<br>zinc                               | №1                             | 0.049          | 0.027          | 0.060          | 0.003          | 0.002          | 0.002          | 0.003          | 0.001          | 0.001          |
|  | №2                             | 0.021          | 0.013          | 0.023          | 0.002          | 0.019          | 0.018          | 0.003          | н.о.           | 0.001          |
| свинец<br>lead                             | №1                             | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | 0.008          | н.о.           | н.о.           |
|  | №2                             | н.о.           | 0.003          | 0.013          | н.о.           | н.о.           | н.о.           | 0.010          | н.о.           | н.о.           |
| кобальт<br>cobalt                          | №1                             | 0.006          | 0.005          | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           |
|  | №2                             | 0.000          | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           |
| кадмий<br>cadmium                          | №1                             | н.о.           | 0.002          | 0.001          | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           |
|  | №2                             | н.о.           | 0.002          | 0.001          | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           |
| никель<br>nickel                           | №1                             | н.о.           | н.о.           | н.о.           | 0.032          | н.о.           | н.о.           | 0.008          | н.о.           | н.о.           |
|  | №2                             | н.о.           | н.о.           | н.о.           | 0.017          | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           | н.о.           |
| гидрокарбонат-ион<br>hydrocarbonate ion    | №1                             | 250            | 260            | 260            | -              | 214            | 270            | 110            | 214            | 224            |
|  | №2                             | 260            | 260            | 187            | -              | 217            | 270            | 61             | 260            | 218            |

Примечания: № 1 — пруд-отстойник, № 2 — водосборник карьера; н.о. — ниже предела обнаружения.

Notes: No. 1 — settling pond, No. 2 — quarry water collection pond; н.о. — below detection limit.



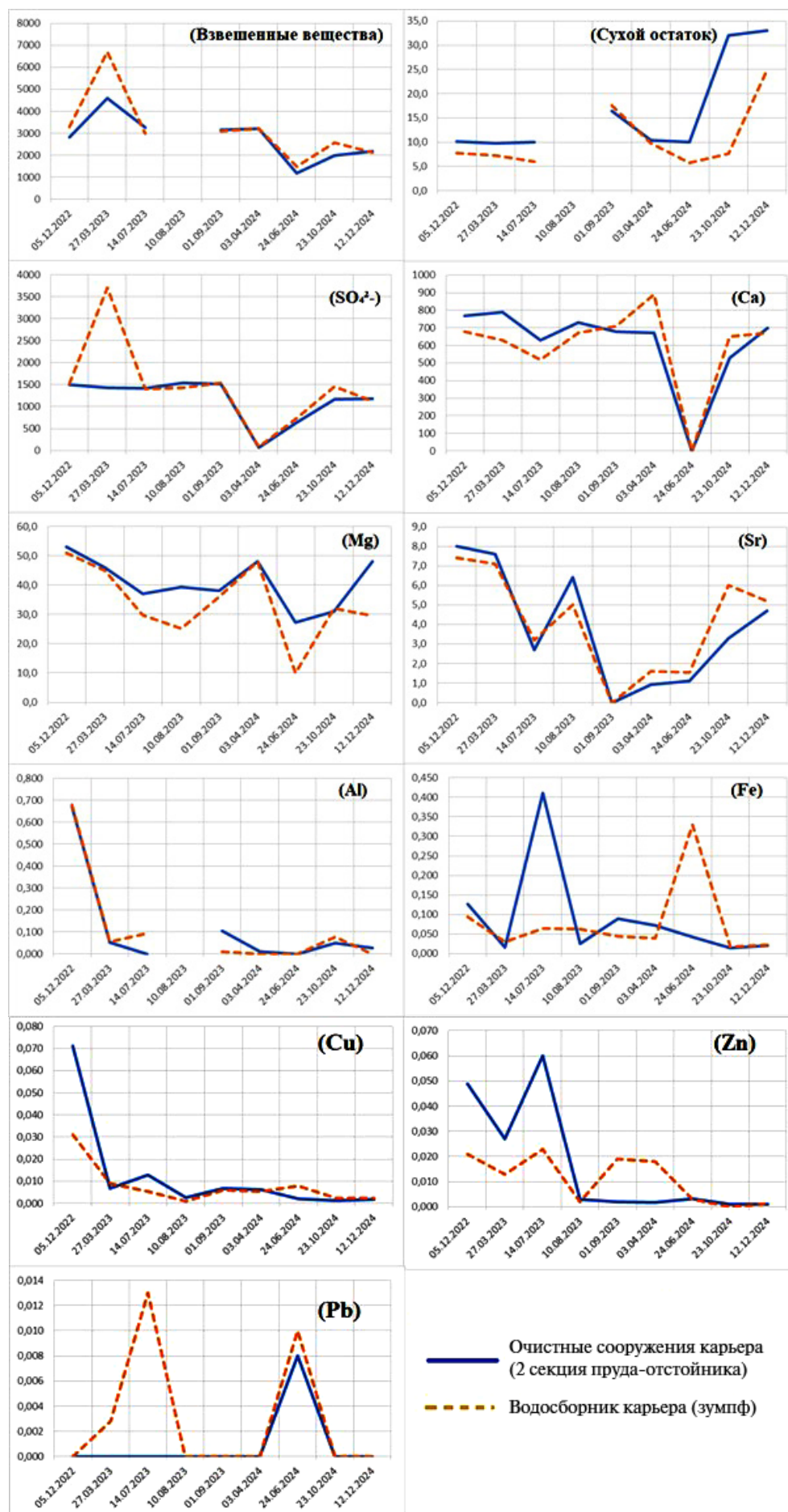


Рис. 3. Показатели изменения динамики основных элементов загрязнения сточных вод  
Fig. 3. Indicators of changes in dynamics of main elements of sewage water pollution



### Кальций ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магний ( $\text{Mg}^{2+}$ )

Динамика содержания кальция в карьерных водах демонстрирует ярко выраженную сезонную зависимость (рис. 3). В весенний период (март) наблюдались максимальные концентрации, достигающие 790–890 мг/дм<sup>3</sup>, что коррелирует с показателями концентрации сухого остатка. Общим фактором, повышающим концентрацию, являются подземные воды при минимальном поверхностном стоке. В летний период (июнь–август) концентрации снижались до 50 мг/дм<sup>3</sup> вследствие осадения карбонатов при повышении температуры. В целом содержания кальция в водосборнике варьировались от 50 до 890 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 608 мг/дм<sup>3</sup>), в пруде-отстойнике — 50–790 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 617 мг/дм<sup>3</sup>).

Содержание магния изменялось в пределах 9.9–53 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 3). Источниками поступления его в сточные воды являлись процессы выщелачивания приповерхностных карбонатов, химического выветривания глинистых минералов в отвалах вскрышных пород, а также поступление с подземными водами из нижележащих горизонтов. Можно выделить зимний максимум с концентрацией магния 29.6–53 мг/дм<sup>3</sup>; летний минимум 9.9–25 мг/дм<sup>3</sup> — за счет разбавления атмосферными осадками; осенний рост до 25–40 мг/дм<sup>3</sup>. Пространственное распределение фиксируется следующим образом: водосборник: 9.9–51 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 34.1), пруд-отстойник: 27.3–53 мг/дм<sup>3</sup> (среднее — 40.9). Также нужно отметить, что в 11 % проб выявлено незначительное превышение ПДК (40 мг/дм<sup>3</sup>). При этом максимальное значение, равное 53 мг/дм<sup>3</sup>, отмечалось в декабре 2022 года.

Сравнительный анализ  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  показал, что более стабильное поведение присуще магнию, данный элемент имеет меньшую амплитуду сезонных колебаний. Соотношение между элементами Ca/Mg изменялось от 5:1 до 35:1, при этом минимальные значения характерны для зимнего периода, максимальные наблюдались летом.

### Микрокомпоненты

#### Стронций (Sr)

Стронций (рис. 3) в карьерных водах месторождения представлен преимущественно в виде свободных ионов  $\text{Sr}^{2+}$  (85–92 % от общего содержания), что характерно для сульфатных вод гипсовых месторождений. Можно выделить два основных источника поступления. Это природный источник, а именно изоморфное замещение кальция в кристаллической решетке гипса ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SrSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), и выщелачивание включений целестина ( $\text{SrSO}_4$ ). Также возможно растворение включений стронцианита. Ко второму источнику относится влияние техногенных факторов: вымывание остатков использованных взрывчатых веществ (нитрат стронция) и химическое выветривание отвальных пород.

Наши исследования выявили четкую пространственную дифференциацию распределения содержания стронция. Так, для водосборника карьера получены следующие данные: среднегодовая концентрация — 4.1 мг/дм<sup>3</sup>, при этом максимальное значение (7.4 мг/дм<sup>3</sup>) отмечается в декабре 2022, а минимальное значение (1.6 мг/дм<sup>3</sup>) — в апреле и июне 2024 го-

да. Пруд-отстойнику соответствуют следующие показатели: среднегодовая концентрация в размере 3.9 мг/дм<sup>3</sup>; максимальное значение (8 мг/дм<sup>3</sup>) отмечается в декабре 2022, а минимальное значение (1.1 мг/дм<sup>3</sup>) — в июне 2024 года. Сезонная динамика стронция в целом коррелирует с динамикой сульфатов. Минимальные значения (1.1–1.6 мг/дм<sup>3</sup>) в летний период связаны с разбавлением карьерных вод атмосферными осадками, активностью водной растительности и усилением сорбционных процессов.

По содержанию стронция карьерные воды превышают ПДК (0.4 мг/дм<sup>3</sup>), однако это связано с природными условиями района месторождения. Исследования прошлых лет показали, что фоновые значения концентрации стронция в ближайших водотоках составляют в среднем 2.92 мг/дм<sup>3</sup> с ростом до 6.4 мг/дм<sup>3</sup> (Наход, 2024).

#### Алюминий

Динамика содержания алюминия в карьерных водах показала сложную зависимость от сезонных и технологических факторов (рис. 3). Максимальная концентрация 0.68 мг/дм<sup>3</sup> (17 ПДК для рыбохозяйственных водоемов) была зафиксирована в декабре 2022 года. Она существенно превышает концентрации алюминия в речных водах в естественном состоянии и связана с техногенным воздействием. Кроме того, могли сыграть дополнительную роль и процессы подкисления среды в зимний период наряду с увеличением подвижности  $\text{Al}^{3+}$  при низких температурах. К 2024 году содержание алюминия снизилось до 0.028 мг/дм<sup>3</sup>, что ниже ПДК.

#### Железо (Fe), медь (Cu), цинк (Zn), свинец (Pb)

В карьерных водах железо показывает следующие зависимости: максимальная концентрация 0.41 мг/дм<sup>3</sup> была зафиксирована в июле 2023 года в пруде-отстойнике, зимой наблюдалось снижение концентрации до 0.014 мг/дм<sup>3</sup> вследствие замедления химических и биологических процессов, ослабления фильтрации из болот и осадения в виде гидроксидов (рис. 3). Также надо отметить, что наличие проб с превышением ПДК было зафиксировано трижды: в декабре 2022 г. (0.127 мг/дм<sup>3</sup>), июле 2023 г. (0.41 мг/дм<sup>3</sup>) и июне 2024 г. (0.33 мг/дм<sup>3</sup>) при норме 0.1 мг/дм<sup>3</sup>.

Нужно отметить, что повышенные содержания железа в воде могут привести к его осадению, а осадки железа могут откладываться на дыхательных жабрах рыб, что приводит к сокращению биоразнообразия. Кроме того, наблюдалась смертность икры ручьевой форели и кижуча, покрытой частицами железа (Bury, 2011). Избыточное содержание железа может вызвать и гистопатологию печени и почек, снизить скорость роста и повысить смертность речных обитателей (Desjardins, 1987).

В то же время высокие концентрации железа до 0.4–0.8 мг/дм<sup>3</sup> характерны для небольших северных рек с болотным питанием. Это объясняется высоким сродством Fe с органическим веществом по сравнению с другими металлами. Благодаря этому железо сохраняется в поверхностных водах не только при низких значениях Eh < 0 и pH < 7, но и в слабощелочной



окислительной обстановке. При этом  $\text{Fe}^{2+}$  окисляется до  $\text{Fe}^{3+}$  и образует устойчивое комплексное соединение с фульвокислотой, способное противостоять гидролизу (Malov, 2023).

Показатели по меди (рис. 3) имели следующие закономерности: максимальное значение в  $0.071 \text{ мг/дм}^3$  отмечалось в пруде-отстойнике, минимальное значение  $0.001 \text{ мг/дм}^3$  — в водосборнике карьера. При оценке сезонных колебаний можно выделить весенний пик ( $0.006$ — $0.009 \text{ мг/дм}^3$ ), обусловленный выносом элемента с талыми водами, после которого следует летний минимум ( $0.002$ — $0.008 \text{ мг/дм}^3$ ), связанный с сорбционными процессами, и постепенный осенний рост ( $0.006$ — $0.007 \text{ мг/дм}^3$ ), связанный с усилением процессов выщелачивания. Аналогичная ситуация характерна и для цинка, и для свинца (рис. 3). Практически все пробы не соответствовали требованиям к содержанию меди в водоемах, используемых для рыбохозяйственных целей (ПДК  $0.001 \text{ мг/дм}^3$ ). Восемь проб не соответствовали требованиям по содержанию цинка (ПДК  $0.01 \text{ мг/дм}^3$ ) и 3 пробы — по содержанию свинца (ПДК  $0.006 \text{ мг/дм}^3$ ). А. И. Малов и другие (Malov, 2023) показали, что доминирующей формой меди в поверхностных водах региона является  $\text{CuCO}_3^0$ , тогда как цинк мигрирует преимущественно в свободной ионной форме  $\text{Zn}^{2+}$ .

В целом природу Sr, Fe и макрокомпонентов можно определить как литогенную, для остальных элементов преобладают антропогенные источники. В процессе горных работ на гипсовом месторождении используются бурение, взрывные работы, процессы дробления гипсового камня, отгрузка и транспортировка продукции. При этом образуется мелкая гипсовая пыль, которая поглощает подвижные формы тяжелых металлов, а затем оседает, образуя ореол загрязнения вокруг карьера.

### Статистический анализ полученных показателей

Для определения зависимостей между элементами были определены основные статистические показатели, построены гистограммы распределения, проведен корреляционный и факторный анализы, выделены взаимосвязи между элементами и факторы, влияющие на распределение элементов. Не учитывались следующие элементы: кадмий, кобальт, никель, свинец, хром, нефтепродукты и мышьяк — по причине недостаточного количества проб для статистического анализа. В большей части элементов ввиду небольшой выборки (количество наблюдений меньше 30) не удалось определить принадлежность к нормальному или логнормальному распределению. Для Mn, Cl, Mg, Ca,  $\text{HCO}_3^-$  и сухого остатка удалось выделить значения мод. Ни одно из значений средних и медиан не сопоставимо с модами, исходя из чего становится очевидным невозможность оценить распределения как нормальные. Все значения асимметрии и эксцесса противоречат необходимым условиям для нормального распределения. По значениям асимметрии и эксцесса можно предположить для меди и калия логнормальное распределение. Для более точного определения распределения визуально были построены гистограммы. Было определено оптимальное количество клас-

сов по формуле Стержесса (5 бинов) и построены гистограммы для 5 бинов по каждому элементу. Исходя из визуальной проверки можно сказать о том, что оценить закон распределения каждого из элементов невозможно. Никаких закономерностей не выделяется, для этого необходимо большее количество данных.

Следующим этапом анализа стала оценка корреляционной матрицы (табл. 7), в которой был выбран ряд значений, которые являются значимыми. Из них были выбраны пары элементов, у которых коэффициент корреляции выше 0.87 (сильная связь при  $r = 0.6$ ); для них построены диаграммы рассеяния по содержаниям (рис. 4). Для слабых связей коэффициент корреляции составил 0.58, для средних — 0.72 и для сильных — более 0.86. Схема связей представлена на рисунке 5.

Итоговым анализом статистических данных явился факторный анализ, в рамках которого была сформирована таблица факторов (табл. 8). Анализ ее позволил установить, что первый фактор вносит 32 % общей доли дисперсии и является значимым для натрия, стронция, магния, кальция, гидрокарбонатов и сухого остатка — для всех элементов влияние прямое и значение фактора положительное. Этот фактор отражает природные процессы формирования химического состава карьерных вод за счет растворения карбонатных и сульфатных пород. В этот фактор можно включить также сульфаты и цинк, которые показывают максимальные значения 0.59 и 0.56 соответственно при факторе № 1. Источником цинка является органоминеральный и торфяной почвенные горизонты, в которых происходит образование его устойчивых соединений с органическими веществами (Иванищев, 2022). Таким образом, поверхностные стоки являются преобладающим фактором переноса элементов. Объемы откачки карьерных вод по годам представлены в таблице 9.

Второй фактор является значимым для алюминия, марганца и меди. В него также можно включить цинк и железо. Этот фактор, по всей видимости, отражает смешанное влияние природных и антропогенных источников.

От третьего фактора и далее значимых нагрузок нет. Суммарная доля дисперсии около 70 % приходится на 3 фактора, исходя из чего они были выбраны единственно значимыми и были далее проанализированы с построением диаграмм рассеяния (рис. 6). При анализе диаграммы рассеяния химических элементов по факторам 1 и 2 видно, что ни один из них почти не влияет на калий. Также можно заметить, что для фактора 1 имеется слабое отрицательное значение для взвешенных веществ и общего железа. На остальные элементы влияние положительно. Диаграмма рассеяния химических элементов по факторам 1 и 3 показывает, что для фактора 3 почти нет влияния меди и марганца. На графике визуализировано наибольшее влияние для фактора 3 по хлору и общему железу, а наименьшее — для взвешенных веществ.

### Выводы

Целью исследования являлся анализ изменения состава карьерных вод на гипсовом месторождении за период с декабря 2022 по декабрь 2024 года. Исследование выявило значительные сезонные колебания: весенние максимумы минерализации и сульф-

**Таблица 7. Корреляционная матрица макро- и микроэлементов**

**Table 7. Correlation matrix of macro- and micronutrients**

[illegible]



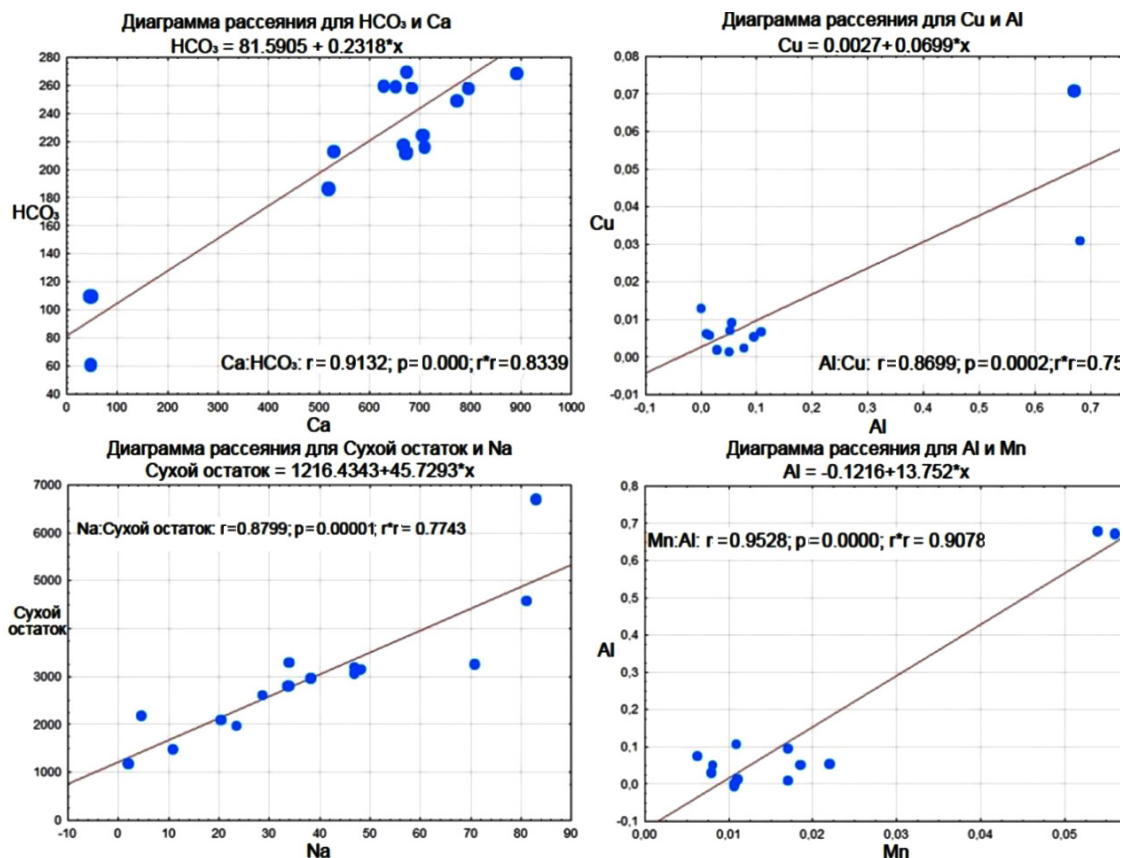


Рис. 4. Диаграммы рассеивания по содержанию для элементов с сильными корреляционными связями  
Fig. 4. Scatter diagrams by content for elements with strong correlation links

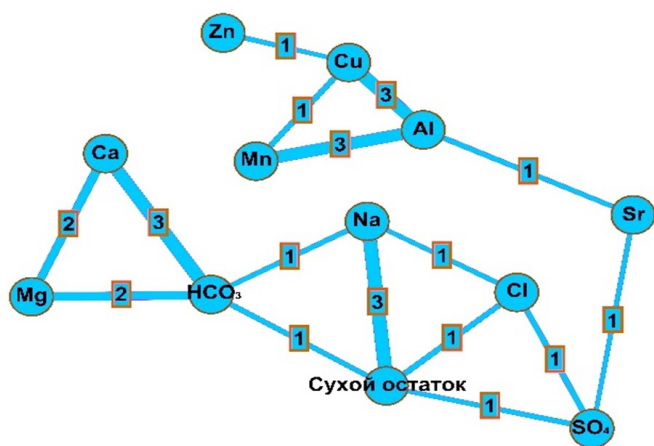


Рис. 5. Схема связи между элементами: 1 — слабая, 2 — средняя, 3 — сильная  
Fig. 5. Schematic of the links between the elements: 1 — weak, 2 — medium, 3 — strong

фатов (до 6700 и 3700 мг/дм<sup>3</sup> соответственно) действительно обусловлены преобладанием подземного питания при минимальном поверхностном стоке, а летнее снижение (например, кальция до < 50 мг/дм<sup>3</sup> в июне 2024 г.) — разбавлением атмосферными осадками. Это подтверждается климатическими данными: экстремальные осадки в апреле 2024 г. (109 мм против 13 мм в 2023 г.) объясняют аномально низкие значения сульфатов (85 мг/дм<sup>3</sup>) в этот период. Преимущественное поступление вод в водосборник карьера осуществлялось благодаря подземному питанию. В карьерных водах обнаружено периодическое превышение предельно допустимых концентраций стронция,

магния, железа, цинка, меди, кадмия и алюминия. Это требует усиленного контроля и возможной корректировки технологических процессов добычи гипсового камня. Очистные сооружения продемонстрировали низкую эффективность, снижая концентрацию взвешенных веществ на 29 %, но основной причиной этого являются невысокие показатели взвешенных веществ в карьерных водах.

Корреляционный и факторный анализы позволили установить, что первый фактор вносит 32 % общей доли дисперсии и является значимым для натрия, стронция, магния, кальция, гидрокарбонатов и сухого остатка, цинка и железа. Этот фактор отражает природные процессы формирования химического состава карьерных вод за счет растворения карбонатных и сульфатных пород. Второй фактор (21 % общей доли дисперсии) является значимым для алюминия, марганца и меди. Этот фактор, по всей видимости, отражает смешанное влияние природных и антропогенных источников. Корреляционный анализ (например, сильная связь Ca—HCO<sub>3</sub>,  $r = 0.91$ ) указывает на литогенное происхождение макрокомпонентов (кальций, магний, гидрокарбонаты), тогда как техногенное влияние более выражено для алюминия (пик 0.68 мг/дм<sup>3</sup> в 2022 г.) и тяжелых металлов (медь, цинк), связанных с гипсовой пылью от взрывных работ. Антропогенный вклад на гипсовом месторождении может возникать за счет мелкой гипсовой пыли, которая поглощает подвижные формы тяжелых металлов, а затем оседает, образуя ореол загрязнения вокруг карьера.

Таким образом, хотя сезонные закономерности и природная обусловленность сульфатов/стронция доказаны убедительно, межгодовые различия требуют



Таблица 8. Факторный анализ химического состава карьерных вод

Table 8. Factor analysis of quarry water chemical composition

|                                   | Фактор 1<br>Factor 1 | Фактор 2<br>Factor 2 | Фактор 3<br>Factor 3 | Фактор 4<br>Factor 4 | Фактор 5<br>Factor 5 | Фактор 6<br>Factor 6 |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Na                                | 0.71                 | -0.41                | 0.43                 | -0.14                | 0.14                 | -0.12                |
| K                                 | 0.02                 | -0.12                | -0.64                | -0.09                | -0.37                | 0.64                 |
| Al                                | 0.33                 | 0.85                 | -0.20                | 0.21                 | 0.04                 | -0.18                |
| Mn                                | 0.30                 | 0.81                 | 0.00                 | 0.25                 | 0.27                 | 0.16                 |
| Cu                                | 0.51                 | 0.79                 | -0.02                | 0.00                 | -0.16                | -0.05                |
| SO <sub>4</sub>                   | 0.59                 | -0.24                | 0.24                 | 0.63                 | -0.23                | 0.17                 |
| Zn                                | 0.56                 | 0.39                 | 0.40                 | -0.36                | -0.37                | -0.04                |
| Cl                                | 0.40                 | -0.46                | 0.63                 | 0.17                 | -0.06                | 0.08                 |
| Sr                                | 0.75                 | 0.05                 | -0.22                | 0.50                 | -0.20                | -0.15                |
| сухой остаток<br>dry residue      | 0.79                 | -0.36                | 0.24                 | 0.12                 | 0.13                 | 0.18                 |
| Mg                                | 0.79                 | 0.10                 | -0.37                | -0.31                | 0.17                 | 0.24                 |
| Ca                                | 0.75                 | -0.25                | -0.41                | -0.33                | 0.00                 | -0.22                |
| взвеш. вещ-ва<br>suspended solids | -0.15                | -0.38                | -0.62                | 0.22                 | -0.44                | -0.36                |
| Fe                                | -0.16                | 0.32                 | 0.62                 | -0.34                | -0.53                | 0.02                 |
| HCO <sub>3</sub>                  | 0.80                 | -0.22                | -0.30                | -0.35                | 0.04                 | -0.13                |
| общ. дис.<br>total dispersion     | 4.82                 | 3.10                 | 2.53                 | 1.45                 | 1.01                 | 0.83                 |
| доля общ.<br>total share          | 0.32                 | 0.21                 | 0.17                 | 0.10                 | 0.07                 | 0.06                 |

Таблица 9. Динамика откачки карьерных вод

Table 9. Dynamics of quarry water pumping

| Год / Year                            | 2014  | 2015   | 2016  | 2017   | 2018   | 2019   | 2020   | 2021   | 2022   | 2023   | 2024   |
|---------------------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Объем<br>откачки<br>Pumping<br>volume | 76136 | 116592 | 77934 | 236332 | 247119 | 259497 | 334234 | 188122 | 221203 | 121188 | 144442 |

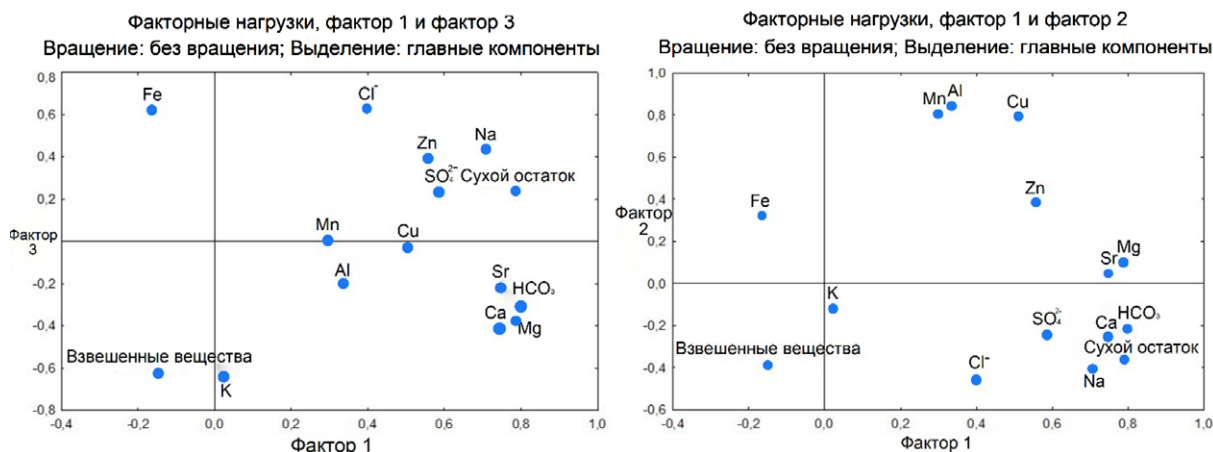


Рис. 6. Диаграммы рассеивания элементов

Fig. 6. Scatter diagrams of the elements

более глубокого наблюдения с учётом гидроклиматических условий. Полученные данные могут быть использованы для оптимизации системы экологического мониторинга, совершенствования технологий очистки карьерных вод, учитывающих специфику северных месторождений.

### Литература / References

ГН 2.1.5.1315-03. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М.: Минздрав России, 2003. 56 с.



- GN 2.1.5.1315-03. Hygienic standards. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemical substances in water of drinking and cultural-domestic water use objects. Ministry of Health of Russia. Moscow, 2003, 56 p. (in Russian)
- Зыкова Е. Н. Особенности накопления тяжелых металлов в почвах Северодвинского промышленного района // Известия РАН. Серия географическая. 2008. № 6. С. 63—69.
- Zykova E. N. Features of heavy metal accumulation in soils of the Severodvinsk industrial region. Proceedings RAS. Geographical series, 2008, No. 6, pp. 63—69. (in Russian)
- Иванищев В. В. Цинк в природе и его значение для растений // Известия ТулГУ. Науки о Земле. 2022. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsink-v-prirode-i-ego-znachenie-dlya-rasteniy> (дата обращения: 09.07.2025).
- Ivanishchev V. V. Zinc in nature and its importance for plants. Proceedings of Tula State University. Earth Sciences, 2022, No. 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsink-v-prirode-i-ego-znachenie-dlya-rasteniy> (date of access: 07/09/2025). (in Russian)
- Наход В. А., Малов А. И., Дружинин С. В. Исследование влияния разработки месторождения гипса на состав природных вод // Успехи современного естествознания. 2024. № 4. С. 56—63; URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38249> (дата обращения: 14.06.2025). <https://doi.org/10.17513/use.38249>
- Nakhod V. A., Malov A. I., Druzhinin S. V. Study of the influence of gypsum deposit development on the composition of natural waters. Successes of modern natural science, 2024, No. 4, pp. 56—63; URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=38249> (date of access: 14.06.2025). (in Russian)
- Об утверждении нормативов качества воды для объектов водного рыболовства, в том числе норм предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ в водах объектов водного рыболовства: Приказ Федерального агентства по рыболовству № 20 от 18 января 2010 г. М., 2010.
- Order of the Federal Agency for Fisheries No. 20. On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in waters of fishery water bodies. Moscow, 2010. (in Russian)
- Попова Л. Ф., Васюк К. С., Васильева А. И., Репницына О. Н., Бечина И. Н., Усачева Т. В. Эколого-аналитическая оценка загрязнения почв тяжелыми металлами в городах Архангельской промышленной агломерации // Фундаментальные исследования. 2012. № 11-3. С. 731—734.
- Popova L. F., Vasyuk K. S., Vasilyeva A. I., Repnitsyna O. N., Bechina I. N., Usacheva T. V. Ecological-analytical assessment of soil pollution by heavy metals in cities of Arkhangelsk industrial agglomeration. Fundamental Research, 2012, No. 11(3), pp. 731—734. (in Russian)
- Сидкина Е. С., Торопов А. С., Конышев А. А. Геохимические особенности природных вод карьеров строительного камня Питкярантского района (Карелия) // Известия ТПУ. 2023. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geohimicheskie-osobennosti-prirodnih-vod-karierov-stroitel'nogo-kamnya-pitkyarantskogo-rayona-kareliya> (дата обращения: 27.05.2025).
- Sidkina E. S., Toropov A. S., Konyshev A. A. Geochemical features of natural waters in building stone quarries of the Pitkyaranta District (Karelia). Bulletin of Tomsk Polytechnic University, 2023, No. 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/geohimicheskie-osobennosti-prirodnih-vod-karierov-stroitel'nogo-kamnya-pitkyarantskogo-rayona-kareliya> (accessed: 27.05.2025). (in Russian)
- Торосян В. Ф., Торосян Е. С. Критерии экологической оценки состояния водных объектов горнопромышленных районов // ГИАБ. 2012. № 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-ekologicheskoy-otsenki-sostoyaniya-vodnyh-obektov-gornopromyshlennyh-rayonov> (дата обращения: 27.05.2025).
- Torosyan V. F., Torosyan E. S. Criteria for Environmental Assessment of Water Bodies in Mining Regions. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2012, No. 7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kriterii-ekologicheskoy-otsenki-sostoyaniya-vodnyh-obektov-gornopromyshlennyh-rayonov> (accessed: 27.05.2025). (in Russian)
- Al-Harathi A. Environmental impacts of the gypsum mining operation at Maqna area, Tabuk, Saudi Arabia Environmental Geology 2001, Vol. 41, P. 209—218. <https://doi.org/10.1007/s002540100384>
- Bury N., Boyle D., Cooper C. A. Iron // Fish Physiology: Homeostasis and Toxicology of Essential Metals. Vol. 31, Part A. Academic Press, 2011. P. 201—251.
- Caselle C., Baud P., Kushnir A. R. L., Reuschlé T., Bonetto S. M. R. Influence of water on deformation and failure of gypsum rock // Journal of Structural Geology. 2022. Vol. 163. P. 104722. DOI: 10.1016/j.jsg.2022.104722
- Caselle C., Bonetto S., Comina C., Stocco S. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries // Tunnelling and Underground Space Technology. 2020. Vol. 95. P. 103137. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103137
- Desjardins L. M., Hicks B. D., Hilton J. W. Iron catalyzed oxidation of trout diets and its effect on the growth and physiological response of rainbow trout // Fish Physiology and Biochemistry. 1987. Vol. 3. P. 173—182.
- Malov A. I., Nakhod V. A., Druzhinin S. V. Impact of gypsum mining on the environment in the northern taiga. Environ. Earth Sci. 2025, 84, 73.
- Malov A. I., Sidkina E. S., Cherkasova E. V. The influence of DOC on the migration forms of elements and their sedimentation from river waters at an exploited diamond deposit (NW Russia) // Water. 2023. Vol. 15. P. 2160.
- Yakovlev E. Yu., Druzhinina A. S., Zykova E. N., Zykov S. B., Ivanchenko N. L. Assessment of heavy metal pollution of the snow cover of the Severodvinsk industrial district (NW Russia) // Pollution. 2022. Vol. 8, No. 4. P. 1274—1293.

Поступила в редакцию / Received 04.06.2025





## Полевой геологический практикум «Палеозойские органогенные постройки бассейна р. Илыч, Северный Урал»

### Field geological workshop «Paleozoic organic buildups of the Ilych River basin, Northern Urals»

Colleagues from Ufa, Samara, Krasnoyarsk, Moscow and St. Petersburg visited the Ilych River (Northern Urals) on a geological field trip from June 26 to July 4, 2025. The choice of location was conditioned by the fact that in the Ilych River basin, outcrops of organic buildups of different types and ages are currently known, and there is also a favorable opportunity to see not only the organic buildups, but also the enclosing sediments. During these days, reefs of the Upper Ordovician, Upper Silurian and Lower Devonian, the Upper Serpukhovian-Lower Bashkirian microbial-brachiopod bank, Upper Carboniferous-Lower Permian biostromes, microbial and skeletal mounds were shown. Along with them, pre-reef, back-reef, and in some cases also sub-reef and over-reef sediments were presented.

Полевой геологический практикум на р. Илыч (Северный Урал) проходил с 26 июня по 4 июля 2025 г. Выбор места проведения был обусловлен несколькими факторами: 1) в бассейне р. Илыч на настоящий момент известны выходы органогенных построек разных типов и возрастов; 2) имеется благоприятная возможность увидеть не только сами органогенные сооружения, но и отложения, их вмещающие; 3) кордон Печоро-Илычского государственного заповедника Усть-Ляга с гостиницей представляет собой удобное место «для лагеря»; 4) мы на большей части этих объектов отработали не один полевой сезон и хотелось показать наработанное. К слову сказать, практикумом интересовались и даже заявлялись многие, но не все смогли поучаствовать. В итоге набралось 6 коллег-«практикантов» из Уфы, Самары, Красноярска, Москвы и Санкт-Петербурга.

Наконец-то пришёл тот светлый (и не очень прохладный) день 26 июня, когда с утра мы все собрались на крыльце института, чтобы исполнить задуманное. Сюда нам любезно подали автомашину ФИЦ, мы загрузились и отправились в путь. Это был наш первый скучный день. Дорога пролегла от Мезенской синеклизы, через Тиман и дальше в область Печорской плиты до пгт Троицко-Печорск, где мы заселились в гостиницу на ночь. По пути экскурсанты увидели с. Серегово, стоящее на соляном куполе, с моста через р. Чуть, тот самый доманик, а в 20 км после Ухты – несколько скал, являющих собой отложения верхнефранской зарифовой лагуны. Возле деревни Кемдин 100 лет назад добывали асфальтиты очень высокого качества. С дороги эти рудники «практиканты», конечно, не увидели, но осознание этого факта, возможно, придало сил, чтобы одолеть остальной путь.

Во второй скучный день мы все героически запаслись терпением и доехали-таки до устья р. Илыч, где перегрузились на аутентичные моторные лодки Печоро-Илычского заповедника. Сегодня нас ждали вдохновляюще-унылые берега с небольшими обнажениями полого залегающих терригенных пермских пород. Проплыв Овра-Лузскую седловину, незаметно и буднично вошли в пределы Верхнепечорской впадины. Возможно, некоторых могло вдохновить понимание, что на самом севере этой впадины было Вуктыльское газоконденсатное месторождение, входившее когда-



Общее фото перед отъездом  
General photo before departure

то в двадцатку крупнейших. Пройдя по реке 80 км, остановились в гостинице д. Еремеево.

На третий день снова запрыгнули в лодки и последовали дальше. Первоначально унылый пейзаж через какое-то время начал наконец-то сменяться; появились первые большие скалы. А через 50 км проплыли величественные Изпыредские скалы, обозначающие, как ворота, вход на западный склон Северного Урала. Дальше скал было хоть отбавляй, а они уж точно должны радовать глаз настоящих геологов (теоретически). К вечеру доехали до кордона Усть-Ляга, где



Река Илыч  
The Ilych River





Геолог А. В. Дронов — самый опытный из нас  
Geologist A. V. Dronov is the most experienced of us



В недрах Шантым-Прилука  
In the depths of Shantym-Priluk

с шиком разместились в уютной двухэтажной гостинице.

В следующие несколько дней все активно скакали по скалам. Некоторые объекты находились в лесу, и приходилось долго и мучительно вглядываться в них, чтобы хоть что-то увидеть. Другие, наоборот, были хорошо отмыты, и тут уж все бегали по обнажениям с фотоаппаратами в руках. За эти дни были показаны рифы верхнего ордовика, верхнего силура и нижнего девона, верхнесерпуховско-нижнебашкирская микробиально-брахиоподовая банка, верхнекаменноугольно-нижнепермские биостромы, микробийальные и скелетные холмы. В нагрузку к ним в меню шли предрифовые, зарифовые, а в некоторых случаях также подрифовые и надрифовые отложения. Из-за высокой воды (вследствие чего река была похожа на Ilych-Highway) не все запланированные объекты получилось продемонстрировать должным образом, но в качестве бонусов были показаны отложения тепловодной визейской рампы (но сравнению с прохладноводной рампой помешал ливень). По своему опыту геологического экскурсовода знаю, что крупные кораллы, любившие в палеозое открытые шельфовые среды, не оставляют равнодушными даже самых замшелых нефтяников. Так было и здесь. Некоторые обнажения не досчитались после набега геологов-«практикантов» нескольких хороших экземпляров ругоз и табулят приличных размеров.

Погода в целом также баловала: дни в основном были теплые и ясные, лишь иногда бодрил душ из проплывающих мимо грозовых облаков. Поприветствовать экскурсантов в разные дни на берега Ilych-Highway выходили олени, лоси и хозяева тайги. С дружественными визитами прилетали лебеди, утки, кулики, оводы, комары и даже мошки.

Дорога обратно в Сыктывкар была уже более легкой, несмотря на усталость. Домой же ехали! Вроде бы всего 9 дней, но за время проведения полевого практикума кто-то успел стать дядей, а кто-то дедом. Прощание во дворе института вышло несколько скомканным, но очень грели душу благодарности,



Ищем отмытые поверхности у воды, если риф в лесу

If the reef is in the forest,  
we look for the washed surfaces near water

которые пришли потом на e-mail. Приведем одну из них:

«Евгений, добрый день!

... Проведение экскурсии я описываю, как геологический семинар по премиум-подписке. Продуманный маршрут с минимальными энергозатратами участников, избавление от мыслей «а что бы покушать?», ежедневная баня на кордоне, проживание в домиках, а не в палатках, чего только стоит кастрюля супа на обед, великолепные оладушки с киселем, антикомарин в конце концов. Очень полезна была памятка экскурсанта, но с броднями вышло недопонимание. Хорошо, что до экскурсии мы наконец-то поняли друг друга, и я все-таки ими обзавелась. Действительно, без них было бы не комфортно.





Геологические объекты были интересными и разнообразными. Могу порекомендовать знакомить участников с объектами осмотра заранее, направляя материалы по ним до экскурсии. Очень здорово, что была представлена печатная версия монографии и с ней можно было ознакомиться до экскурсии. Но мне этого сделать не удалось по причине подготовки к докладу на конференции. Это моя личная проблема, к вам никаких претензий нет. Теперь, по завершении экскурсии, можно перечитать монографию в спокойной обстановке и переосмыслить увиденное.

Моё мировоззрение поменялось не только относительно геологии, но и жизни. Еще раз убедилась, что планы — это всего лишь планы и нужно быть гибким к обстоятельствам. Керн не так уж и плох, как и работа в кернохранилище. Мы привыкли к комфортной жизни, забывая о работе геолога, какой она была изначально.



К. А. Тихонова набирает кораллы

K. A. Tikhonova is collecting corals



Е. Н. Савельева возле водопада на Косью

E. N. Savelyeva near the waterfall on Kosyu



К. А. Шустиков перед осмотром верхнеордовикского рифа на Косью

K. A. Shustikov before viewing the Upper Ordovician reef on Kosyu

Проведенный практикум напомнил, что мы всего лишь люди, обрастающие мишурой, нужной или ненужной. Несмотря на многолетнее изучение геологических объектов, остаются вопросы без ответов, и это нормально.

... Проведение таких практикумов очень нужно. Хорошо, что у вас есть на это достаточное количество энтузиазма и сил. Сейчас стала популярна организация подобных мероприятий, но стоят они гораздо дороже. Не могу ничего сказать за их качество. Без вашей организации я бы никогда сама не добралась до этих мест. Благодарю еще раз вас, Евгений, Ксению, добродушных инспекторов Владислава и Анну, водителя, а также всех причастных к организации полевого геологического практикума!»

Ксения Александровна Тихонова,  
Красноярск-НИПИнефть

В свою очередь я хотел бы поблагодарить всех, кто был причастен к проведению этого трудного (не скрою) геологического практикума. Неоценимую помощь в организации и «документальном оформлении» оказала наша плано-экономическая группа! С водителем ФИЦ Дмитрием Сельковым всегда приятно ездить, а заместителем директора П. Е. Шмыровым был решен не один вопрос обеспечения практикума. Ксения Браун, ваша еда была бесподобна! Особую благодарность хотелось бы выразить директору Печоро-Ильчского государственного заповедника Николаю Сергеевичу Смирнову, к которому организаторы практикума обращались неоднократно по разным вопросам и деталям в любое время суток. Инспекторы заповедника, Владислав Неофитович и Анна Аркадьевна, безропотно возили нас по реке и мастерски безопасно «пришвартовывались» в любом нужном нам месте. Спасибо им за доброту, душевность и отзывчивость! Без всех этих людей проведение полевого геологического практикума было бы невозможным. Особую признательность хотелось бы выразить и тем, кто набрался смелости поучаствовать в нашем мероприятии. Спасибо, что бегали с горящими глазами и стояли с критическим выражением лица на обнажениях; спасибо, что спрашивали и записывали; спасибо, что подсказывали и обсуждали; спасибо, что помогали в быту; спасибо, что просто были! Без вас проведение практикума не имело бы никакого смысла!

к. г.-м. н. Е. С. Пономаренко





## Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента



## Structure, substance, history of lithosphere of the Timan-Northern Ural segment

Институт геологии имени академика Н. П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН приглашает вас принять участие в 34-й Всероссийской научной конференции «Структура, вещество, история литосферы Тимано-Североуральского сегмента», которая состоится 25—27 ноября 2025 года в г. Сыктывкаре.

Заполнить регистрационную форму и подать материалы можно до 20 октября 2025 года.

Тематика конференции включает в себя все основные направления наук о Земле.

### Контрольные сроки:

- окончание приема материалов — 20 октября.
- рассылка программы — 3 ноября.
- заезд и регистрация участников — 24 ноября.
- открытие конференции — 25 ноября.

### Формат конференции: очный.

Возможность участия в конференции в онлайн-формате обсуждается в индивидуальном порядке.

Программа конференции включает лекции и геологические практикумы. Каждый участник может представить один доклад и быть соавтором других докладов.

К участию в научной конференции приглашаются аспиранты, молодые учёные, сотрудники производственных организаций геологического профиля, студенты вузов Российской Федерации и других стран мира. Мы будем рады видеть также молодых ученых смежных специальностей (химиков, физиков, биологов, технологов и т. д.), чьи научные интересы так или иначе связаны с природными и синтетическими материалами, минеральным сырьем. Возраст участника на момент проведения мероприятия не должен превышать 39 лет.

### Форма представления докладов:

- **устный:** продолжительность 15 минут (включая вопросы). Обязательно сопровождение компьютерной презентацией;

- **стендовый:** доклад должен содержать заголовок с названием, фамилией автора(-ов), местом работы/учебы, контактами (e-mail, тел.), кафедрой, курсом (для студентов), а также ФИО и местом работы научного руководителя.

Представленные для опубликования материалы должны пройти научное редактирование (руководителем, заведующим) и сопровождаться актом экспертизы. Сборник материалов будет опубликован к началу конференции.

**Контакты:** Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН 167982, Республика Коми, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54.

e-mail оргкомитета: [juventus-geo@yandex.ru](mailto:juventus-geo@yandex.ru)

Секретарь конференции: Инкина Наталья Сергеевна

Тел. (8212) 24-53-53; факс: (8212) 24-09-70

The N. P. Yushkin Institute of Geology of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences invites you to take part in the 34<sup>th</sup> All-Russian scientific conference «Structure, substance, history of lithosphere of the Timan-Northern Ural segment», which will be held on November 25—27, 2025 in Syktывkar (Komi Republic).

Please fill the registration form and submit materials until October 20, 2025.

The conference topics include all the main areas of Earth Sciences.

### Deadlines:

- submission — October 20, inclusive;
- program mailing — November 3;
- arrival and registration of participants — November 24;
- conference opening — November 25.

### Conference format: held in person.

The possibility of online participation is discussed individually.

The conference program includes lectures and geological workshops.

Each participant can present one report and can be a co-author of other reports.

Postgraduate students, young researchers, employees of industrial organizations with a geological profile, students of universities in the Russian Federation and other countries are invited to participate in the scientific conference. We will also be glad to see young researchers of related areas (chemists, physicists, biologists, technologists, etc.), whose scientific interests are related to natural and synthetic materials, mineral raw materials. The age of the participant at the time of the event should not exceed 39 years.

### Presentation format:

- **oral:** duration — 15 minutes (including questions). A computer presentation is required.

- **poster:** the report should contain a title, last name of the author(s), place of work/study, contacts (e-mail, phone), department, course (for students), as well as the full name and place of work of the scientific supervisor.

Materials submitted for publication should undergo scientific editing (by the supervisor, head of the department) and be accompanied by an expert report. The proceedings will be published by the beginning of the conference.

### Contacts:

Institute of Geology FRC Komi SC UB RAS  
54 Pervomayskaya str., Syktывkar, Komi Republic, 167982, Russia

e-mail of the Organizing Committee:

[juventus-geo@yandex.ru](mailto:juventus-geo@yandex.ru)

Secretary: Inkina Natalya Sergeevna

Phone +7 (8212) 24-53-53; fax: +7 (8212) 24-09-70

### Редакторы издательства:

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

### Компьютерная верстка

Т. В. Хазовой

Выписка из реестра средств массовой информации ПИ № ФС77-75435 от 19.04.2019, выданное Роскомнадзором. Отпечатано: 29.08.2025. Формат бумаги 60 × 84 1/8. Печать RISO. Усл. п. л. 6,5. Тираж 140. Заказ 1252. 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 редакции: 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 Г. Каблиса, И. Голубевой, А. Журавлева, А. Шмырова, Н. Инкиной